

УДК 537.874.3

А.В. Новиков, Ю.П. Акулиничев

Модель пространственно-временного поля индекса преломления приземного слоя атмосферы

По данным непрерывных двухмесячных измерений на семи уровнях в слое 2–200 м над сушей построена статистическая модель случайного поля индекса преломления, основанная на разложении временных вариаций в ряд Фурье, а высотных вариаций – на разложении Карунена–Лоэва. Приведены значения параметров аппроксимаций автокорреляционных функций индекса преломления. Показано, что случайная составляющая высотного профиля индекса преломления достаточно точно может быть представлена в виде суммы двух детерминированных функций со случайными весовыми коэффициентами, а для корректного описания вариаций высотного градиента индекса преломления в самом нижнем слое (2–20 м) требуются три слагаемых.

Ключевые слова: атмосферная рефракция, индекс преломления, высотный профиль, распространение радиоволн, волновод испарения.

1. Введение

К настоящему времени имеются обширные сведения о суточных и сезонных зависимостях индекса преломления воздуха $N = (n - 1) \cdot 10^6$, где n – коэффициент преломления; составлены карты для разных районов местности; рекомендована модель высотного профиля N для стандартной атмосферы [1–3].

Для измерения высотных профилей индекса преломления используют два основных метода [1–2]:

– прямой метод с помощью СВЧ-рефрактометров, который может дать точность 0,1 N -единиц при взятии отсчетов с частотой до 100 Гц;

– косвенный метод (с помощью датчиков измеряют температуру воздуха, влажность и атмосферное давление, а затем по формулам рассчитывают значение N). Здесь точность ограничена величиной 1–3 N -единиц, а постоянная времени датчиков обычно имеет порядок единиц секунд.

Крупномасштабные (1–10 км по высоте, 100–500 км по дальности и 3–6 ч по времени) вариации N исследованы достаточно хорошо [1–3]. Это обеспечено сетью метеостанций и станций аэрологического зондирования. В дополнение имеются существенно менее обширные данные и о случайных мелкомасштабных (единицы метров в пространстве и доли секунды по времени) вариациях N [1, 2], которые были получены с помощью СВЧ-рефрактометров. Основной вывод – временная функция автокорреляции N обычно имеет линейный спад, а интервал корреляции сильно зависит от времени суток и от географического положения пункта измерения, включая и высоту над уровнем моря. Спектр флуктуаций N лежит в пределах от 0,001 до 30 Гц [1]. Также отмечена линейная зависимость интенсивности флуктуаций N от высоты.

Весьма мало данных для приземного слоя толщиной 100–200 м, который определяет условия распространения СВЧ-радиоволн на трассах прямой видимости. В работе [4] исследовалась корреляционная связь между градиентами N атмосферы в высотном слое 120–300 м над поверхностью земли в двух пунктах, разнесенных на 100 км, при одновременных измерениях с интервалом в 3 ч в течение месяца (июль 1972 г.). Горизонтальный градиент имел ярко выраженный суточный ход на обеих высотах (120 и 300 м) с максимумом в дневные (18 ч) и минимумом в предутренние (03–06 ч) часы. Среднее значение горизонтального градиента составило 10 N -единиц/100 км, вертикального – минус 0,06 N -единиц/м. Суточный ход вертикальных градиентов имел максимум в ночные и утренние часы, а минимум – днем. Также был отмечен суточный ход коэффициента корреляции (0,6–0,8) между значениями N в разных пунктах, одинаковый для обеих высот. Между высотными градиентами N пространственной корреляции обнаружено не было.

В работе [5] приведены результаты одновременного измерения N в двух пространственно разнесенных точках (от 0,1 до 1 м по вертикали и горизонтали) с помощью микроволновых радиорефрактометров (июнь – октябрь 1964 г., длина волны 10 см). Было отмечено существование разностей N в несколько N -единиц на расстояниях 0,1–1 м как в вертикальном, так и в горизонтальном направлениях.

Работа [6] посвящена спектральному исследованию вариаций N . Измерения проводились осенью 1963 г. микроволновым радиорефрактометром Бирнбаума на мачте высотой 56 м. По 14 наборам двухминутных сеансов был вычислен набор автокорреляционных функций и соответствующих спектров. Шаг по времени составлял 0,25 с. В итоге выяснилось, что среднее значение показателя степени вычисленных спектров оказалось равным 1,7, что хорошо согласуется с теорией Колмогорова–Обухова (закон 5/3). Форма автокорреляционных функций на начальном участке – линейно убывающая.

В последнее время изучению приземного слоя стало уделяться большее внимание. Шире практикуется автоматическая регистрация метеорологических параметров, измеряемых при помощи датчиков, размещаемых на разных высотах на мачте или башне.

2. Экспериментальные данные и методика их обработки

Целью данной работы является построение пространственно-временной модели N на основании экспериментальных данных с достаточно высоким разрешением. Метеорологические данные нам были предоставлены Нидерландским метеорологическим институтом (KNMI) и Международным исследовательским центром по телекоммуникациям и радиолокации Делфтского технического университета (IRCTR, TU Delft, Нидерланды).

Измерялись температура воздуха и точка росы у поверхности земли и на семи высотах (семь уровней башни): 2; 10; 20; 40; 80; 140; 200 м. Показания датчиков записывались через каждые десять минут с 1 августа по 30 сентября 2001 г.

Значения N оценивают по данным измерений температуры, давления и влажности с использованием формулы Смита–Вейнтрауба [1, 2]

$$N(h_i) = \frac{77,6}{t + 273,15} \left(P(h_i) + \frac{29375}{t + 273,15} 10^{\frac{7,63t_d}{241,9+t_d}} \right), \quad N\text{-единицы}, \quad (1)$$

где t и t_d – значения температуры и точки росы, измеренные на высоте h_i , °С; $P(h_i)$ – значение атмосферного давления на высоте h_i , ГПа. Так как в имеющихся экспериментальных данных давление было измерено только на уровне двух метров от поверхности земли, то атмосферное давление на необходимой высоте оценивалось по барометрической формуле [2]

$$P(h_{i+1}) = P(h_i) e^{-\frac{k}{\langle T_w \rangle} (h_{i+1} - h_i)}, \quad \text{ГПа}, \quad (2)$$

где $k=34,17$ К/км; $\langle T_w \rangle$ – средняя виртуальная температура в высотном слое « $h_{i+1} - h_i$ », К. В нашем случае виртуальную температуру можно заменить на реальную, т.е. пренебречь влиянием водяных паров на атмосферное давление $\langle T_w \rangle \approx 0,5(t_{i+1} + t_i) + 273,15$, К, где t_i – температура воздуха в i -м высотном слое, °С.

Таким образом, по (1) можно рассчитать матрицу N , состоящую из значений N . Число строк определяется числом отсчетов N по времени, а число столбцов равно числу уровней по высоте, т.е. семи. Погрешность измерения температуры – 0,1 °С, давления – 0,1 ГПа. Поэтому ошибка расчета N по формуле (1) не превышает 1,5 N -единиц. Полученные временные ряды были подвергнуты статистической обработке с использованием усреднения по времени.

3. Высотная и суточная зависимости числовых характеристик индекса преломления и его высотного градиента

На рис. 1 изображен график усредненных (за август) высотных профилей N для характерных моментов времени: 0, 6, 12 и 18 ч GMT. Видно, что высотный слой 40–80 м характеризуется наличием субрефракции, а в приземном слое (до 20 м) индекс преломления резко убывает с ростом высоты. Это связано с быстрым уменьшением влажности при удалении от поверхности земли, что характерно для волновода испарения. Все это говорит о том, что измерения N в приземном слое до 100 м необходимо проводить с хорошим разрешением по высоте (желательно 5–10 м).

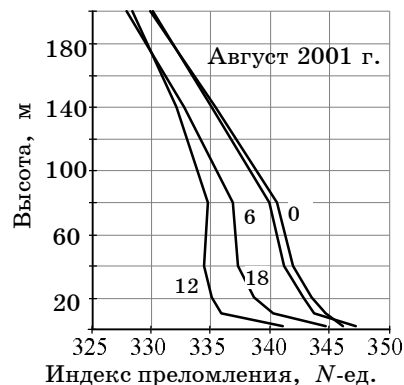
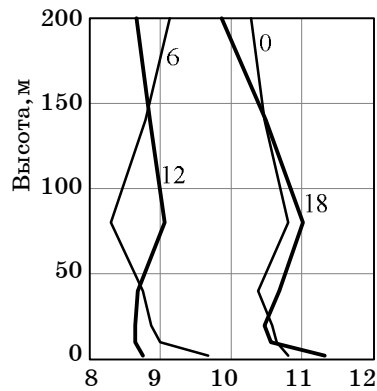


Рис. 1. Усредненные за месяц высотные профили индекса преломления (возле каждой кривой указано время суток)

СКО индекса преломления, N -ед.Рис. 2. Усреднённые за два месяца высотные профили СКО N

На рис. 2 показаны графики высотных профилей среднеквадратического отклонения (СКО) N для характерных моментов времени.

В табл. 1 сведены основные статистические характеристики временного ряда N для всех высот, где «Min N » и «Max N » – минимальное и максимальное значения N соответственно.

От высоты, в основном, зависят среднее значение N и амплитуды суточного хода его среднего и СКО.

В табл. 2 сведены основные статистические характеристики временного ряда высотного градиента N для всех слоев.

Из табл. 2 можно определить, что явление сверхрефракции, когда значение градиента N меньше минус 157 N -единиц/км, наблюдалось во всех анализируемых слоях. В табл. 3 даны оценки вероятности возникновения сверхрефракции для различных слоев, причем наибольшие значения наблюдаются в нижних слоях в период с 12 до 18 ч.

Таблица 1

Статистические характеристики временного ряда N

| Высота, м | 2 | 10 | 20 | 40 | 80 | 140 | 200 |
|---|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| Среднее значение N , N -ед. | 340 | 337 | 336 | 335 | 335 | 331 | 327 |
| СКО N , N -ед. | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 9 |
| Min N , N -ед. | 319 | 313 | 311 | 310 | 309 | 307 | 303 |
| Max N , N -ед. | 371 | 368 | 368 | 367 | 368 | 365 | 360 |
| Амплитуда суточного хода N , N -ед. | 6,3 | 8,3 | 8 | 7,8 | 7,4 | 6,2 | 4,8 |
| Амплитуда суточного хода СКО N , N -ед. | 3 | 2,8 | 2,9 | 2,8 | 3,2 | 2,3 | 1,9 |

Таблица 2

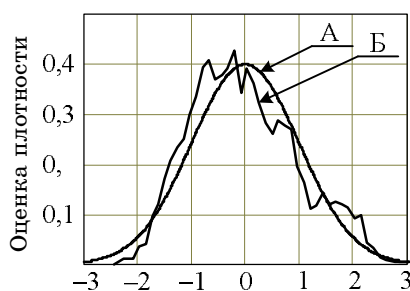
Статистические характеристики временного ряда градиента N

| Высотный слой, м | 2–10 | 10–20 | 20–40 | 40–80 | 80–140 | 140–200 |
|---|-------|-------|-------|-------|--------|---------|
| Среднее значение градиента N , N -ед./км | -401 | -102 | -57 | -7 | -56 | -74 |
| СКО градиента N , N -ед./км | 287 | 108 | 56 | 48 | 40 | 32 |
| Min градиента N , N -ед./км | -2690 | -1570 | -890 | -483 | -422 | -455 |
| Max градиента N , N -ед./км | 1200 | 420 | 265 | 209 | 115 | 130 |
| Амплитуда суточного хода градиента N , ед./км | 460 | 107 | 51 | 52 | 40 | 30 |

Таблица 3

Оценка вероятности возникновения сверхрефракции

| Интервал времени, ч | Высотный слой, м | | | | | |
|---------------------|------------------|-------|-------|-------|--------|---------|
| | 2–10 | 10–20 | 20–40 | 40–80 | 80–140 | 140–200 |
| 00–06 | 0,69 | 0,22 | 0,07 | 0,05 | 0,05 | 0,06 |
| 06–12 | 0,94 | 0,12 | 0,01 | 0,01 | 0,03 | 0,04 |
| 12–18 | 0,97 | 0,15 | 0,01 | 0 | 0,005 | 0,008 |
| 18–24 | 0,82 | 0,23 | 0,06 | 0,02 | 0,04 | 0,02 |

Приведённый индекс преломления N_n Рис. 3. Оценка плотности вероятностей N_n для высоты 200 м: А – плотность вероятностей нормального распределения $N(0, 1)$; Б – оценка плотности вероятностей N_n

На рис. 3 по двухмесячным данным приведена оценка плотности вероятностей приведённого индекса преломления $N_n = (N - m_n)/\sigma_n$, где m_n , σ_n – среднее значение и СКО N соответственно для высоты 200 м, где оценка лучше всего приближается к кривой нормального распределения.

4. Временные и спектральные характеристики индекса преломления и его высотного градиента

На рис. 4 приведены графики двухмесячной временной зависимости N и ей соответствующих амплитуд гармоник ряда Фурье без постоянной составляющей N_0 для высоты 10 м. Для остальных высот графики имеют подобный вид.

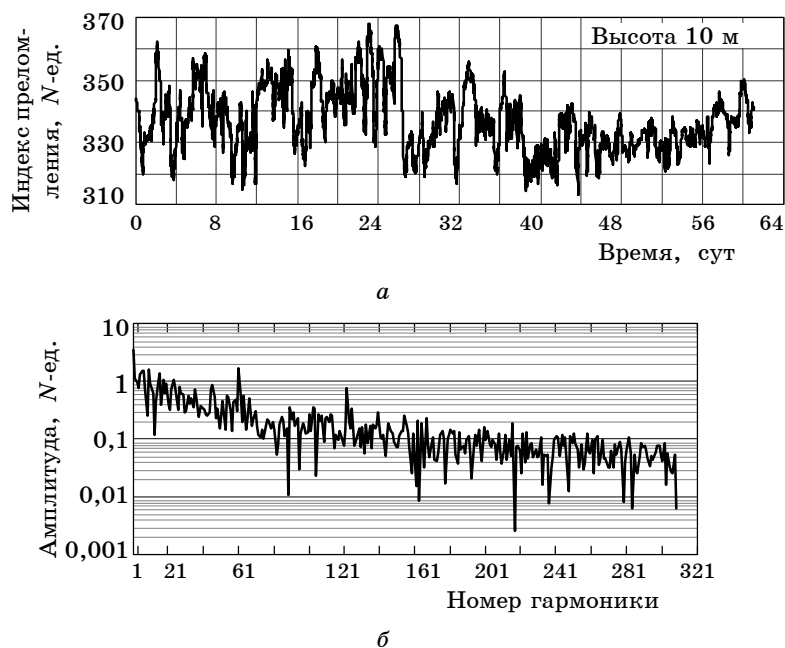


Рис. 4. Графики двухмесячного временного ряда индекса преломления (а) и соответствующих амплитуд гармоник ряда Фурье (б) (амплитуда нулевой гармоники $N_0 = 337$ N -единиц)

По амплитудам гармоник ряда Фурье на рис. 4, б заметны характерные суточные колебания N (61-я гармоника) и полусуточные колебания (122-я гармоника). Эти колебания наиболее сильно выражены в высотном слое 10–40 м.

На рис. 5 изображены графики временной зависимости высотного градиента N за два месяца и ей соответствующих амплитуд гармоник ряда Фурье без постоянной составляющей для высотного слоя 2–10 м. Уровень минус 0,157 N -единиц/м характеризует границу сверхрефракции (горизонтальная черта на рис. 5, а).

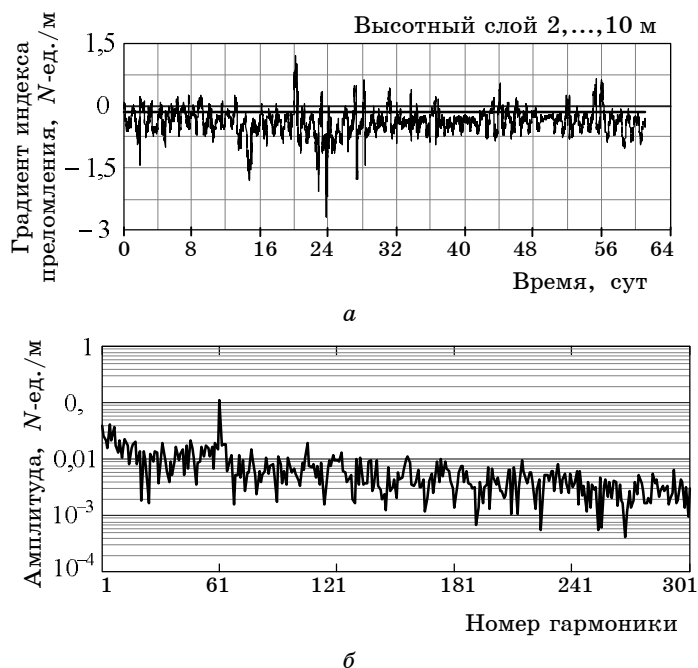


Рис. 5. Графики временного ряда высотного градиента индекса преломления (а) и соответствующих амплитуд гармоник ряда Фурье (б) (среднее значение градиента и амплитуда нулевой гармоники равны 0,4 N -ед./м)

Высотный градиент также имеет большую амплитуду суточного хода (61-я гармоника ряда Фурье на рис. 5, б) в приземном слое (2–10 м).

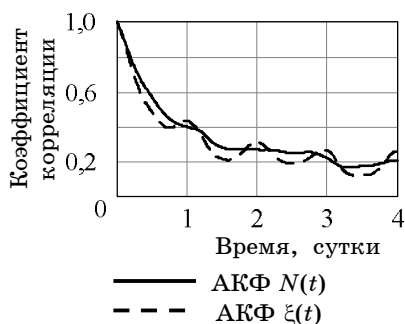


Рис. 6. АКФ индекса преломления для высоты 10 м

На рис. 6 показан график нормированной автокорреляционной функций (АКФ) индекса преломления для высоты 10 м (пунктирная линия). Видна периодическая составляющая, которая возникает за счет суточного хода N , наиболее выраженного на высоте 10 м (табл. 1).

Временная зависимость $N(t)$ — нестационарный случайный процесс. Его удобно представить приближенно в следующем виде [7]

$$N(t) = \sigma(t)\xi(t) + m(t), \quad (3)$$

где $m(t)$ и $\sigma(t)$ — суточные ходы среднего значения N и его СКО соответственно на данной высоте; $\xi(t)$ — реализация стационарного в широком смысле случайного процесса с нулевым математическим ожиданием и единичной дисперсией. Поэтому корреляционные функции целесообразно рассчитывать для процесса $\xi(t)$.

Зависимости $m(t)$ и $\sigma(t)$ — периодические с периодом в одни сутки, поэтому их можно разложить в ряд Фурье и ограничиться несколькими гармониками (чтобы сгладить быстрые флуктуации N). На рис. 7 показан результат аппроксимации $m(t)$ и $\sigma(t)$ для высоты 10 м, при этом среднеквадратическая погрешность аппроксимации составила 10% для $m(t)$ и 23% для $\sigma(t)$ (значения коэффициентов рядов Фурье даны в прил., табл. П1).

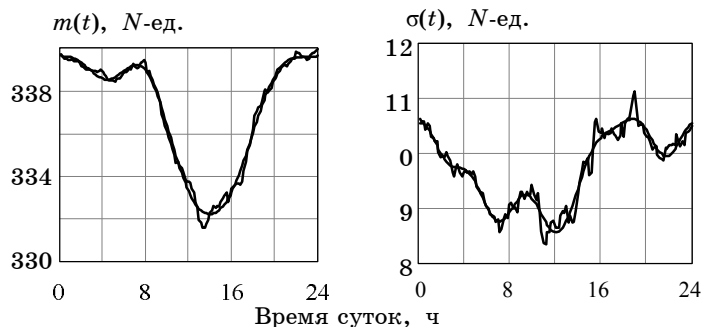


Рис. 7. Результат аппроксимации рядом Фурье функций $m(t)$ (5 слагаемых ряда) и $\sigma(t)$ (7 слагаемых ряда) для высоты 10 м

АКФ процесса $\xi(t)$ для высоты 10 м показана на рис. 6 сплошной линией, и суточных колебаний в ней практически нет.

Исследуя формы нормированных корреляционных функций для всех высот для процесса $\xi(t)$, можно предположить, что каждая из них хорошо аппроксимируется суммой двух экспонент

$$R(t) = a \cdot e^{-t/t_1} + (R(0) - a) \cdot e^{-t/t_2}, \quad (4)$$

где a , t_1 , t_2 — параметры аппроксимации. Параметры и результаты аппроксимации временных корреляционных функций, приведенные в приложении, подтверждают справедливость этого предположения. Видно (табл. П2), что интервал корреляции «узкой» экспоненты в среднем равен половине суток, а «широкой» экспоненты — 7 сут, причем для больших высот (140–200 м) доминирует «узкая» экспонента ($a > 0,8$).

5. Типичная форма случайной составляющей высотного профиля индекса преломления и его градиента

Для вектора \mathbf{n} , состоящего из семи отсчетов случайного высотного профиля индекса преломления, по всему массиву данных (матрица \mathbf{N} (1)) оценены значения элементов его ковариационной матрицы:

$$\mathbf{R}_{j,k} = \frac{1}{8784} \sum_{i=0}^{8783} (N_{i,j} - m_{i,j})(N_{i,k} - m_{i,k}),$$

где $j, k = 1, \dots, 7$ — высотные индексы; i — индекс времени.

Чтобы определить, каковы характерные вариации формы высотного профиля \mathbf{n} , для него было применено разложение Карунена–Лоэва [7, 8]

$$\mathbf{n} = \mathbf{m} + \sum_{j=1}^{\infty} q_j \mathbf{f}^{<j>}, \quad (5)$$

где $M\{q_j q_k\} = \begin{cases} \lambda_j, & j=k, \\ 0, & j \neq k, \end{cases}$ $(\mathbf{f}^{<j>}, \mathbf{f}^{<k>}) = \begin{cases} 1, & j=k, \\ 0, & j \neq k \end{cases}$ – скалярное произведение собственных

векторов матрицы \mathbf{R} ; \mathbf{m} – вектор отсчетов средних значений N [см. (3)].

Результаты показаны на рис. 8. Первое собственное число доминирует над остальными, а вид соответствующего собственного вектора указывает на то, что наиболее вероятными вариациями высотного профиля N являются его смещения без изменения формы.

Из рис. 8 следует, что случайные вариации профиля N можно достаточно точно описать с помощью всего двух собственных векторов (базисных функций), которым соответствуют собственные числа $\lambda_1 = 648 N\text{-ед.}^2$ и $\lambda_2 = 28 N\text{-ед.}^2$, поскольку сумма оставшихся собственных чисел $\lambda_3 + \dots + \lambda_7 = 7,4 N\text{-ед.}^2$ составляет 1% от суммы всех чисел.

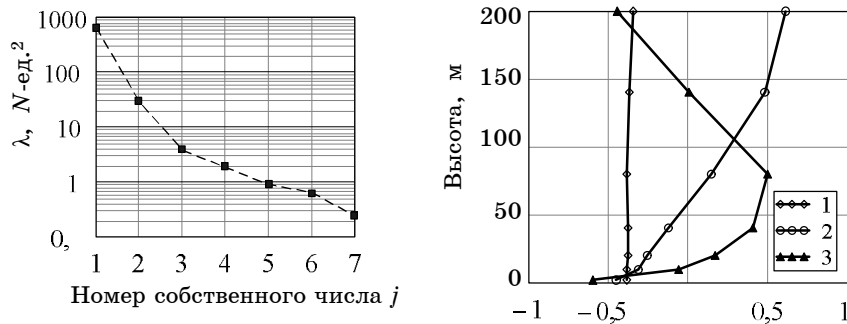


Рис. 8. Собственные числа и первые три собственных вектора ковариационной матрицы отсчетов высотного профиля N

Так как условия рефракции радиоволн определяются величиной высотного градиента индекса преломления, то по семи отсчетам высотного профиля индекса преломления вычислены шесть значений высотных градиентов N , а затем использовано разложение типа (5). Результаты оценки собственных чисел и векторов ковариационной матрицы градиента N приведены на рис. 9.

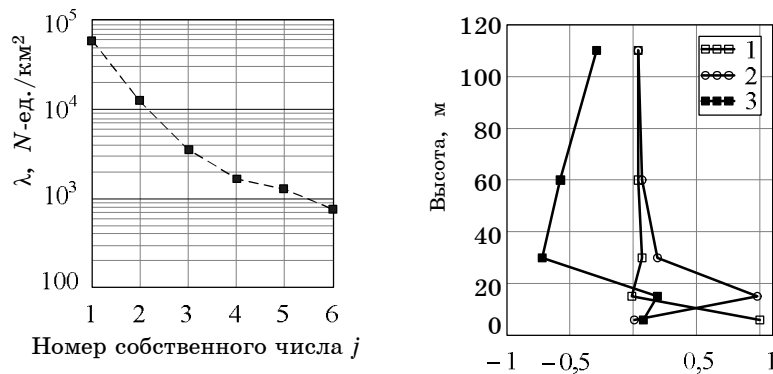


Рис. 9. Собственные числа и первые три собственных вектора ковариационной матрицы отсчетов высотного профиля градиента N

Из рис. 9 следует, что случайные вариации профиля градиента N можно достаточно точно описать с помощью трёх собственных векторов, которым соответствуют собственные числа $\lambda_1 = 60490 N\text{-ед.}/\text{км}^2$, $\lambda_2 = 12210 N\text{-ед.}/\text{км}^2$ и $\lambda_3 = 3554 N\text{-ед.}/\text{км}^2$, поскольку сумма оставшихся собственных чисел $\lambda_4 + \dots + \lambda_6 = 7239 N\text{-ед.}/\text{км}^2$ составляет 5% от суммы всех чисел. Примечательно, что первое слагаемое в (5) определяет величину градиента N преимущественно в слое (2–10 м), второе – в слое (10–20 м).

На рис. 10 приведён график АКФ для временных рядов коэффициентов разложения Карунена–Лоэва q_j по трем первым собственным векторам (см. рис. 8).

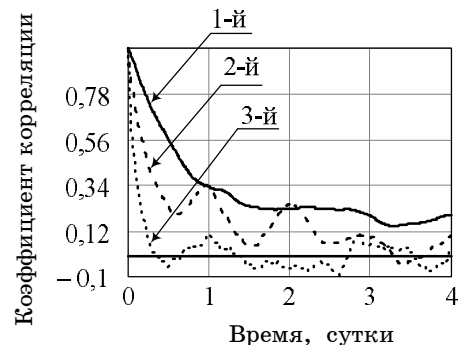


Рис. 10. АКФ для коэффициентов разложения Карунена–Лоэва

СКО коэффициентов q_j , $j = 1, 2, 3$, составило 25,4; 5,3 и 2 N -единицы соответственно, при нулевом математическом ожидании.

Как и следовало ожидать, из сравнения рис. 6 и рис. 11 видно, что АКФ процесса $\xi(t)$ практически совпадает с той, которая соответствует разложению $N(t)$ по первому собственному вектору.

6. Заключение

В данной работе представлены результаты статистической обработки поля индекса преломления в приземном 200-метровом слое атмосферы. Впервые построена экспериментально обоснованная статистическая модель высотного профиля индекса преломления $N(h)$ в приземном слое, использующая разложения Фурье и Карунена–Лоэва. Данная модель включает:

- аппроксимацию рядом Фурье суточного хода $N(h)$ (5 гармоник) и СКО $N(h)$ (7 гармоник) с относительной ошибкой 10 и 23% соответственно;
- представление случайных высотных вариаций $N(h)$ в виде случайной суммы двух детерминированных функций с относительной ошибкой 1%;
- представление случайных высотных вариаций градиента $N(h)$ в виде случайной суммы трёх детерминированных функций с относительной ошибкой 5%;
- модель временных корреляционных характеристик коэффициентов разложения Карунена–Лоэва.

Среднеквадратическая ошибка представления временной корреляционной функции в виде суммы двух экспонент (4) в интервале значений ее аргумента 0–4 сут составила 5–15% (точность уменьшается с ростом высоты, см. рис. П1 в прил.).

Обнаружено, что на суше в летнее время в приземном слое атмосферы возможны условия сверхрефракции, причем она наиболее вероятна в слое 2–10 м в дневное время суток. Отмечено, что в верхнем слое (40–200 м) сверхрефракция наиболее вероятна в вечернее и ночное время.

Авторы выражают признательность Нидерландскому метеорологическому институту (KNMI) и Международному исследовательскому центру по телекоммуникациям и радиолокации Дельфтского технического университета (IRCTR, TU Delft, Нидерланды) за предоставленные данные экспериментальных измерений и старшему научному сотруднику НИИ РТС ТУСУР М.Е. Ровкину – инициатору данной работы.

Работа проводилась при финансовой поддержке Федерального агентства по науке и инновациям, госконтракт № 02.740.11.0232.

Приложение

Значения параметров и результаты аппроксимации временных функций

Таблица П1

Значения первых коэффициентов c_k и s_k рядов Фурье для математического ожидания

$$m(t) = c_0 + 2 \sum_{k=1}^{\infty} [\operatorname{Re}(c_k) \cos(\pi k t / 12) - \operatorname{Im}(c_k) \sin(\pi k t / 12)] \text{ и СКО индекса преломления}$$

$$\sigma(t) = s_0 + 2 \sum_{k=1}^{\infty} [\operatorname{Re}(s_k) \cos(\pi k t / 12) - \operatorname{Im}(s_k) \sin(\pi k t / 12)], \text{ где } t - \text{ время суток, ч}$$

| | | $c_k, N\text{-ед.}$ | | | | | | |
|------------|---|---------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|----------------------------|-----------------------------|------------------------------|
| | | Высота, м | | | | | | |
| | | 2 | 10 | 20 | 40 | 80 | 140 | 200 |
| Индекс k | 0 | 340 | 337 | 336 | 335 | 335 | 331 | 327 |
| | 1 | 0,69–i0,46 | 1,52–i0,74 | 1,41–i0,83 | 1,28–i0,86 | 0,88–i0,90 | 0,6–i0,69 | 0,36–i0,54 |
| | 2 | –0,27+i0,76 | –0,32+i0,71 | –0,27+i0,71 | –0,21+i0,68 | –0,12+i0,72 | –0,03+i0,59 | 0,06+i0,56 |
| | 3 | 0,16–i0,09 | 0,12–i0,07 | 0,15–i0,09 | 0,17–i0,08 | 0,19–i0,13 | 0,08–i0,16 | $2,95 \cdot 10^{-3} - i0,15$ |
| | 4 | –0,02–i0,11 | –0,03–i0,12 | –0,04–i0,12 | –0,06–i0,11 | –0,14–i0,11 | –0,17–i0,03 | –0,15+i0,02 |
| | | $s_k, N\text{-ед.}$ | | | | | | |
| | | Высота, м | | | | | | |
| | | 2 | 10 | 20 | 40 | 80 | 140 | 200 |
| Индекс k | 0 | 10 | 10 | 9,5 | 9,5 | 10 | 9,5 | 9,5 |
| | 1 | 0,33+ i0,32 | 0,30+ i0,30 | 0,29+ i0,33 | 0,23+ i0,37 | 0,20+ i0,45 | 0,18+ i0,31 | 0,17+ i0,1 |
| | 2 | –0,14–i0,07 | –0,07–i0,07 | –0,07–i0,08 | –0,07–i0,01 | $-2 \cdot 10^{-4} + i0,01$ | –0,03–i0,03 | –0,06–i0,05 |
| | 3 | 0,09–i0,13 | 0,10–i0,10 | 0,10–i0,12 | 0,09–i0,11 | 0,06–i0,17 | 0,06–i0,11 | 0,02–i0,07 |
| | 4 | 0,03+ i0,02 | –0,02+i0,03 | $0,01+ i3,56 \cdot 10^{-3}$ | –0,01+i0,01 | –0,03+i0,02 | 0,02+i0,03 | $7,54 \cdot 10^{-3} + i0,03$ |
| | 5 | 0,07–i0,05 | $0,1+ i4,39 \cdot 10^{-3}$ | 0,11–i0,03 | $0,11- i1,2 \cdot 10^{-4}$ | 0,13+ i0,02 | 0,14+ i0,04 | 0,12+ i0,07 |
| | 6 | –0,04–i0,04 | $0,02- i3,84 \cdot 10^{-3}$ | $0,02- i3,83 \cdot 10^{-3}$ | $0,02- i4,26 \cdot 10^{-3}$ | 0,05–i0,02 | $0,04+ i4,56 \cdot 10^{-3}$ | 0,03+ i0,05 |

Коэффициенты аппроксимации (4) приведены в табл. П2 в виде трёх матриц A , T_1 , T_2 , а также там отображена высотная ковариационная матрица r отсчетов поля $\xi(h,t)$. Левому верхнему элементу матриц соответствует сочетание высот 200; 200 м, правому нижнему – 2; 2 м, остальным элементам – в порядке убывания высот.

Таблица П2

Матрицы параметров аппроксимации нормированных ковариационных функций индекса преломления (все матрицы симметрические)

| Матрица A параметра a | | | | | | | Матрица T_1 параметра t_1 , с | | | | | | |
|-----------------------------------|------|------|-------|------|------|------|-----------------------------------|------|------|------|------|------|------|
| 0,87 | 0,81 | 0,70 | 0,63 | 0,63 | 0,58 | 0,55 | 0,44 | 0,42 | 0,47 | 0,37 | 0,47 | 0,35 | 0,55 |
| | 0,84 | 0,73 | 0,615 | 0,67 | 0,61 | 0,55 | | 0,47 | 0,40 | 0,46 | 0,56 | 0,52 | 0,39 |
| | | 0,77 | 0,68 | 0,63 | 0,61 | 0,53 | | | 0,53 | 0,52 | 0,42 | 0,44 | 0,43 |
| | | | 0,67 | 0,66 | 0,64 | 0,65 | | | | 0,51 | 0,53 | 0,59 | 0,70 |
| | | | | 0,64 | 0,57 | 0,44 | | | | | 0,47 | 0,44 | 0,34 |
| | | | | | 0,63 | 0,55 | | | | | | 0,43 | 0,52 |
| | | | | | | 0,58 | | | | | | | 0,55 |
| Матрица T_2 параметра t_2 , с | | | | | | | Ковариационная матрица r | | | | | | |
| 6 | 8 | 6 | 9 | 9 | 9 | 10 | 1 | 0,98 | 0,94 | 0,90 | 0,88 | 0,87 | 0,83 |
| | 9 | 7 | 5 | 9 | 10 | 9 | | 1 | 0,97 | 0,93 | 0,91 | 0,90 | 0,87 |
| | | 9 | 8 | 6 | 7 | 6 | | | 1 | 0,98 | 0,97 | 0,96 | 0,93 |
| | | | 7 | 6 | 7 | 10 | | | | 1 | 0,99 | 0,99 | 0,96 |
| | | | | 6 | 5 | 4 | | | | | 1 | 0,99 | 0,98 |
| | | | | | 5 | 5 | | | | | | 1 | 0,98 |
| | | | | | | 5 | | | | | | | 1 |

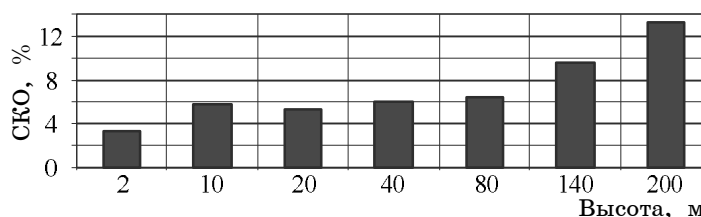


Рис. П1. Зависимость СКО аппроксимации временных АКФ от высоты

На рис. П1 приведен график относительной среднеквадратической ошибки аппроксимации автоковариационных функций в зависимости от высоты.

Литература

1. Казаков Л.Я. Неоднородности коэффициента преломления воздуха в тропосфере. / Л.Я. Казаков, А.Н. Ломакин // Распространение радиоволн. – М.: Наука, 1975. – 368 с.
2. Бин Б.Р. Радиометеорология / Б.Р. Бин, Е.Д. Даттон. – Л.: Гидрометеиздат, 1971. – 362 с.
3. Радиоклиматический тропосферный атлас Тихого океана / Г.С. Шарыгин. – Томск: Том. гос. ун-т систем управления и радиоэлектроники, 2000. – 171 с.
4. Рукина А.Н. Одновременное исследование метеорологических условий рефракции радиоволн в пунктах, разнесенных на 100 км // Радиотехника и электроника. – 1980. – Т. 25, № 2. – С. 407–409.
5. Lane J.A. Measurements with a spaced-cavity microwave refractometer // Атмосферная турбулентность и распространение радиоволн: труды междунар. коллоквиума. – М.: Наука, 1967. – С. 201–204.
6. Bull G. Spectra of radio refractive index // Атмосферная турбулентность и распространение радиоволн: труды междунар. коллоквиума. – М.: Наука, 1967. – С. 206–213.
7. Тихонов В.И. Статистическая радиотехника. – М.: Радио и связь, 1982. – 624 с.
8. Пространственно-временная изменчивость пространственных спектров высотных профилей индекса преломления / Ю.П. Акулиничев, М.Е. Ровкин, Л.В. Павлова, И.Н. Ваулин // Труды XX Всерос. науч. конф. «Распространение радиоволн». 2–4 июля 2002 г. – Н. Новгород: Талам, 2002. – С. 182–183.

Новиков Анатолий Викторович

М. н. с. Научно-исследовательского института радиотехнических систем ТУСУРа

Тел.: (382-2) 41-36-70

Эл. почта: anovikov@ms.tusur.ru

Акулиничев Юрий Павлович

Профессор каф. радиотехнических систем ТУСУРа

Тел.: (382-2) 41-36-70

Эл. почта: ayp@rts.rk.tusur.ru

Novikov A.V., Akulinichev Yu.P.

Space-time model of refractive index applied to the surface atmospheric layer

Statistical model for refractive index space-time field is built on the basis of bimonthly measurements at seven height levels in atmospheric layer of 2–200 m above the ground. It includes the Fourier-series expansion for random temporary variations and the Karhunen-Loeve expansion for height variations. Two-scale approximation for time correlation functions is used both for the refractive index and its height gradient and numerical values of the approximation coefficients are given. It is found that random part of the refractive index height profile can be represented as a sum of two determined functions with random weights. As for height gradient, especially in the lower layer of 2–20 m, for good approximation three summands must be used.

Keywords: atmospheric refraction, refractive index, height profile, radio propagation, evaporation duct.
