

ПАРАМЕТРЫ ВЕРТИКАЛЬНОГО ПРОФИЛЯ ИНДЕКСА ПРЕЛОМЛЕНИЯ ТРОПОСФЕРЫ НАД СЕВЕРНОЙ ЧАСТЬЮ АТЛАНТИЧЕСКОГО ОКЕАНА

Работа выполнена при поддержке ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 гг. (ГК № 8345).

Представлены параметры экспоненциальной и биекспоненциальной зависимостей среднего вертикального профиля индекса преломления воздуха в тропосфере. Расчеты выполнены по 64 станциям, расположенным на побережье Европы, Америки, на островах и кораблях погоды в открытой части океана. Выполнена оценка точности восстановления профиля N . С использованием программы «Surfer» построены изолинии радиоклиматических параметров и проведен анализ их распределения в пространстве и во времени. Результаты актуальны для учета рефракции в тропосфере.

Ключевые слова: коэффициент преломления воздуха; рефракция радиоволн; ультракороткие волны; Атлантический океан.

Применение ультракоротких радиоволн (УКВ) весьма разнообразно и сводится в основном к осуществлению радиосвязи с использованием радиовещательных станций, в авиационных радионавигационных системах, морских и авиационных радиомаяках аварийно-спасательных служб, на станциях спутниковой связи.

Особенностью волн УКВ-диапазона является тот факт, что на их распространение оказывают влияние метеорологические условия. Определяющим фактором влияния атмосферы на распространение УКВ является распределение коэффициента преломления воздуха во времени и в пространстве.

Одним из главных проявлений влияния среды на распространение излучения является преломление электромагнитных волн в атмосфере, или рефракция: траектории волн искривляются, источник излучения виден по иному направлению, чем то, по которому он был бы виден в случае отсутствия атмосферы. Возникает понятие видимого угла места источника в отличие от истинного, не искаженного влиянием атмосферы. Разность видимого и истинного углов места источника излучения характеризует угол рефракции. Вследствие искривления траектории увеличивается также геометрическое расстояние, которое луч проходит между точками излучения и приема.

Рефракцию электромагнитных волн как искажающий фактор необходимо учитывать при решении широкого круга задач связи, локации, геодезии, навигации, астрономии и в других приложениях. В последние десятилетия данные измерений рефракции используются также для решения обратных задач, связанных с определением высотных профилей коэффициента преломления, температуры, давления и влажности воздуха.

Неоднородная и изменчивая структура атмосферы ограничивает возможности и точность радиотехнических систем. Для планирования работы систем радиосвязи необходимо иметь сведения о специфических радиометеорологических характеристиках атмосферы, как климатических, так и мгновенных.

Актуальность работы. Радиометеорологическое моделирование тропосферы крупных регионов является одной из важных задач, стоящих перед Международным союзом электросвязи [1]. Моделирование подразумевает, в том числе, получение среднего вертикального профиля коэффициента преломления в тропосфере. На основе этих данных рассчитывается рефракция в тропосфере. Наиболее фундаментальной работой

является радиоклиматический атлас [2], опубликованный в 1966 г. Однако он построен по ограниченному в пространстве и во времени набору метеорологических данных. При получении среднего вертикального профиля коэффициента преломления использованы данные за 5 лет, общее количество точек наблюдений составило 112 по всему земному шару, включая сухопутные и морские станции аэрологических наблюдений. Наибольшее количество станций использовано для территории США. Для рассматриваемой территории использовано около 30 станций. Более современной работой, отражающей результаты исследований над океанами, является Радиоклиматический тропосферный атлас Тихого океана [3].

Актуальность данной работы – дальнейшее исследование и уточнение радиоклиматического режима океанов, которые в силу ограниченности наблюдений исследованы недостаточно, в частности акватории Атлантического океана.

В работе выполнены расчет и анализ среднего вертикального профиля индекса преломления N в тропосфере над северной частью Атлантического океана. Расчеты выполнены по 64 станциям, расположенным на побережье Европы, Америки, на островах и кораблях погоды в открытой части океана. В расчетах использованы климатические характеристики за период 1957–1967 гг. Таким образом, существенно увеличено количество пунктов наблюдений и период, за который данные были обобщены.

Были решены следующие задачи: получены параметры экспоненциальной и биекспоненциальной моделей среднего вертикального профиля коэффициента преломления над северной частью Атлантического океана; выполнена оценка восстановления среднего профиля N с учетом коэффициента детерминации; проведено картирование полученных данных с использованием программы «Surfer».

Основные теоретические положения. В радиометеорологии основной характеристикой, определяющей особенности распространения ультракоротких волн, является коэффициент преломления воздуха n . Коэффициент преломления отличается от единицы на десятитысячные доли. Поэтому на практике используют индекс преломления N . Соотношение между N и n имеет вид

$$N = (n - 1)10^6. \quad (1)$$

Коэффициент преломления зависит от температуры, давления и влажности воздуха. Известно, что верти-

кальные градиенты метеовеличин в среднем значительно превосходят горизонтальные. Поэтому в теории рефракции наибольшее распространение получила сферически-слоистая модель атмосферы.

Наиболее широко используется метод определения показателя преломления путем измерения температуры, давления и влажности воздуха с последующим расчетом N . Наиболее распространенная зависимость N от метеовеличин [4]:

$$N = \frac{77,6}{T} \left(P + \frac{4810e}{T} \right), \quad (2)$$

где P – атмосферное давление, гПа; T – температура, К; e – парциальное давление водяного пара, гПа.

Основное влияние на рефракцию УКВ в тропосфере оказывает вертикальное распределение N . Для оценки регулярной рефракции необходимо иметь многолетние сведения о профиле N [5].

В инженерных расчетах обычно используются три вида зависимости среднего вертикального профиля N : линейная, экспоненциальная, биэкспоненциальная. Двухпараметрическая линейная модель неплохо отражает средний профиль N в нижней тропосфере (до 1–1,5 км) [6]. Экспоненциальная модель нашла широкое распространение в теоретических исследованиях и инженерных расчетах [7–9]. Получено, что экспоненциальная модель хорошо согласуется с реальным средним профилем N до высоты 3 км.

Экспоненциальная модель имеет вид

$$N_z = NO_3 \exp \left(-\frac{H}{H_3} \right). \quad (3)$$

Здесь NO_3 (N -ед), H_3 (км) – параметры экспоненты: значение индекса преломления на нулевой высоте и масштаб высоты; H (км) – текущая высота. Масштаб высоты определяет высоту, на которой N уменьшается в e раз.

Биэкспоненциальная модель дает лучшие результаты для большего диапазона высот. Биэкспоненциальная модель используется для определения расстояний с помощью радиодальномеров [10], в аэрологических измерениях [11] для введения поправок на высоту из-за рефракции.

Биэкспоненциальная модель основана на разделении индекса преломления (2) на две компоненты – сухую и влажную – и применения к каждой компоненте экспоненциального закона уменьшения ее с высотой:

$$N_{вз} = NO_c \exp \left(-\frac{H}{H_c} \right) + NO_v \exp \left(-\frac{H}{H_v} \right), \quad (4)$$

где NO_c , NO_v (N -ед), H_c , H_v (км) – параметры биэкспоненты; H (км) – текущая высота.

Ранее было получено, что для Тихого океана [3] биэкспоненциальная модель лучше отражает вертикальный профиль $N(H)$ в районах с жарким и теплым климатом. Сюда относятся экваториальная, субэкваториальная, тропическая и субтропическая зоны обоих полушарий, где велик вклад влажной компоненты, поэтому в указанных зонах имеют место значительные вариации параметров влажной компоненты.

Граница применимости моделей изменяется в зависимости от сезона. В холодное время года в северном полушарии она смещена к югу (30° с.ш. на западе и

45° с.ш. на востоке), а летом располагается на 50–60° с.ш. В южном полушарии граница ориентирована по широте и расположена на параллелях от 40° ю.ш. в августе до 50–55° ю.ш. в феврале [3].

Особенности вычислений и результаты. Оценка погрешностей восстановления вертикального профиля $N(H)$ в тропосфере над Мировым океаном показала целесообразность использования экспоненциальной и биэкспоненциальной моделей. В работе выполнен расчет параметров этих зависимостей (формулы 3, 4) для всей толщи тропосферы. В качестве исходных материалов использованы статистически надежные аэроклиматические данные по открытой части океана, а также данные прибрежных и островных станций. Для выполнения расчетов использовались Материалы по климату атмосферы над зарубежными странами северного полушария [12–16], по данным о средних значениях температуры и влажности воздуха по станциям Европы, Азии, Северной Америки и Атлантического океана. Климатические характеристики вычислены за многолетний период 1957–1967 гг. и представлены на стандартных изобарических поверхностях. Параметры для каждой модели определены методом наименьших квадратов [17]. Оценка качества моделей выполнена по коэффициенту детерминации R^2 [17]. Расчеты выполнены за 4 центральных месяца сезонов: февраль (зима), май (весна), август (лето), ноябрь (осень).

На основе выполненных расчетов построены карты пространственного распределения параметров экспоненциальной и биэкспоненциальной моделей вертикального профиля N с использованием программы «Surfer». Ниже представлены карты распределения параметров экспоненциальной (рис. 1–2) и биэкспоненциальной (рис. 3–6) зависимостей среднего вертикального профиля индекса преломления за август. Для иллюстрации выбран летний месяц, потому что в этот период океан наиболее прогрет и параметры моделей претерпевают наибольшие изменения по территории.

Изменения параметров моделей в пространстве.

Экспоненциальная модель. На территории северных станций значение NO_3 имеет меньшие значения, чем на юге. Максимальное значение NO_3 , равное 368,1 N -ед., характерно для ст. Панама (субэкваториальный пояс). Минимальное значение (305,9 N -ед.) наблюдается на ст. Нарсарсуак, расположенной в южной части о-ва Гренландия на границе арктического и субарктического поясов. При этом на территории северных станций (Осло, Лервик, Торсхавн), находящихся чуть южнее полярного круга в районе Скандинавского полуострова, N в феврале больше, чем на более южных станциях. Это обусловлено очень низкими температурами, малым влагосодержанием воздуха и преобладающим вкладом в величину N температурного фактора.

Значения масштаба высоты изменяются в пределах 1 км. Максимальное значение рассчитано на ст. Норт-Фронт (район Гибралтара) и составило 8,35 км, минимальное – на ст. Панама (7,27 км). В целом, в южных широтах H_3 меньше, чем в северных. H_3 указывает на более резкое убывание с высотой индекса преломления и, соответственно, на большую рефракцию при прочих равных условиях.

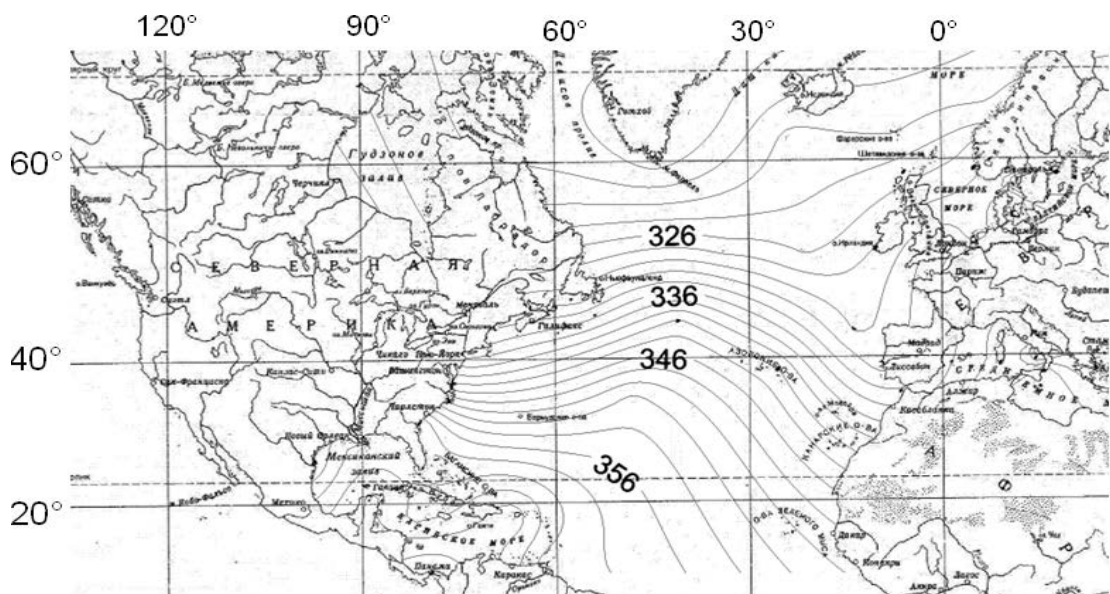


Рис. 1. Распределение NO_x , Август

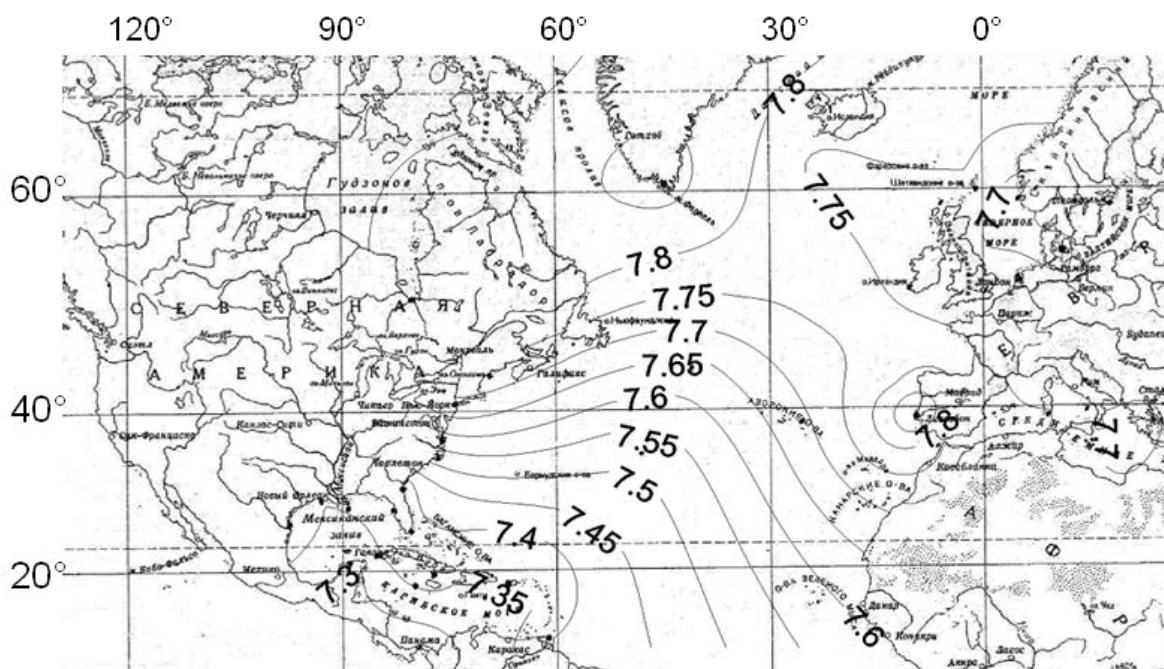


Рис. 2. Распределение H_c , Август

Прослеживается большой горизонтальный градиент коэффициента преломления над западным побережьем Атлантического океана (районы Мексиканского залива) и малый градиент – над северо-восточным побережьем. Это обусловлено большими контрастами в изменении по широте влажности и температуры воздуха.

Бизспоненциальная модель. Общая закономерность такова, что значения NO_c с севера на юг уменьшаются, что объясняется большой влажностью в тропических широтах и, как следствие, меньшим вкладом сухой компоненты и большим вкладом – влажной. Максимальное значение зафиксировано на ст. Никозия (о. Кипр, Средиземное море) – 291,9 N-ед. Минимальное значение NO_c рассчитано на ст. Браунсвилл (тропическое побережье США) – 265,0 N-ед. Таким обра-

зом, относительно большие значения NO_c характерны для районов с более сухой нижней атмосферой (высокие широты, а также – восточная часть океана – благодаря циркуляционным факторам).

Значения H_c возрастают с севера на юг. Наибольшие значения масштаба высоты H_c наблюдаются на побережье Америки и в районе п-ва Флорида (Майами), минимальные значения – в районе о-ва Кипр.

Значения NO_v регулярно возрастают с севера на юг. При этом на одной и той же широте над открытой частью океана NO_v больше, чем у побережий Америки и Европы. Изменения по территории NO_v составляют от 80 до 135 N-ед.

Масштаб высоты влажной составляющей H_v изменяется незначительно и составляет 2,0–2,1 км.

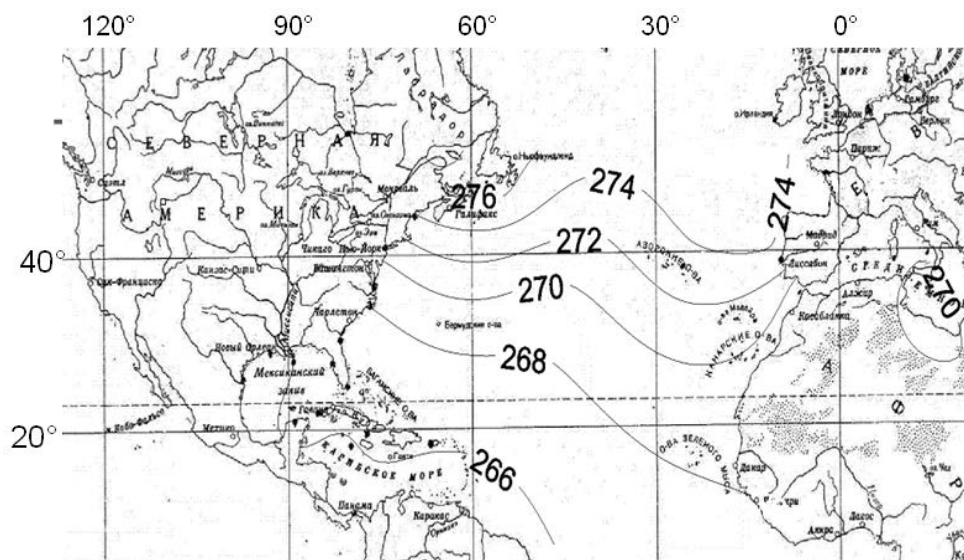


Рис. 3. Распределение NO_c . Август

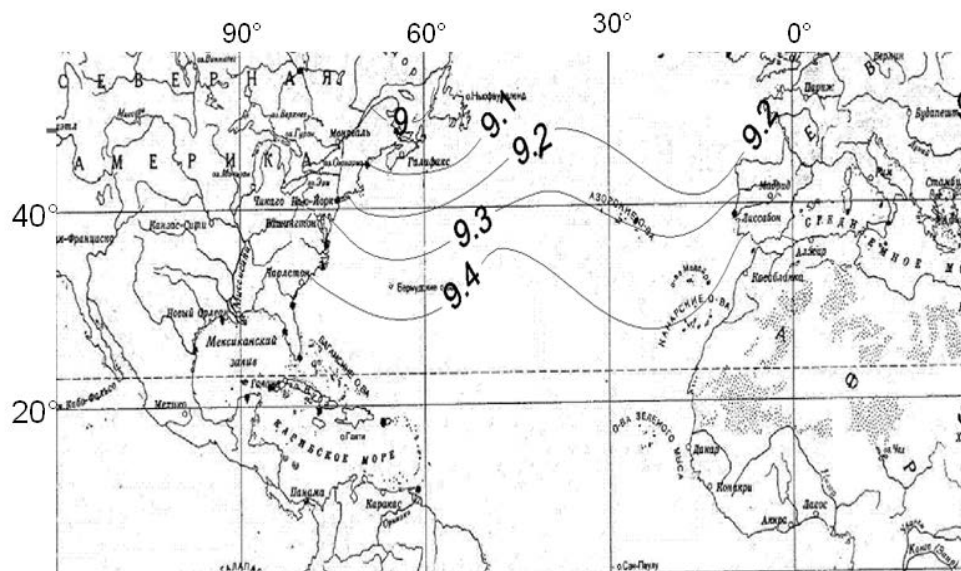


Рис. 4. Распределение H_c . Август

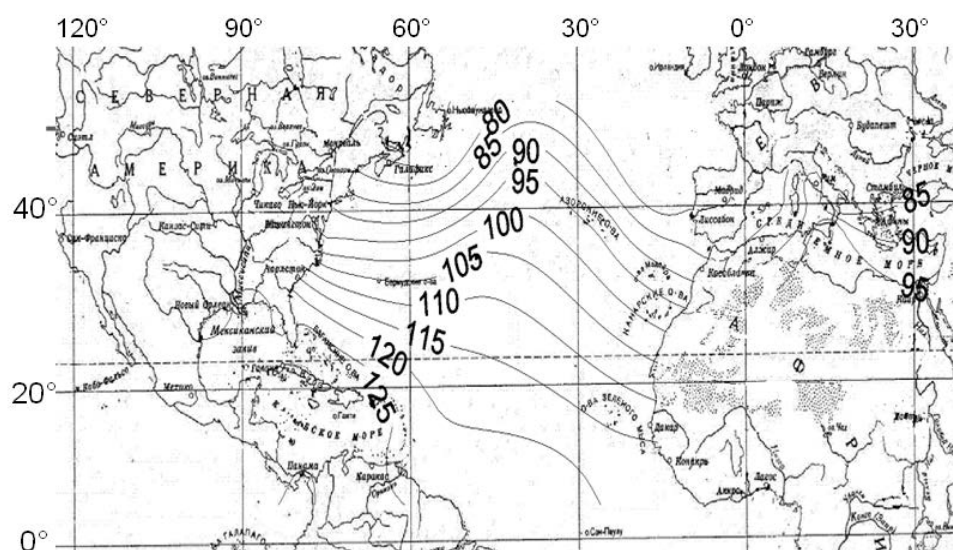


Рис. 5. Распределение NO_a . Август

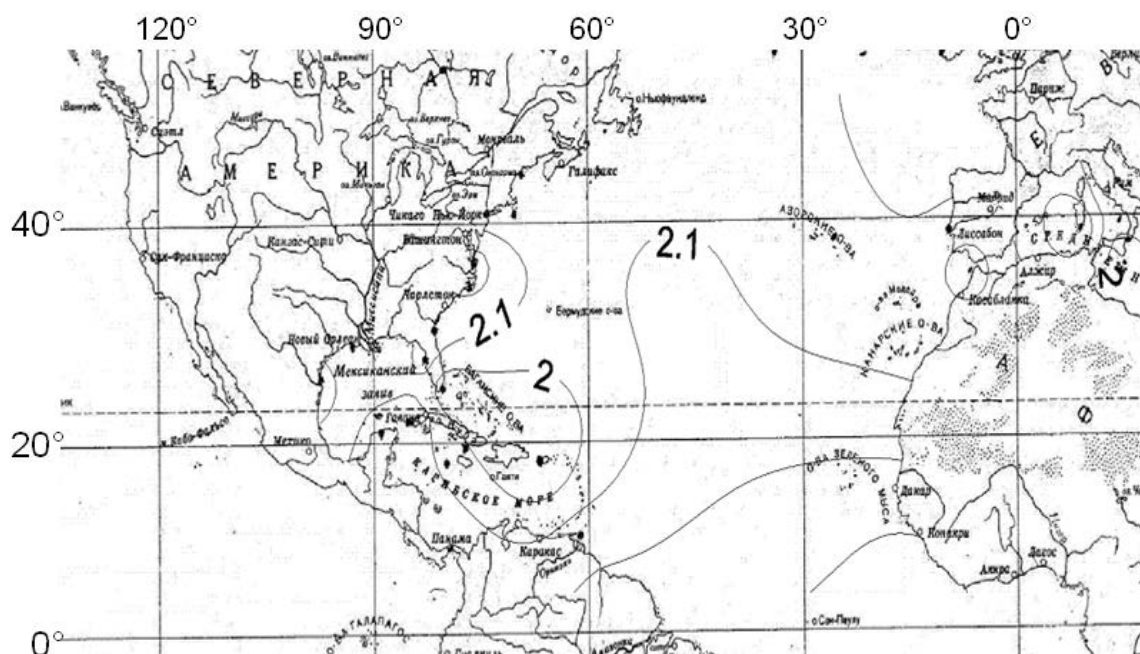


Рис. 6. Распределение H_v . Август

Временные изменения параметров модели. Экспоненциальная модель. Для рассматриваемой территории наибольшие значения NO_x наблюдаются в летний период (август), а минимальные – соответственно зимой (февраль). Это касается всей территории за исключением самых северных районов, где за счет низких температур N возрастает. Зимой изменения NO_x по территории составляют 310–350 N -ед., летом – 316–368 N -ед. Зона больших горизонтальных градиентов в теплое время смещается от тропических в субтропические широты примерно на 10° на север.

Значения масштаба высоты изменяются незначительно. В годовом ходе максимум преобладает в зимний период, а минимум – в летний. Зимой H_z изменяется по территории в пределах 7,5–8,0 км, летом – 7,3–7,9 км. В целом наблюдается закономерность: чем выше значения NO_x , тем меньше H_z , т.е. тем быстрее убывает N с высотой.

Биекспоненциальная модель. В годовом ходе наибольшие значения NO_x наблюдаются в феврале (265–307 N -ед.), наименьшие – в августе (265–280 N -ед.) на всех рассматриваемых станциях. Межсезонные значения существенно не различаются. Масштаб высоты H_c зимой несколько меньше, чем летом. Изолинии H_c за ноябрь и май расположены идентично.

Значения NO_v по территории зимой минимальны и составляют 20–110 N -ед., летом – максимальны (80–130 N -ед.). Масштаб высоты H_v на большинстве станций больше летом, чем зимой. Значения NO_v в разных районах составляют 1,8–2,5 км.

По результатам оценки точности аппроксимации моделей получено, что коэффициент детерминации R^2 близок к 1 ($R^2 = 0,995–0,999$).

При этом для субарктических и умеренных широт более точные результаты дает экспоненциальная модель, для субтропических, тропических, субэкваториальных широт R^2 имеет большие значения для биек-

споненциальной модели. Эти результаты хорошо согласуются с ранее полученными выводами для Тихого океана [3].

Выводы. В работе выполнена оценка рефракционных свойств тропосферы северной части Атлантического океана с использованием климатических данных по 64 станциям, расположенным на побережье Европы, Америки, на островах и кораблях погоды в открытой части океана. В расчетах использованы климатические характеристики атмосферы до уровня 200 гПа (12 км) за период 1957–1965 гг. за центральные месяцы сезонов (февраль, май, август, ноябрь).

Рассчитаны два параметра для экспоненциальной и четыре параметра биекспоненциальной моделей среднего вертикального профиля индекса преломления над рассматриваемой территорией.

Произведена оценка восстановления профиля индекса преломления по коэффициенту детерминации R^2 . Получено, что значения R^2 превышают 0,900. При этом экспоненциальная модель более точно отражает профиль N в субэкваториальных и умеренных широтах, биекспоненциальная – в субтропических и тропических широтах.

По результатам расчетов построены карты пространственного распределения параметров двух моделей с помощью программы «Surfer».

Проведен анализ пространственных и временных изменений параметров моделей за 4 месяца. Выделены экстремальные значения рассчитанных параметров.

В целом полученные расчеты согласуются с данными по Тихому океану.

Ценность работы заключается в том, что параметры биекспоненты рассчитаны и экспоненты для этой территории рассчитаны с использованием большого количества данных.

Результаты работы будут использованы при подготовке «Радиоклиматического тропосферного атласа Атлантического океана».

ЛИТЕРАТУРА

1. *Радиостанции* УКВ диапазона: состояние, перспективы развития, особенности применения режима скачкообразного изменения частоты. URL: <http://ru.wikipedia.org/wiki/> (дата обращения 12.11.2011).
2. *A World Atlas of Atmospheric Radio Refractivity* / B.R. Bean, B.A. Cahoon, C.A. Samson, G.D. Thayer. United States Government Printing Office. Washington, 1966. ESSA Monograph 1. 130 p.
3. *Радиоклиматический тропосферный атлас Тихого океана*. Томск, 2000. 171 с.
4. Бин Б.Р., Даттон Е.Дж. Радиометеорология / пер. с англ. Т.И. Арсеньян. Л. : Гидрометеиздат, 1971. 362 с.
5. Мецзяков А.А., Госенченко С.Г., Кижнер Л.И. Влияние изменчивости индекса преломления тропосферы на дальность прямой видимости и погрешности измерения координат радиолокационных целей // *Известия Томского политехнического университета. Математика и механика. Физика*. 2011. Т. 318, № 2. С. 59–63.
6. Заболотный Н.С., Голдина В.Н. Использование математических моделей для определения показателя преломления атмосферы // *Известия вузов. Геодезия и аэрофотосъемка*. 1987. № 2. С. 30–33.
7. Бартон Д., Вард Г. Справочник по радиолокационным измерениям. М. : Сов. радио, 1976. 392 с.
8. Грудинская Г.П. Распространение радиоволн. М. : Высшая школа, 1975. 280 с.
9. Наумов А.П. О статистической структуре распределения радиометеорологических характеристик // *Известия вузов. Физика атмосферы и океана*. 1979. Вып. 15, № 2. С. 175–186.
10. *Справочник геодезиста*. М. : Недра, 1985. Кн. 2. 440 с.
11. Трифонов Г.П. Учет рефракции при обработке данных радиолокационной системы зондирования атмосферы // *Метеорология и гидрология*. 1986. № 7. С. 46–54.
12. *Атлас океанов. Тихий океан* // Главное управление навигации и картографии МО СССР. 1974. 302 с.
13. *Атлас климатических характеристик температуры, плотности и давления воздуха, ветра и геопотенциала в тропосфере и нижней стратосфере Северного полушария* / под ред. Д.И. Стехновского. М. : Гидрометеиздат, 1975. Вып. 1 : Многолетние средние значения давления и температуры воздуха на уровне моря и уровне станции. 128 с.
14. *Материалы по климату и циркуляции атмосферы над зарубежными странами северного полушария*. М., 1974. Т. 1, вып. 2.
15. *Материалы по климату и циркуляции свободной атмосферы над зарубежными странами северного полушария*. М., 1972–1973. Т. 1, вып. 1.
16. *Материалы по климату и циркуляции свободной атмосферы над странами южного полушария*. М., 1976. Т. 1, вып. 1.
17. Львовский Е.Н. Статистические методы построения эмпирических формул. М. : Высш. шк., 1988. 239 с.

Статья представлена научной редакцией «Науки о Земле» 28 сентября 2012 г.