

АНАЛИЗ ВЫСОТНОГО ПРОФИЛЯ КОЭФФИЦИЕНТА ПРЕЛОМЛЕНИЯ АТМОСФЕРЫ НАД ЧЕРНЫМ МОРЕМ

В. А. Кабанов

*Институт радиофизики и электроники им. А. Я. Усикова НАН Украины
12, ул. Ак. Проскуры, Харьков, 61085, Украина
E-mail: kabanov@ire.kharkov.ua*

Представлены данные о вертикальных градиентах коэффициента преломления в различных по высоте и толщине слоях атмосферы по результатам рефрактометрических измерений над Черным морем. Показана слабая взаимосвязь градиентов на различных участках высотного профиля $N(h)$ для конкретных высотных распределений. Ил. 6. Табл. 1. Библиогр.: 4 назв.

Ключевые слова: коэффициент преломления, индекс рефракции, градиент.

С 1973 по 1983 г. проводились исследования пограничного слоя атмосферы над Черным морем с помощью оригинальных рефрактометров и методик измерений, в том числе с помощью вертолета [1] и привязного шара-зонда [2]. Измерения охватывали разные сезоны и погодные условия.

Обычно рефрактометрические измерения являлись частью программы комплексных исследований и выполнялись одновременно с измерением функции ослабления или высотных (дистанционных) зависимостей поля радиосигнала на одной или нескольких трассах с целью изучения различных механизмов распространения. Однако данные этих измерений могут иметь и самостоятельное значение.

В работе [3] были приведены сведения о приводных волноводах, а в работе [4] – о тропосферных слоях. В настоящей статье представлены данные о вертикальных градиентах коэффициента преломления в различных по высоте и толщине

слоях атмосферы в 1,5-км диапазоне высот над морской поверхностью.

Для анализа высотных зависимостей коэффициента преломления весь диапазон высот был условно разбит на несколько участков, в каждом из которых определялся средний градиент индекса рефракции $g_N = \Delta N/\Delta h$ и другие параметры. Индекс рефракции $N = (n - 1)10^6$, где n – коэффициент преломления атмосферы.

Представление о градиентах индекса рефракции на разных участках высотного профиля $N(h)$ дает таблица. Она составлена по результатам измерений 1976 г., когда наиболее полно были представлены все сезоны, а измерения проводились только с помощью вертолета, начиная с высоты 2 м над уровнем моря.

Таблица показывает диапазон наблюдавшихся в отдельных опытах значений g_N , стандартное отклонение σ_{g_N} и усредненные за год значения \bar{g}_N для различных высотных интервалов.

Градиенты индекса рефракции g_N и стандартное отклонение σ_{g_N} для различных высотных интервалов

| Диапазон высот, м | 2...100 | 100... 00 | 500...1000 | 1000...1500 | 2...500 | 2...1000 | 2...1500 |
|---------------------------------|---------|-----------|------------|-------------|---------|----------|----------|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
| $(-g_N)_{\min}, N\text{-ед./м}$ | -0,01 | -0,006 | +0,011 | +0,019 | -0,011 | -0,023 | -0,022 |
| $(-g_N)_{\max}, N\text{-ед./м}$ | -0,25 | -0,155 | -0,081 | -0,084 | -0,134 | -0,072 | -0,056 |
| $\sigma_{g_N}, N\text{-ед./м}$ | 0,039 | 0,038 | 0,019 | 0,02 | 0,031 | 0,013 | 0,009 |
| $\bar{g}_N, N\text{-ед./м}$ | -0,053 | -0,052 | -0,035 | -0,028 | -0,052 | -0,044 | -0,038 |

С удалением слоя атмосферы от поверхности воды рефракционные эффекты уменьшаются (2–5 колонки таблицы). Снижается усредненный за период измерений средний градиент в слое \bar{g}_N , уменьшается диапазон возможных градиентов и стандартное отклонение σ_{g_N} . Но уже для интервалов высот 500...1000 и 1000...1500 м параметры, характеризующие изменчивость градиентов в отдельных опытах, практически одинаковы. Средний

градиент уменьшается и с увеличением толщины слоя над поверхностью воды (2, 6–8 колонки таблицы). Однако в этом случае сильнее других параметров уменьшается стандартное отклонение. Так, для всего исследуемого диапазона высот 2...1500 м оно равно 0,009 $N\text{-ед./м}$, что в два раза меньше минимального значения для отдельного слоя.

Это свидетельствует о том, что изменения g_N на разных участках высотного профи-

ля $N(h)$ отличаются от опыта к опыту не только по величине, но и по знаку.

Такое различие значений g_N на разных участках высотного профиля можно наблюдать и при усреднении данных по месяцам (графики на рис. 1, а-г и 2, а-г). На графиках также указан коэффициент корреляции усредненных g_N со среднемесячными значениями N_0 , приведенными на рис. 1, д и 2, д.

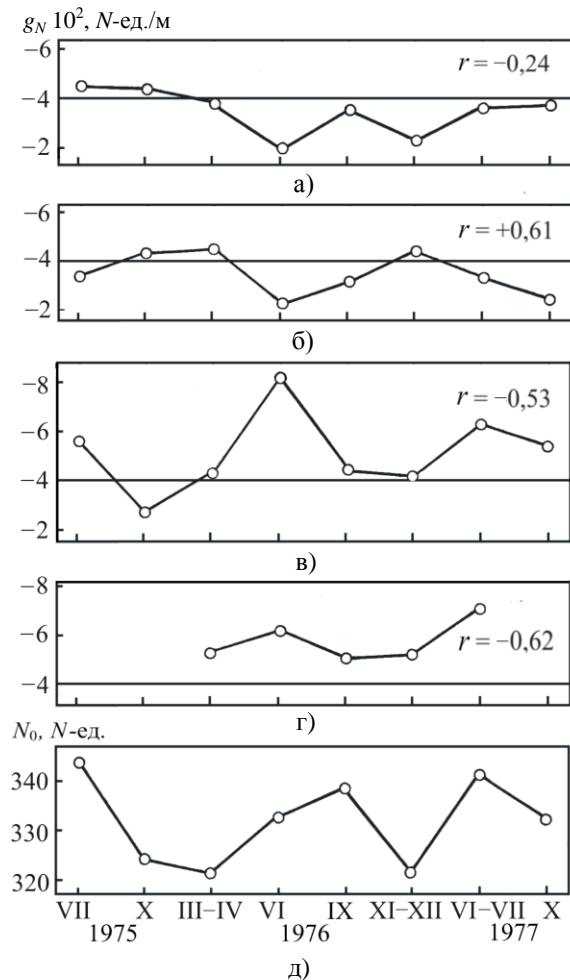


Рис. 1. Среднемесячные значения g_N в различных по высоте слоях атмосферы и N_0 : а) – 1000...1500 м; б) – 500...1000 м; в) – 100...500 м; г) – 2...100 м; д) – N_0

На рис. 1 хорошо видны различия в сезонных изменениях градиента индекса рефракции на разных участках высотного профиля, а для интервалов высот 100...500 и 500...1000 м они противоположны. Это приводит к тому, что при увеличении толщины слоя вариации среднего в слое g_N уменьшаются, в результате чего сезонные изменения g_N (или N -дефицита) для всего 1,5-км слоя атмосферы практически отсутствуют (рис. 2, а).

Таким образом, как вариации конкретных высотных распределений N , так и их сезонные изменения в основном связаны с перераспреде-

нием N внутри 1,5-км слоя атмосферы при мало меняющемся N -дефиците для всего слоя. При этом изменения g_N в разных по высоте или сильно отличающихся по толщине слоях атмосферы оказываются слабокоррелированными. Так, например, коэффициент корреляции между g_N в слоях 2...100 и 2...1500 м, рассчитанный по результатам 60 измерений, оказался меньше 0,1.

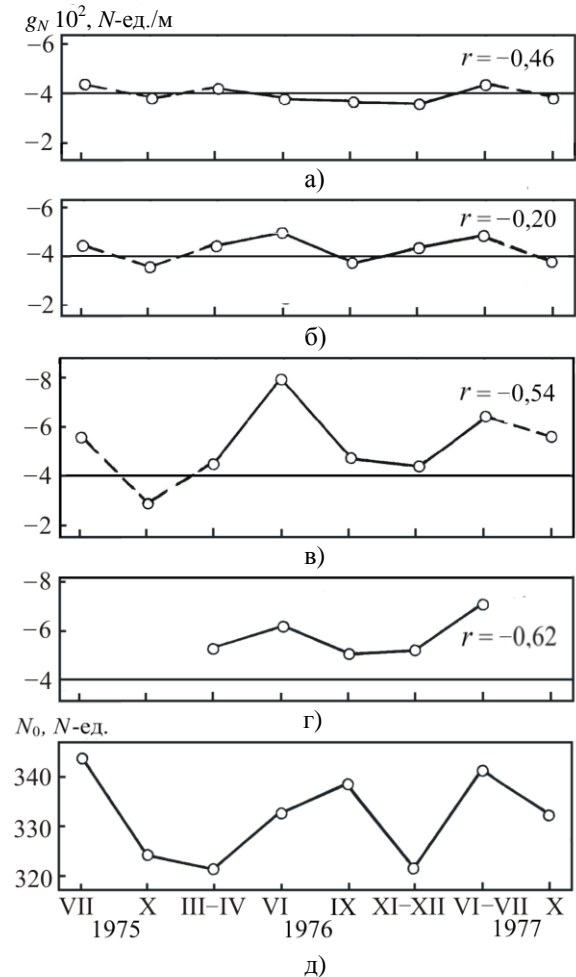


Рис. 2. Среднемесячные значения g_N в различных по толщине слоях атмосферы и N_0 : а) – 2...1500 м; б) – 2...1000 м; в) – 2...500 м; г) – 2...100 м; д) – N_0

Аналогичная картина наблюдается и внутри 100-м слоя, иллюстрацией этого является график на рис. 3, который построен по результатам рефрактометрических измерений над морем с помощью воздушного привязного шара. По оси ординат отложены значения коэффициента корреляции между g_N в слое 2,5...10 м и в более толстых слоях с той же нижней границей. Значения верхней границы указаны на оси абсцисс, а черными кружками обозначены расчетные значения. С повышением верхней границы слоя коэффициент корреляции быстро падает и для слоя 2,5...100 м составляет 0,33.

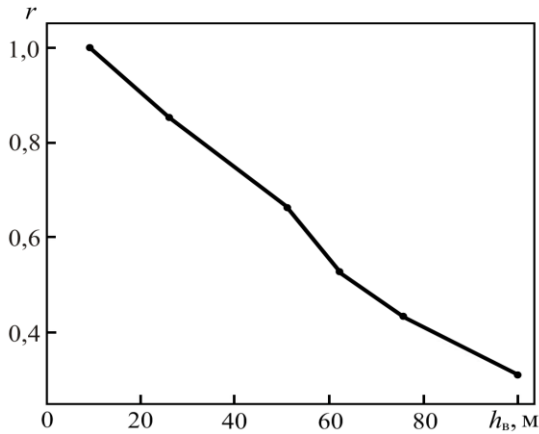


Рис. 3. Корреляция градиента g_N в слое 2,5...10 м и в более толстых слоях

Необходимо отметить, что для оценки средней рефракции часто используют сведения о распределении $N(h)$ в диапазоне высот, доступном для измерений, распространяя эти данные на более обширный или соседний слой атмосферы. Приведенные примеры показывают неправомерность такой экстраполяции. Так, измерения в 100-м слое малопригодны для оценки средней радиорефракции во всем 1,5-км слое. Соответственно, и N -дефицит, измеренный для всего 1,5-км слоя, не позволяет судить о рефракционных свойствах 100-м слоя.

Несмотря на большое разнообразие конкретных зависимостей $N(h)$, будучи усредненными, за большие периоды времени, они немногим отличаются от стандартных. На рис. 4 приведены среднемесячные высотные распределения для различных сезонов, а на рис. 5 – профиль $N(h)$, усредненный за 3-летний период измерений. Штриховые линии на рисунках соответствуют стандартной рефракции, а штрихпунктирная линия на рис. 5 – стандартной экспоненциальной атмосфере.

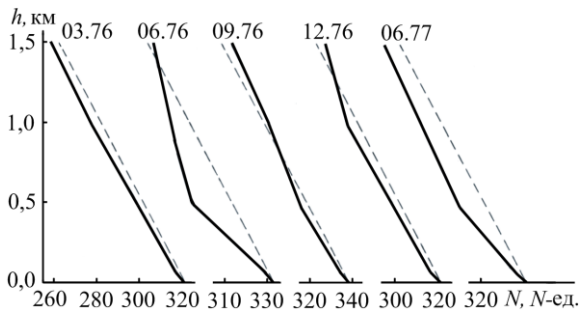


Рис. 4. Усредненные по сезонам высотные распределения $N(h)$

Для среднемесячных профилей наиболее сильные отличия от стандартного наблюдаются летом, что связано с большим количеством слоистых образований и их преимущественно низким

расположением в это время. Однако и летом средний N -дефицит для всего 1,5-км диапазона высот оставался почти неизменным и близким к стандартному.

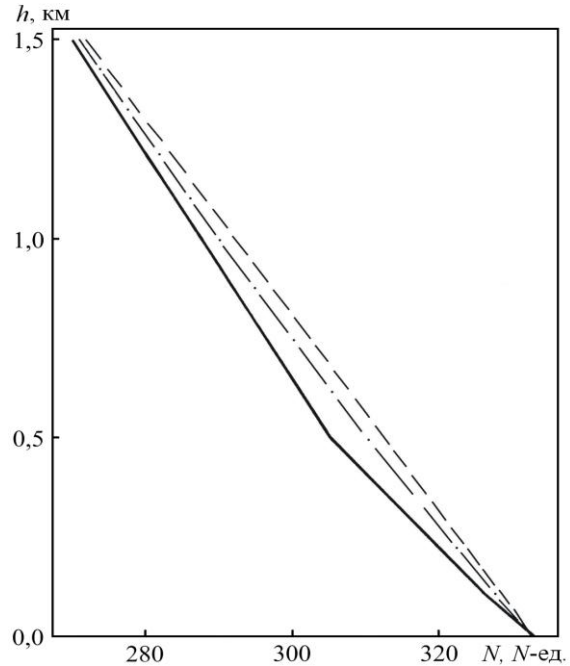


Рис. 5. Профиль $N(h)$, усредненный за 3-летний период измерений

Усредненный за весь период измерений высотный профиль коэффициента преломления хорошо согласуется с моделью стандартной экспоненциальной атмосферы, но имеет более высокое начальное значение индекса рефракции $N = 332 \exp(-0,136h)$.

На рис. 6 представлен более подробный график для 100-м слоя, построенный по результатам измерений с воздушным шаром.

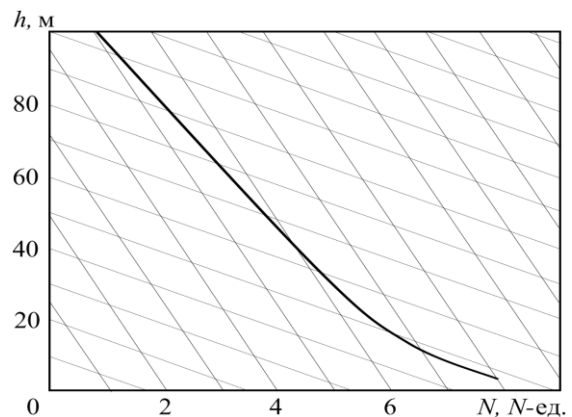


Рис. 6. Усредненный профиль $N(h)$ в слое 100 м над морем

Усредненный по всем 40 реализациям, профиль $N(h)$ имеет гладкий вид с градиентом не-

сколько выше стандартного и характерным уплотнением вблизи поверхности воды. Два семейства параллельных прямых на графике соответствуют стандартной и критической рефракциям.

На основании экспериментальных данных, представленных в этой работе, а также в работах [3, 4], можно сформировать общее представление о вертикальной структуре коэффициента преломления атмосферы в 1,5-км слое над морем и сформулировать следующие выводы.

Единичные профили $N(h)$ характеризуются большим разнообразием и могут сильно отличаться от усредненных высотных распределений и от стандартной атмосферы, особенно при наличии тропосферных слоев.

Разность значений N у морской поверхности и на высоте 1,5 км (ΔN или N -дефицит) сравнительно мало меняется от опыта к опыту (среднеквадратичное отклонение $\Delta N = 13,5 N$ -ед., при среднем значении $\Delta N = 60 N$ -ед.) и практически не зависит от времени года и наличия тропосферных слоев.

Изменения профиля $N(h)$ на разных высотах коррелированы слабо, что не позволяет непосредственно распространить данные об известном участке профиля на соседний участок или предсказать поведение профиля в более обширном слое.

На основании данных работы [4] тропосферные слои большой протяженности с вертикальным градиентом N (в пределах слоя) выше критического чаще всего наблюдаются летом (около 70 % опытов) и осенью (50 %). При этом летом они располагаются ближе к поверхности воды. В пределах первых 1,5 км над морской поверхностью одновременно может существовать один, изредка два устойчивых слоя.

Согласно выводам работы [3] можно отметить, что для морских условий характерно наличие инверсий в тонком приводном слое (волноводы испарения), однако их интенсивность в исследуемом районе невелика. В большинстве случаев высота инверсии не превышает 5 м, а значение $\Delta M - 2 M$ -ед.

Усредненный за весь период измерений высотный профиль коэффициента преломления хорошо согласуется с моделью стандартной экс-

поненциальной атмосферы, но имеет более высокое начальное значение индекса рефракции $N = 332 \exp(-0,136h)$.

1. Кабанов В. А., Тургенев И. С. Рефрактометрические измерения с помощью вертолета // Радиотехника. Харьков. ун-т. – 1980. – Вып. 52. – С. 94–97.
2. Кабанов В. А., Майков Г. Г., Синицкий В. Б., Хоменко С. И. Диагностика рефракционных свойств приводного слоя атмосферы – контактным и неконтактным методами // Радиофизические методы и средства для исследований окружающей среды в миллиметровом диапазоне. – Киев: Наук. думка, 1988. – С. 101–108.
3. Дорфман Н. А., Кабанов В. А., Кивва Ф. В., Тургенев И. С. Статистические характеристики показателя преломления в приводном слое атмосферы // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана. – 1978. – 14, № 5. – С. 549–552.
4. Кабанов В. А. Параметры слоистых метеообразований над Черным морем // Радиофизика и электроника. – Харьков: Ин-т радиофизики и электрон. НАН Украины. – 2009. – 14, № 1. – С. 43–46.

THE ANALYSIS OF A HIGH-ALTITUDE STRUCTURE OF ATMOSPHERE REFRACTION FACTOR ABOVE THE BLACK SEA

V. A. Kabanov

The data on vertical gradients of factor of refraction in different in height and thickness atmosphere layers by results of refractometric measurements above the Black Sea are submitted. The weak interrelation of gradients on various sites of a high-altitude structure $N(h)$ for concrete high-altitude distributions is shown.

Key words: refraction factor, refraction index, gradient.

АНАЛІЗ ВИСОТНОГО ПРОФІЛЮ КОЕФІЦІЄНТА ЗАЛОМЛЕННЯ АТМОСФЕРИ НАД ЧОРНИМ МОРЕМ

В. О. Кабанов

Репрезентовано дані про вертикальні градієнти коефіцієнта заломлення в різних за висотою й товщиною шарах атмосфери за результатами рефрактометричних вимірювань над Чорним морем. Показано слабкий взаємозв'язок градієнтів на різних ділянках висотного профілю $N(h)$ для конкретних висотних розподілів.

Ключові слова: коефіцієнт заломлення, індекс рефракції, градієнт.

Рукопись поступила 12 декабря 2008 г.