

Особенности глобального распределения атмосферного поглощения электромагнитных волн в диапазоне 10 – 1000 ГГц

А. С. Михайлов, Н. В. Руженцев

*Радиоастрономический институт НАН Украины,
ул. Краснознаменная, 4, г. Харьков, 61002, Украина
E-mail: sasha_mihailov@mail.ru*

Статья поступила в редакцию 21 декабря 2006 г.

Количественно оценены сезонные, широтные и долготные зависимости приземного погонного и вертикального радиопоглощений атмосферы в окнах прозрачности в диапазоне 10 ÷ 1000 ГГц для различных континентов и океанов. Обсуждены особенности этих зависимостей, рассчитанных с помощью совокупности модели ERA-15 и модели Лиоба.

Полученные данные и отмеченные особенности глобального распределения радиопоглощения показывают, что для одних и тех же широт расхождение в значениях поглощения может достигать нескольких раз. Сезонные широтные сдвиги экстремальных значений радиопоглощения атмосферы, а также сезонные изменения формы долготных и широтных зависимостей указывают на то, что оптимальные частоты спутниковой и приземной связи и сезонная нестабильность распространения радиоволн отличаются для разных регионов мира.

1. Введение

Последние 40 лет в мире для расчетов погонного поглощения электромагнитных волн (γ , дБ/км) в “окнах прозрачности” ясной атмосферы (когда основными поглотителями являются молекулы водяного пара и кислорода), как правило используются полуэмпирические модели. Среди этих моделей в последние 10 лет наибольшее распространение получила модель Лиоба, позволяющая проводить расчеты для частот от 1 до 1000 ГГц [1]. Расчеты полного вертикального поглощения атмосферы (τ , дБ) и поглощения на наклонных трассах “искусственный спутник Земли – земная поверхность” проводятся на основе такого же типа полуэмпирических моделей в совокупности с различными моделями приземного и высотного распределения метеопараметров, к которым можно отнести, например, модель атмосферы US-60 и ее

последующие модификации [2] или стандарт ITU-R P-835-3 [3].

В то же время известно, что в 2004 г. ИТУ (International Telecommunication Union) рекомендовал к использованию новую модель ERA-15 [4] для описания высотного распределения метеоданных в глобальном масштабе. Эта модель была разработана на основе 15-летних наблюдений на 353 метеорологических станциях мира. К предполагаемым преимуществам этой модели стоит отнести возможность определения метеопараметров для любого региона мира, а также относительную новизну и большой объем радиозондовых данных, на основе которых она была разработана.

В настоящей работе проведены расчеты частотного поглощения атмосферы, его сезонного, широтного и долготного хода над разными океанами и материками с использованием моделей поглощения Лиоба и метеорологической модели ERA-15 (выб-

ранных нами в качестве базовой комбинации). Проведен анализ полученных зависимостей и особенностей глобального распределения параметров поглощения.

При этом с целью оценки отличий данного базового подхода от результатов расчетов, основанных на других популярных в прошлые десятилетия моделях, нами предварительно были проведены тестовые расчеты с помощью моделей поглощения Жевакина–Наумова–Зражевского, Лииба и метеорологических моделей US-60 и ERA-15. Для установления точности модели ERA-15 были осуществлены ее тестирование и оценка величины погрешности по многолетним экспериментальным метеорологическим данным для территории Украины [5].

2. Результаты

На начальной стадии работы для оценки возможного влияния изменения длины волны с помощью модели поглощения Лииба и метеорологической модели ERA-15 нами были проведены расчеты значений полного вертикального поглощения атмосферы для двух точек земного шара, расположенных на одной широте (60° с. ш.) на разных материках (Санкт-Петербург, Россия и Черчилл, Канада). Кроме того, для метеоусловий Черчилла нами были сделаны аналогичные расчеты вертикального поглощения с помощью различных моделей погонного поглощения (Лииба и Жевакина–Наумова–Зражевского) в сочетании с широко известной метеорологической моделью US-60.

Анализ полученных данных продемонстрировал, что по сравнению с моделью ERA-15 использование модели US-60 приводит в летний период к повышенным значениям поглощения, которые соответствуют 1.5-кратному для Санкт-Петербурга и 2-кратному для Черчилла превышению значения оптической толщины атмосферы. В тоже время для зимнего периода эти различия почти исчезают для Санкт-Петербур-

га и существенно уменьшаются для Черчилла. (В связи с чем можно предположить, что US-60 хуже отражает реальное высотное распределение водяного пара по сравнению с высотным распределением кислорода, не обеспечивая при этом необходимый учет долготного хода распределения метеопараметров.)

Сопоставление результатов, полученных с помощью различных моделей поглощения показало, что до частоты 140 ГГц модель Жевакина–Наумова–Зражевского дает небольшое завышение значений поглощения (менее 15%) по сравнению с моделью Лииба. Однако с дальнейшим повышением частоты величина этих различий возрастает многократно уже на частоте 344 ГГц.

На этом же этапе работы нами было проведено дополнительное тестирование модели ERA-15 для всей территории Украины, а также оценка влияния ее погрешностей на расчеты атмосферного поглощения. Для этого с расчетными данными ERA-15 были сопоставлены экспериментально полученные на протяжении трех десятилетий среднемесячные изотермы и изолинии влажности по Украине [5]. Затем была проведена оценка влияния обнаруженных отличий метеоданных на расчетные значения поглощения.

В результате выяснено, что для всей территории Украины среднеквадратичная погрешность определения приземной среднемесячной температуры составляет около одного градуса Цельсия (1.1°C летом и 1.3°C зимой), а среднеквадратичная погрешность влажности воздуха – около 0.32 г/м^3 зимой и 0.95 г/м^3 летом. Такие погрешности, по нашим расчетным оценкам, приводят к ошибкам в прогнозировании параметров поглощения атмосферы в пределах 8% (0.08 дБ) для летних месяцев и 7% (0.02 дБ) для зимних месяцев. Это следует считать вполне приемлемым для многих практических приложений.

Таким образом, проведенное тестирование и сопоставление данных, полученных с помощью комбинаций современных, либо использовавшихся в прошлом моделей,

позволили оценить степень достоверности результатов, полученных в мире в последние десятилетия, выбрать в качестве базовой совокупность моделей Лиоба и ERA-15, а также количественно установить степень применимости совокупности этих наиболее современных моделей для измерений на территории Украины.

На следующем, основном, этапе работы для расчетов и количественных оценок сезонных, долготных и широтных зависимостей приземного погонного и полного вертикального поглощения атмосферы во всех окнах прозрачности радиодиапазона и для всех регионов мира нами использовалась только совокупность моделей Лиоба и ERA-15.

Разработанное нами на основе этих моделей программно-алгоритмическое обеспечение позволяет оперативно производить расчеты среднемесячных значений погонного и вертикального поглощений в ясной атмосфере в диапазоне частот от 1 до 1000 ГГц, причем для любого месяца, в любое вре-

мя суток и для любой точки земного шара. В настоящей работе анализ полученного материала проводится в окнах прозрачности атмосферы в диапазоне $10 \div 1000$ ГГц для 12 часов местного времени в январе и июле.

Найденные расчетным путем широтные и долготные распределения поглощения анализировались нами на основе отдельных глобальных разрезов, показанных на рис. 1 черными линиями, и с помощью тоновых (или цветных) изображений глобального распределения поглощения (рис. 2, а, б). Необходимо заметить, что в работе рассматривались данные, полученные на двух частотах, 37 и 94 ГГц. Однако обнаруженные на этих частотах закономерности, как показывают наши расчеты (рис. 3, а), характерны для всех окон прозрачности атмосферы в диапазоне $10 \div 1000$ ГГц [9]. Таким образом, полученные данные свидетельствуют о различиях в условиях прохождения сигналов для одних и тех же широт на разных континентах и над разными океанами.



Рис. 1. Широтные и долготные разрезы на карте мира, использованные для расчетов атмосферного поглощения

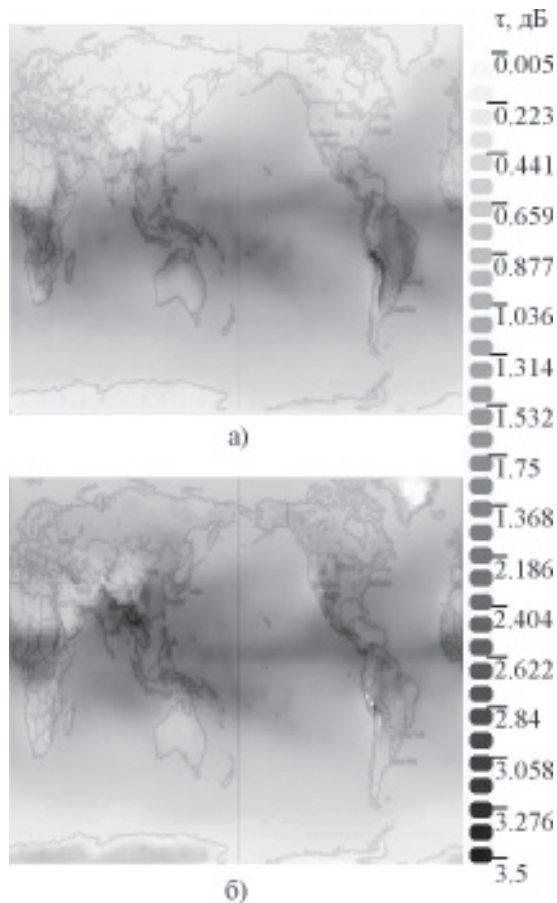


Рис. 2. Карты глобального распределения полного вертикального поглощения на частоте 94 ГГц для января (а), июля (б)

Так, на всех частотах над Атлантикой широтные зависимости γ и τ имеют качественно сходный характер (рис. 3) – основной максимум вблизи экватора и два локальных максимума, отстоящих по широте от основного приблизительно на 30° . При этом в июле основной максимум смещен приблизительно к 10° с. ш. Однако к январю он смещается на экватор, южный локальный максимум становится приблизительно вдвое больше северного.

Для Тихого и Атлантического океанов во всем диапазоне частот 10 ÷ 1000 ГГц можно найти определенное внешнее сходство широтных зависимостей τ и γ (рис. 3, 4). Однако если для Атлантического океана основной

максимум в июле находится на 10° с. ш., а в январе он вместе с локальными смещается на 10° на юг, то для Тихого океана главный максимум находится на 20° ю. ш. и практически отсутствуют локальные максимумы. Кроме того, для Тихого океана смена времени года приводит не к широтному смещению главного максимума, а к его расщеплению на два симметричных максимума, расположенных приблизительно на 10° ю. ш. и 10° с. ш. Таким образом, мы наблюдаем определенное сходство формы широтных зависимостей τ для Тихого и Атлантического океанов (рис. 3, 4), но в разные сезоны. Погонное и полное поглощения атмосферы над Тихим океаном больше, чем над Атлантическим. Причину, видимо, следует искать в отличиях широтных распределений температуры и влажности воздуха и циркуляции воздушных масс и океанских течений.

При этом для всех долгот характерно уменьшение погонного и полного поглощений в 5 ÷ 10 раз в децибелах по мере продвижения от экватора к высоким широтам. Для атмосферы над Атлантическим океаном это уменьшение более заметно.

Широтные зависимости поглощения атмосферы над Американскими континентами (рис. 5) имеют более пологий характер, чем зависимости для океанов, а также сходную форму и смещаются по широте в разные сезоны (для океанов, помимо смещения, наблюдается трансформация формы кривых).

Приэкваториальные максимумы, полученные для Евро-Африканского широтного сечения (рис. 6) и для широтных сечений Америки, существенно различаются крутизной и формой. Это свидетельствует об отличиях в условиях прохождения сигналов для одних и тех же широт над разными континентами и океанами (рис. 3, 6). Значения поглощения над ними могут отличаться в одно и то же время года в несколько раз. При рассмотрении Евро-Африканского сечения с юга на север видно, насколько сильно влияет региональный климат: над пустыней наблюдается минимум значений

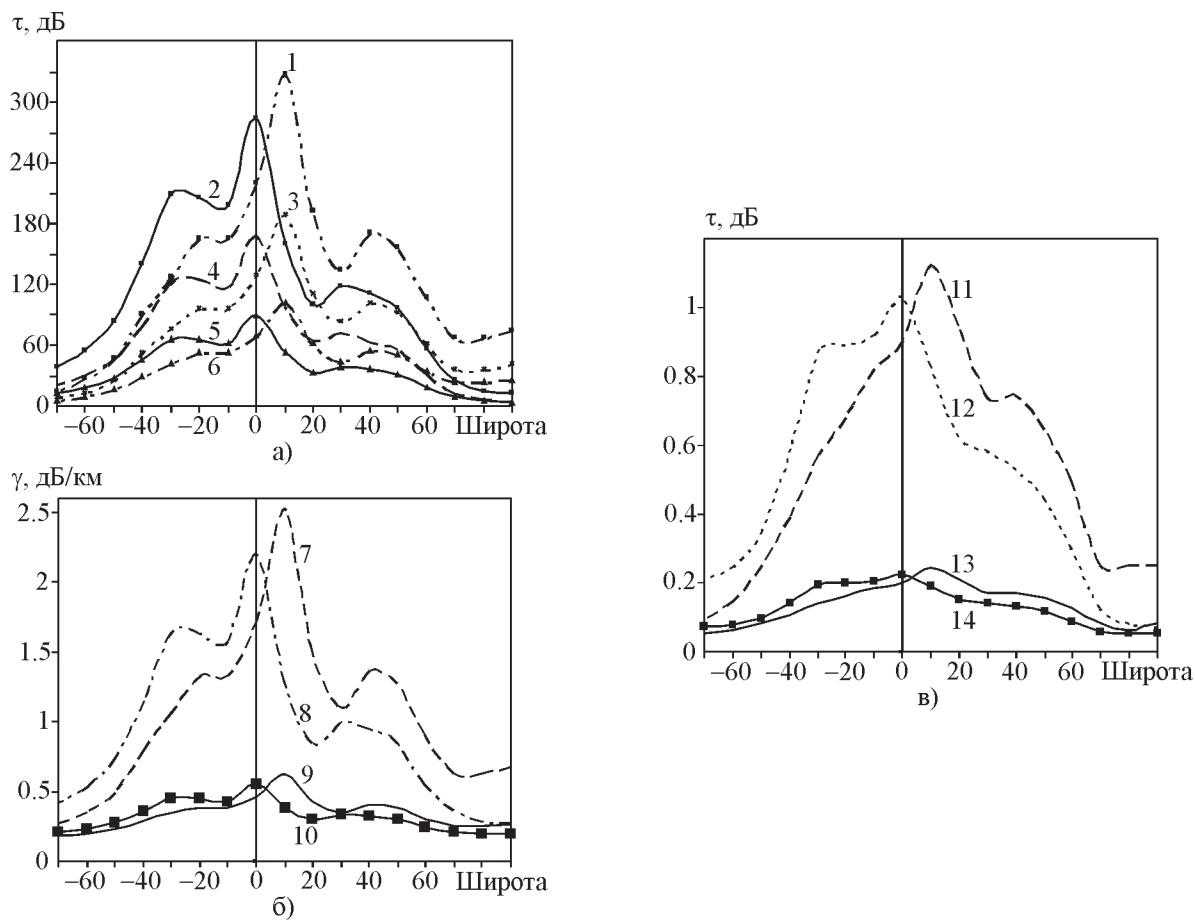


Рис. 3. Зависимости полного вертикального поглощения на частотах 410, 880 и 944 ГГц (а), полного вертикального поглощения на частотах 37 и 94 ГГц (б) и погонного горизонтального поглощения атмосферы на уровне моря (в) от широты для Атлантического океана (25° з. д.): кривая 1 – июль, $f = 944$ ГГц; кривая 2 – январь, $f = 410$ ГГц; кривая 3 – июль, $f = 880$ ГГц; кривая 4 – январь, $f = 880$ ГГц; кривая 5 – январь, $f = 944$ ГГц; кривая 6 – июль, $f = 410$ ГГц; кривая 7 – январь, $f = 37$ ГГц; кривая 8 – январь, $f = 94$ ГГц; кривая 9 – июль, $f = 37$ ГГц; кривая 10 – январь, $f = 37$ ГГц; кривая 11 – июль, $f = 37$ ГГц; кривая 12 – январь, $f = 94$ ГГц; кривая 13 – июль, $f = 37$ ГГц; кривая 14 – январь, $f = 37$ ГГц

вертикального поглощения, а над Средиземным морем вертикальное поглощение возрастает. Это, видимо, обусловлено распределением влажности воздуха.

Здесь стоит обратить внимание на то, что отмеченные выше региональные особенности проявляются на фоне общих глобальных закономерностей сезонного смещения максимумов и изменения широтных градиентов в поглощении атмосферы, которые хорошо видны при сопоставлении рис. 2, а и 2, б.

В долготной зависимости Евро-Азиатского разреза в средних широтах (50° с. ш.) во всем диапазоне частот 10÷1000 ГГц в зимний период наблюдается явно выраженное уменьшение (в 3-4 раза) поглощения по мере продвижения на восток. Такой ход зависимости может быть связан с уменьшением влажности воздуха от побережья Атлантики к центру Сибири в этот период, что подтверждается ходом зимних изотерм [8]. Летние, повышенные, значения влажности, видимо, распределены более

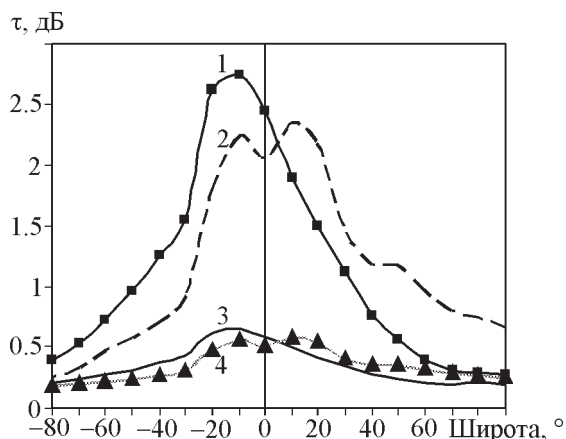


Рис. 4. Широтная зависимость полного вертикального поглощения над Тихим океаном (170° в. д.): кривая 1 – январь, $f = 94$ ГГц; кривая 2 – июль, $f = 94$ ГГц; кривая 3 – январь, $f = 37$ ГГц; кривая 4 – июль, $f = 37$ ГГц

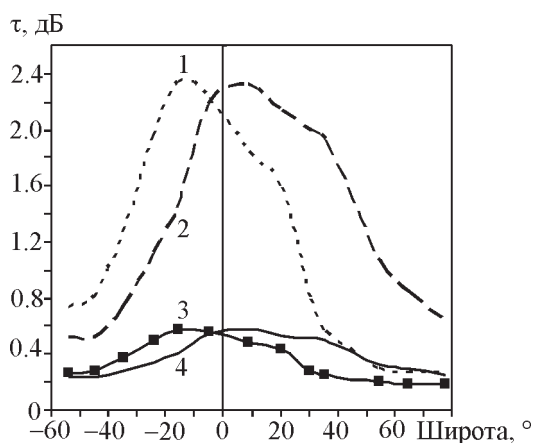


Рис. 5. Широтная зависимость полного вертикального поглощения над Американскими континентами: кривая 1 – январь, $f = 94$ ГГц; кривая 2 – июль, $f = 94$ ГГц; кривая 3 – январь, $f = 37$ ГГц; кривая 4 – июль, $f = 37$ ГГц

равномерно. Так, в летний период долготная зависимость практически постоянна, с небольшими (менее 10 %) отклонениями, видимо, связанными с региональными микроклиматическими особенностями.

Для средних широт над Атлантическим и Тихим океанами на всех частотах дол-

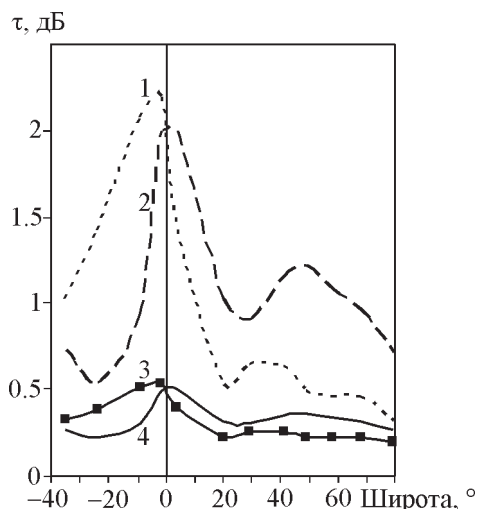


Рис. 6. Широтная зависимость полного вертикального поглощения в Евро-Африканском долготном сечении: кривая 1 – январь, $f = 94$ ГГц; кривая 2 – июль, $f = 94$ ГГц; кривая 3 – январь, $f = 37$ ГГц; кривая 4 – июль, $f = 37$ ГГц

готные зависимости имеют похожий характер – плавные 10 ÷ 20 %-е изменения для каждого из океанов летом и 40 ÷ 50 %-е зимой (рис. 7). При этом интересно отметить, что если зимой долготные зависимости для погонного и вертикального поглощения имеют качественно сходный характер, то летом различия между ними весьма заметны.

Глобальная долготная зависимость полного вертикального поглощения атмосферы над тремя океанами на 10° ю. ш. (рис. 8), в отличие от зависимости для средних широт над Тихим и Атлантическим океанами, показывает двойной перепад поглощения в зависимости от региона, с максимумом на 190° долготы (регион островов Самоа) и минимумом на 250° долготы (Восточный регион Тихого океана). При этом максимумы поглощения наблюдаются также на 50° долготы (около Восточного побережья Африки), 130° долготы (между Индонезией и Австралией), и 270° долготы (вблизи Западного побережья Южной Америки).

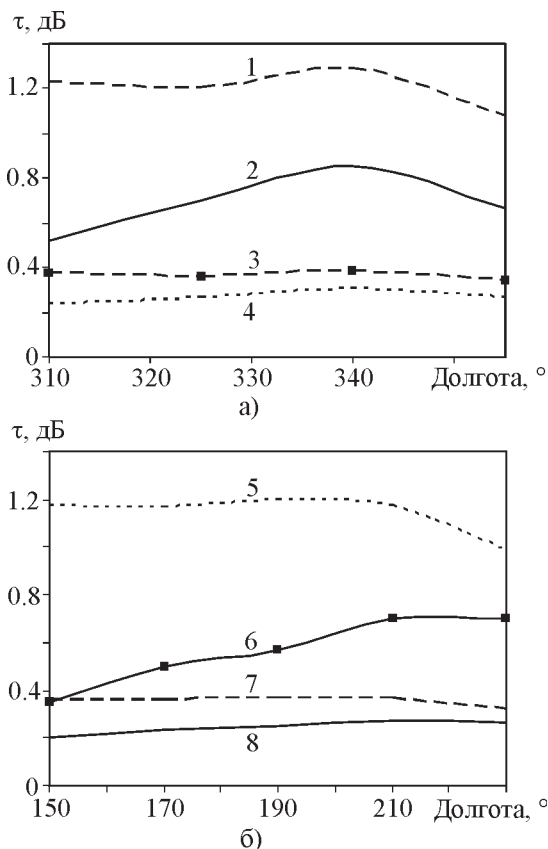


Рис. 7. Долготные зависимости полного вертикального поглощения над Атлантическим (а) и Тихим (б) океанами для средних широт (50° с. ш.): кривая 1 – июль, $f = 94$ ГГц; кривая 2 – январь, $f = 94$ ГГц; кривая 3 – июль, $f = 37$ ГГц; кривая 4 – январь, $f = 37$ ГГц; кривая 5 – июль, $f = 94$ ГГц; кривая 6 – январь, $f = 94$ ГГц; кривая 7 – июль, $f = 37$ ГГц; кривая 8 – январь, $f = 37$ ГГц

Обращает на себя внимание наличие локального максимума полного вертикального поглощения на 270° долготы (рис. 8) и его отсутствие для рассчитанного нами приповерхностного погонного поглощения. Это, вероятно, связано с особенностями высотного распределения метеопараметров вблизи Западного побережья Южной Америки.

Такие зависимости погонного и вертикального поглощения отличаются от отмеченных выше для северного полушария (50° с. ш.) существенно большей величиной долготного перепада поглощения.

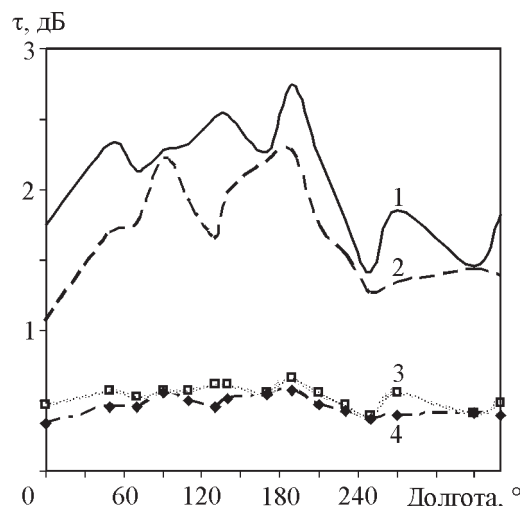


Рис. 8. Глобальная долготная зависимость полного вертикального поглощения (10° ю. ш.): кривая 1 – январь, $f = 94$ ГГц; кривая 2 – июль, $f = 94$ ГГц; кривая 3 – январь, $f = 37$ ГГц; кривая 4 – июль, $f = 37$ ГГц

3. Заключение

Полученные в результате модельных расчетов данные свидетельствует о различиях в условиях прохождения сигналов на одних и тех же широтах над разными континентами и океанами в одно и то же время года. Это обстоятельство, а также оцененный сезонный и широтный ход поглощения, свидетельствуют о том, что для разных регионов мира оптимальные частоты сигналов спутниковой и тропосферной связи будут отличаться, как и сезонно-погодная стабильность параметров распространения. При этом сопоставление результатов расчетов глобального распределения поглощения с расположением изотерм, а также учет их сезонной изменчивости и рельефа местности позволяют сделать вывод о достаточно хорошей корреляции.

Предварительное тестирование и сравнение данных, полученных с помощью комбинаций популярных в прошлом моделей для расчетов атмосферного поглощения, а также проведенные на основе моделей

ERA-15 и Либа расчеты, позволили количественно оценить степень применимости для территории Украины наиболее современных моделей и степень достоверности проводившихся в последние десятилетия расчетов.

Другим важным результатом работы является созданное и протестированное программное обеспечение, которое позволяет осуществлять оперативную количественную оценку параметров поглощения атмосферы для любой точки мира в широком спектре частот, причем для любого времени суток и времени года.

Литература

1. Liebe H. J. MIPM89- An atmospheric millimeter waves propagation model // Int. J. Infrared Millimeter Waves. – 1989. – Vol. 10, No. 6. – P. 631-650.
2. Cole A. E., Gourt A., and Kontor A. J. Model Atmospheres in Handbook of Geophysics and Spaces Environment / Ed. by S. L. Valley. – Office of Aerospace Research, USAF Cambridge Res. Lab., 1965. – p.
3. ITU-R P.835-3. 1999, Reference standard atmospheres, ITU-R Series Recommendations – Radio-wave Propagation. – www.dbp.library.ncnu.edu.tw/itu-r/product/p.htm
4. Martellucci A., Rastburg B. A., J. P. V. Poiaras Baptista, Blarzino G. New reference standard atmospheres based on numerical weather products // Abstracts of International Workshop – ClimDiff'2003 – Fortaleza, Brazil. – 2003. – P. clim.1.
5. Климат Украины / Под ред. В. М. Липинского – Киев: Из-во Раевского, 2003. – 343с.
6. Жевакин С. А., Наумов А. П. Поглощение электромагнитных волн в 3-мм – 7.5-мм диапазонах волн в атмосфере Земли // Известия вузов. Радиофизика. – 1966. – Т. 9, №3. – С. 433-450.
7. Зражевский Ю. А. Метод расчета поглощения атмосферными парами воды в миллиметровом и суб-миллиметровом диапазонах волн // Радиотехника и электроника. – 1976. – Т. 2, №5. – С. 951-958.
8. Турлайс Я. Географический атлас мира. – Рига: Яня Сета, 1997. – 96 с.
9. Ruzhentsev N. V., Mikhailov A. S. Global features of the total vertical absorption of atmosphere at 10-1000 GHz range/ Proc. of International Conf. IRMMW-TGz 2005. – Williamsburg (USA). – 2005. – P. 99-100.

Особливості глобального розподілу атмосферного поглинання електромагнітних хвиль в діапазоні 10–1000 ГГц

А. С. Михайлов, М. В. Руженцев

Кількісно оцінені сезонні, широтні та довготні залежності приземного і вертикального радіопоглинання атмосфери у вікнах прозорості в діапазоні 10 ÷ 1000 ГГц для різних континентів і океанів. Обговорено особливості цих залежностей, розрахованих за допомогою сукупності моделі ERA-15 та моделі Ліба.

Отримані дані та вказані особливості глобального розподілу радіопоглинання показують, що для тих самих широт розбіжність у значеннях поглинання може досягати кількох разів. Сезонні широтні зсуви екстремальних значень радіопоглинання атмосфери, а також сезонні зміни форми довготних і широтних залежностей вказують на те, що оптимальні частоти супутникового і приземного зв'язку та сезонна нестабільність поширення радіохвиль відрізняються для різних регіонів світу.

Peculiarities of Global EM Wave Distribution within 10–1000 GHz

A. S. Mikhailov and N. V. Ruzhentsev

The seasonal, latitude and longitude dependencies of near ground absorption and vertical absorption of radio waves in atmospheric transparency windows within 10 ÷ 1000 GHz for different continents and oceans are estimated quantitatively. The qualitative and quantitative peculiarities of mentioned dependencies obtained with the ERA-15 and Liebe models used together are discussed.

The data obtained and the noted peculiarities of global distribution of radio absorption show that its difference for same latitudes can reach a few times. The seasonal-latitude shifts of the extreme values of radio absorption as well as the seasonal transformations of longitude and latitude dependencies indicate that the optimal frequencies for satellite or near-ground communication and seasonal propagation instability are different for the different world regions.