

А. П. Николаенко<sup>1</sup>, Ю. П. Галюк<sup>2</sup>, М. Хайакава<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Институт радиофизики и электроники им. А. Я. Усикова НАН Украины

12, ул. Ак. Проскуры, Харьков, 64085, Украина

E-mail: [sasha@ire.kharkov.ua](mailto:sasha@ire.kharkov.ua)

<sup>2</sup>Санкт-Петербургский государственный университет

35, Университетский просп., Санкт-Петербург, Петергоф, 198504, Россия

E-mail: [galyuck@paloma.spbu.ru](mailto:galyuck@paloma.spbu.ru)

<sup>3</sup>Институт Хайакавы, Компания сейсмического электромагнетизма,

Инкубационный центр 508 Университета электросвязи

1-5-1 Чофугаока, Чофу, Токио, 182-8585, Япония

E-mail: [hayakawa@hi-seismo-em.jp](mailto:hayakawa@hi-seismo-em.jp)

## ВЕРТИКАЛЬНЫЙ ПРОФИЛЬ ПРОВОДИМОСТИ АТМОСФЕРЫ, ОТВЕЧАЮЩИЙ ПАРАМЕТРАМ ШУМАНОВСКОГО РЕЗОНАНСА

Поиск реалистичного вертикального профиля проводимости атмосферы остается актуальной задачей при прямом электромагнитном моделировании глобального электромагнитного (шумановского) резонанса. Потребность в знании профиля обусловлена необходимостью учета влияния на ионосферу различных факторов космической погоды или сейсмической активности. При этом особое значение приобретает знание регулярного профиля, который позволяет получать в расчетах реально наблюдаемые значения параметров шумановского резонанса в невозмущенных условиях. Опираясь на классические данные, мы разработали новый высотный профиль проводимости атмосферы в интервале от 2 до 98 км, который позволяет получать параметры шумановского резонанса, согласующиеся с наблюдениями. С помощью метода полного поля была вычислена постоянная распространения сверхнизкочастотных (СНЧ) радиоволн, отвечающая этому профилю. Продемонстрировано высокое соответствие полученной зависимости общепризнанной эталонной модели, основанной на регистрациях глобального электромагнитного резонанса. Предложены также профили проводимости для ночных и дневных условий. Для этих профилей по методу полного поля вычислены соответствующие постоянные распространения. Рассчитаны и сопоставлены энергетические спектры шумановского резонанса в вертикальной электрической компоненте поля при равномерном распределении мировых гроз, отвечающие стандартной модели и различным профилям проводимости. Показана также согласованность полученных модельных данных с результатами измерений искусственных полей, излученных СНЧ-передатчиками. Ил. 6. Табл. 2. Библиогр.: 30 назв.

**Ключевые слова:** вертикальный профиль проводимости воздуха, постоянная распространения СНЧ-радиоволн, энергетические спектры шумановского резонанса, затухание радиоволн, излученных СНЧ-передатчиками.

В стандартном описании распространения электромагнитной волны диапазона сверхнизких частот (СНЧ: 3 Гц ... 3 кГц) в промежутке Земля–ионосфера используются постоянная распространения, расстояние источник–приемник и токовый момент источника. Особенно важную роль при расчетах и моделировании играет постоянная распространения  $\nu(f)$ , поэтому на ее точное определение было направлено немало усилий, см. например монографии [1, 2] и библиографию к ним. Общепризнанная модель постоянной распространения была предложена в работе [3]; она обобщает обширный массив экспериментальных данных, собранных сетью обсерваторий, наблюдавших глобальный электромагнитный (шумановский) резонанс. Пункты наблюдения располагались в Восточном и Западном полушариях. Комплексную постоянную распространения  $\nu(f)$  в модели [3] вычисляют с помощью следующих соотношений:

$$\nu(f) = [0,25 + (kaS)^2]^{1/2} - 0,5, \quad (1)$$

где  $a$  – радиус Земли;  $k$  – волновое число в вакууме;  $f$  – частота;

$$S = c/V - i5,49\alpha / f; \quad (2)$$

$$c/V = 1,64 - 0,1759 \ln(f) + 0,0179 [\ln(f)]^2; \quad (3)$$

$$\alpha = 0,063 f^{0,64}. \quad (4)$$

Сопоставления экспериментальных данных о шумановском резонансе с расчетом по формулам (1)–(4) подтвердили справедливость модели [3], хотя в литературе иногда используются и иные, более простые представления для  $\nu(f)$ , см. [1, 2]. Мы будем пользоваться соотношениями (1)–(4) как эталоном.

При расчетах полей и интерпретации экспериментальных данных знание высотного профиля проводимости атмосферы  $\sigma(h)$  не обязательно. Достаточно воспользоваться стандартными формулами для расчета полей, в которые входят постоянная распространения, токовый момент источника поля и эффективная высота ионосферы [1, 2].

Если же используются прямые модельные методы, такие как разностные методы (FDTD) или двумерные телеграфные уравнения (2DTE) [4–9], то невозможно обойтись без высотного профиля проводимости воздуха и получаемой из него комплексной диэлектрической проницаемости. Область высот от 50 до 100 км, существенная для

распространения СНЧ-радиоволн, недоступна для современных дистанционных средств исследования. Имеющиеся экспериментальные данные о проводимости воздуха на этих высотах редки и были получены с помощью контактных измерений. Поэтому в литературе можно найти немного высотных профилей проводимости воздуха. Важно то, что ни один из них не дает реалистическую частотную зависимость (1)–(4).

Целью настоящей работы является построение реалистичного профиля  $\sigma(h)$ , отвечающего наблюдаемым параметрам шумановского резонанса. Модель такого рода необходима при моделировании распространения радиоволн в реальном резонаторе Земля–ионосфера.

**1. Проводимость воздуха как функция высоты.** При построении высотной зависимости  $\sigma(h)$ , отвечающей наблюдаемым частотам и добротностям шумановского резонанса, мы будем отталкиваться от классической работы [10], в которой предложен профиль  $\sigma(h)$ , построенный по результатам наблюдений и данным аэронамии. Этот профиль часто используется в разнообразных приложениях, он показан кривой с точками 1 на рис. 1. Главный недостаток, препятствующий его применению в области шумановского резонанса, состоит в неточных значениях постоянной распространения, в результате чего расчетные спектры шумановского резонанса заметно отличаются от наблюдаемых. Предлагаемый нами профиль 2 дает более реалистичные данные. В то же время он не сильно отличается от классической зависимости [10], а значит, неплохо соответствует контактным измерениям проводимости воздуха и данным аэронамии. Конкретные величины высоты и логарифма проводимости сведены в табл. 1.

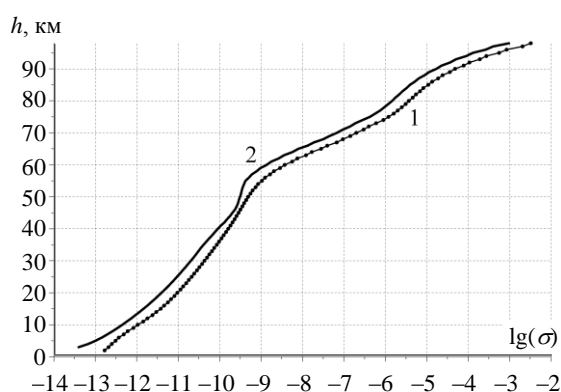


Рис. 1. Высотные профили проводимости воздуха: 1 – классический профиль [10]; 2 – профиль, лучше соответствующий наблюдаемым параметрам шумановского резонанса

На рис. 1 показана проводимость атмосферы в диапазоне высот от 0 до 100 км. Здесь кривая с точками 1 показывает классический

профиль работы [10], а гладкая кривая 2 – более реалистичный профиль  $\sigma(h)$ . Как видно из рисунка, обе кривые близки друг к другу, но у профиля 2 более ярко выражены изменения в области 50...60 км (так называемое «колени»). Отличия начинаются на высоте 30 км; профиль 2 «приподнят» над исходной зависимостью 1.

В исследованиях шумановского резонанса вместо соотношений (1)–(4) при расчете постоянной распространения часто используют эвристическую «модель колена», предложенную в работе [11]. Подобно работам [4–6, 12–16], в этой модели постулируется набор параметров, который позволяет вычислить комплексные характерные высоты профиля (электрическую и магнитную), а также действительные высотные масштабы проводимости вблизи этих высот. Постоянная распространения вычисляется по характерным высотам и высотным масштабам, а зависимость параметров модели от частоты постулируется [11]. Это дает возможность перейти к вычислению полей [2, 17].

К сожалению, все работы, использующие модель колена, ограничиваются словесным описанием профиля  $\sigma(h)$ , но ни одна из них не приводит высотной зависимости, соответствующей конкретной модели. Построить такой профиль очень трудно, если вообще возможно, поскольку все параметры модели колена зависят от частоты. Поэтому не ясно, как с помощью комплексных функций частоты построить действительную функцию высоты  $\sigma(h)$ , которая не зависит от частоты и отвечает модели колена. Во всяком случае, такая задача до сих пор не решена.

Упрощенные профили проводимости, широко используемые в прямых методах расчета полей, как правило, представляют собой график  $\lg[\sigma(h)]$  в виде прямой линии, изогнутой в окрестности колена из-за изменения вертикального масштаба проводимости [8, 9, 18–20]. Такая зависимость проводимости от высоты эквивалентна известной двухмасштабной экспоненциальной модели. Недостатки таких моделей хорошо изучены и подробно обсуждались в [11, 21, 22].

**2. Постоянная распространения.** Постоянная распространения СНЧ-радиоволн  $\nu(f)$  строится в предположении, что изотропная плазма ионосферы горизонтально однородна. В этом случае, пользуясь методом полного поля, изложенным в работах [23–27], можно рассчитать зависимость  $\nu(f)$ , отвечающую заданному профилю  $\sigma(h)$ . В методе полного поля (*full wave solution*) используют строгое решение задачи о распространении электромагнитной волны в слоистой ионосфере. В каждом из горизонтальных слоев учитывают прошедшую и отраженную волны. Толщину слоев выбирают намного меньше

длины волны в среде. На границах слоев тангенциальные компоненты поля непрерывны. Тогда можно показать, что задача сводится к нелинейному дифференциальному уравнению первого порядка, если от полей перейти к поверхностному импедансу слоев (отношению тангенциальных компонент поля  $E$  и  $H$ ) [23–27]. Полученное

уравнение решается численно с помощью метода последовательных приближений, и в результате получают искомую постоянную распространения  $\nu(f)$ . Поскольку при этом строго учитываются все поля, распространяющиеся в плазменных слоях и в воздухе, метод получил название метода полного поля.

Таблица 1  
Логарифм проводимости воздуха (См/м) как функция высоты над поверхностью Земли

z, км	lg( $\sigma$ )			z, км	lg( $\sigma$ )			z, км	lg( $\sigma$ )		
	Ночь	День	Средний		Ночь	День	Средний		Ночь	День	Средний
2	-13,82	-13,82	-13,82	34	-10,39	-10,24	-10,39	66	-8,24	-7,17	-7,73
3	-13,67	-13,67	-13,67	35	-10,32	-10,16	-10,32	67	-8,10	-7,02	-7,50
4	-13,40	-13,40	-13,40	36	-10,25	-10,09	-10,25	68	-7,90	-6,85	-7,35
5	-13,17	-13,17	-13,17	37	-10,18	-9,97	-10,18	69	-7,73	-6,72	-7,17
6	-12,99	-12,99	-12,99	38	-10,11	-9,92	-10,11	70	-7,50	-6,55	-7,02
7	-12,84	-12,84	-12,84	39	-10,04	-9,84	-10,04	71	-7,35	-6,37	-6,85
8	-12,71	-12,71	-12,71	40	-9,99	-9,75	-9,97	72	-7,17	-6,25	-6,72
9	-12,58	-12,58	-12,58	41	-9,93	-9,69	-9,88	73	-7,02	-6,12	-6,55
10	-12,46	-12,46	-12,46	42	-9,87	-9,63	-9,82	74	-6,85	-6,02	-6,37
11	-12,35	-12,35	-12,35	43	-9,81	-9,59	-9,75	75	-6,72	-5,93	-6,25
12	-12,24	-12,24	-12,24	44	-9,75	-9,56	-9,69	76	-6,55	-5,83	-6,12
13	-12,13	-12,13	-12,13	45	-9,68	-9,53	-9,63	77	-6,37	-5,76	-6,02
14	-12,03	-12,03	-12,03	46	-9,64	-9,51	-9,9	78	-6,25	-5,66	-5,93
15	-11,93	-11,93	-11,93	47	-9,62	-9,48	-9,56	79	-6,12	-5,58	-5,83
16	-11,84	-11,84	-11,84	48	-9,58	-9,46	-9,53	80	-6,02	-5,49	-5,76
17	-11,74	-11,74	-11,74	49	-9,57	-9,44	-9,51	81	-5,93	-5,41	-5,66
18	-11,65	-11,65	-11,65	50	-9,56	-9,40	-9,48	82	-5,83	-5,29	-5,58
19	-11,57	-11,57	-11,57	51	-9,53	-9,38	-9,46	83	-5,76	-5,19	-5,49
20	-11,48	-11,48	-11,48	52	-9,51	-9,29	-9,44	84	-5,66	-5,05	-5,41
21	-11,40	-11,40	-11,40	53	-9,48	-9,22	-9,41	85	-5,58	-4,94	-5,29
22	-11,32	-11,32	-11,32	54	-9,46	-9,10	-9,38	86	-5,49	-4,77	-5,19
23	-11,24	-11,24	-11,24	55	-9,44	-9,01	-9,29	87	-5,41	-4,64	-5,05
24	-11,17	-11,17	-11,17	56	-9,40	-8,86	-9,22	88	-5,29	-4,43	-4,94
25	-11,10	-11,10	-11,10	57	-9,38	-8,75	-9,10	89	-5,19	-4,29	-4,77
26	-11,03	-11,03	-11,03	58	-9,29	-8,57	-9,01	90	-5,05	-4,04	-4,64
27	-10,96	-10,96	-10,96	59	-9,22	-8,45	-8,86	91	-4,94	-3,89	-4,43
28	-10,89	-10,89	-10,89	60	-9,10	-8,24	-8,75	92	-4,77	-3,58	-4,29
29	-10,82	-10,82	-10,82	61	-9,01	-8,10	-8,57	93	-4,64	-3,40	-4,04
30	-10,76	-10,74	-10,76	62	-8,86	-7,87	-8,45	94	-4,43	-3,01	-3,89
31	-10,69	-10,65	-10,69	63	-8,75	-7,73	-8,24	95	-4,29	-2,81	-3,58
32	-10,63	-10,58	-10,63	64	-8,57	-7,50	-8,10	96	-4,04	-2,61	-3,40
33	-10,57	-10,51	-10,57	65	-8,45	-7,35	-7,87	97	-3,89	-2,41	-3,01
								98	-3,58	-2,21	-2,81

На рис. 2 сравниваются частотные зависимости реальной и мнимой части постоянной распространения, рассчитанной по формулам (1)–(4) и полученной в строгом решении для профилей 1 и 2, показанных на рис. 1. Абсолютная погрешность вычислений  $\nu(f)$  по методу полного поля с помощью последовательных приближений не превышала  $10^{-7}$ .

Все модели дают близкие значения реальной части постоянной распространения (фазо-

вой скорости распространения радиоволн), отличающиеся на единицы процентов, поэтому резонансные частоты в рамках все трех моделей оказываются близкими. Отличия в мнимой части или затухании радиоволн более заметны. При этом эталонная модель постоянной распространения [3] и профиль проводимости 2 дают близкие зависимости (кривые 4 и 6), тогда как затухание, полученное в рамках классического профиля проводимости [10] (кривая 5), заметно отличается от эталона.

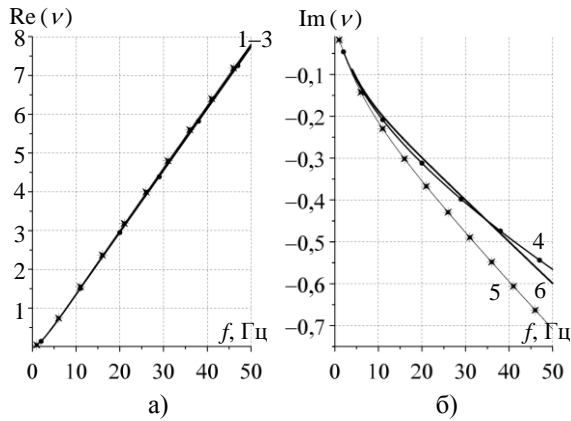


Рис. 2. Дисперсионные зависимости: а) действительная часть постоянной распространения: линии 1–3 показывают  $\text{Re}[v(f)]$  для модели [3], для классического профиля [10] и нового профиля проводимости; б) мнимая часть постоянной распространения: 4 – эталонная модель [3], 5 – классический профиль [10], 6 – новый профиль

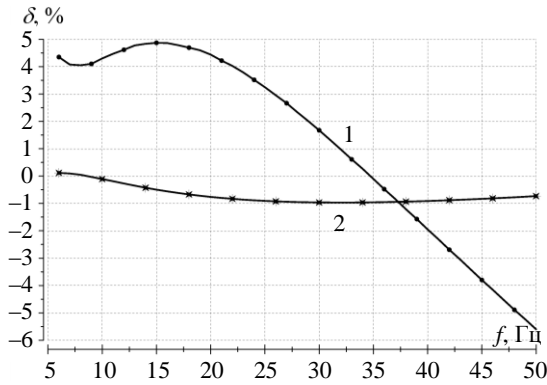


Рис. 3. Относительные отклонения реальной (кривая 1) и мнимой (кривая 2) частей постоянной распространения, полученной для профиля 2 относительно эталонной модели [3]

Относительные отклонения реальной (кривая 1) и мнимой частей (кривая 2) постоянной распространения показаны на рис. 3. Кривая 1 отвечает отклонениям реальной части постоянной распространения (5), а кривая 2 – мнимой части, описываемой формулой (6):

$$\delta_R = 100\{\text{Re}[v_2(f)] - \text{Re}[v_0(f)]\} / \text{Re}[v_0(f)]; \quad (5)$$

$$\delta_I = 100\{\text{Im}[v_2(f)] - \text{Im}[v_0(f)]\} / \text{Im}[v_0(f)]. \quad (6)$$

Здесь  $v_0(f)$  – эталонная зависимость, определяемая формулами (1)–(4), а  $v_2(f)$  – постоянная распространения, найденная для профиля 2 с помощью метода полного поля.

Графики на рис. 3 показывают, что во всем диапазоне частот шумановского резонанса профиль 2 дает постоянную распространения, близкую к эталонной: отклонения фазовой скорости СНЧ-радиоволн не превышают 1%, а затухания – 5%. Поэтому профиль, параметры которого приведены в табл. 1, можно использовать при моделировании глобального электромагнитного

резонанса полости Земля–ионосфера, включая прямые методы расчета поля, такие как *FDTD*.

Реалистичность предложенного профиля проводимости можно подтвердить также, сравнив расчетное затухание радиоволн с данными прямых его измерений с помощью узкополосных сигналов СНЧ-радиопередатчиков [28–30]. Данные работы [28] основаны на систематическом мониторинге амплитуды сигналов передатчика ВМС США, называемого *Wisconsin Test Facility (WTF)*, на мировой сети пунктов приема. Данные приведены на частоте 76 Гц, где среднее наблюдаемое погонное затухание радиоволн составило 0,82 дБ/Мм в ночных условиях и 1,33 дБ/Мм днем (1 Мм = 1 000 км). Среднее затухание на этой частоте равно 1,08 дБ/Мм. Относительное стандартное отклонение данных с учетом сезонных изменений можно оценить величиной  $\pm 25\%$ .

Мнимая часть постоянной распространения на этой частоте для предложенного выше профиля равна 0,86, что соответствует погонному затуханию в 1,17 дБ/Мм. Полученное затухание, на наш взгляд, совпадает с данными измерений, что несомненно говорит в пользу модели.

В работах [29, 30] приведена мнимая часть постоянной распространения, измеренная на частоте 82 Гц, равная  $\text{Im}[v(f)]|_{f=82} = 0,9225$ . Она соответствует погонному затуханию  $\alpha = 1,25$  дБ/Мм и была получена из дистанционной зависимости амплитуды вертикальной электрической компоненты поля, излученной Кольским передатчиком (КП) ВМФ СССР. Таким образом, мнимая часть модельной постоянной распространения, равная  $\text{Im}[v(f)]|_{f=82} = 0,9162$ , снова практически совпадает с величиной, измеренной экспериментально. Сопоставление с данными наблюдений искусственных СНЧ-радиосигналов (см. табл. 2) дает еще одно подтверждение применимости предложенного модельного профиля проводимости.

### 3. Сравнение энергетических спектров.

Чтобы наглядно показать близость результатов, полученных с помощью предложенного профиля и эталонной модели [3], построим энергетические спектры вертикальной электрической компоненты поля (см. рис. 4). Чтобы устранить влияние пространственного распределения источников на наблюдаемую форму спектра, мы приняли, что мировые грозы равномерно покрывают земной шар [17]. В этом случае с точностью до константы энергетический спектр описывается следующим соотношением [1, 2]:

$$|E(f)|^2 = \left| \text{Ids}(\omega) \frac{v(v+1)}{\omega} \right|^2 \sum_{n=0}^{\infty} \frac{2(2n+1)}{|n(n+1) - v(v+1)|^2}. \quad (5)$$

Здесь  $\omega = 2\pi f$  – круговая частота;  $n = 1, 2, 3, \dots$  – номер шумановского резонансного мода;  $I_{ds}(\omega)$  – токовый момент источника, неизменный в области частот глобального резонанса.

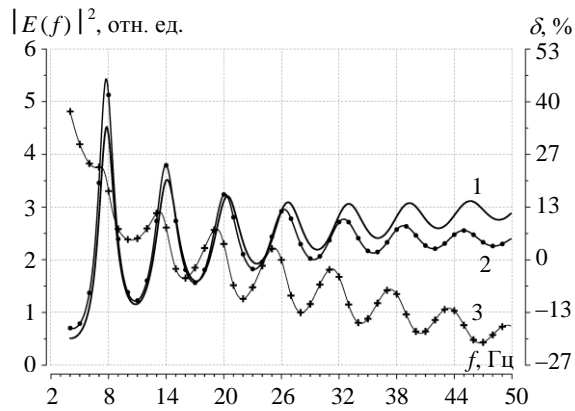


Рис. 4. Расчетные спектры шумановского резонанса при равномерном распределении источников по Земле: 1 – энергетический спектр вертикального электрического поля, полученный для профиля 2 (рис. 1); 2 – спектр, вычисленный в эталонной модели; 3 – относительные отклонения (в %) расчетного спектра от эталонного (показаны вдоль правой оси ординат)

На рис. 4 представлены два резонансных спектра. Кривая 1 показывает расчетные данные для предложенного вертикального профиля проводимости атмосферы, а кривая 2 – это спектр, полученный для эталонной зависимости постоянной распространения от частоты [3]. Относительные отклонения от эталонного спектра в процентах показаны кривой 3, построенной относительно правой оси ординат. Сравнивая рис. 3 и 4, мы видим, что отличия моделей друг от друга ярче проявляются в форме спектров, а не в кривых дисперсии  $v(f)$ . Даже небольшие отличия фазовой скорости радиоволн, равные  $\sim 1\%$ , отчетливо видны в спектрах, поскольку пиковые частоты высших типов колебаний заметно расходятся. Кривая 3 на рис. 4 иллюстрирует относительные отклонения энергетического спектра, вычисленного с помощью предложенного профиля проводимости. Девиации лежат в диапазоне от  $-5$  до  $+15\%$  во всем диапазоне частот шумановского резонанса, что в 3–4 раза меньше, чем отклонения, характерные для классического профиля [3].

**4. Учет неоднородности день–ночь.** Профиль проводимости хорошо согласуется с наблюдениями шумановского резонанса и измерениями затухания радиоволн с помощью искусственных СНЧ-радиосигналов. Это позволяет продвинуться дальше и ввести зависимости  $\sigma(h)$ , отвечающие дневным и ночным условиям. Соответствующие графики показаны на рис. 5.

Вдоль горизонтальной оси рис. 5 отложен логарифм проводимости воздуха, а по вертикальной – высота над Землей. Гладкая линия (кривая 2) на этом рисунке воспроизводит профиль  $\sigma(h)$ ,

показанный на рис. 1 линией 2. На рис. 5 кривая 1 отвечает проводимости в ночных условиях, когда ионосфера «приподнимается» над Землей, а кривая 3 – в дневных.

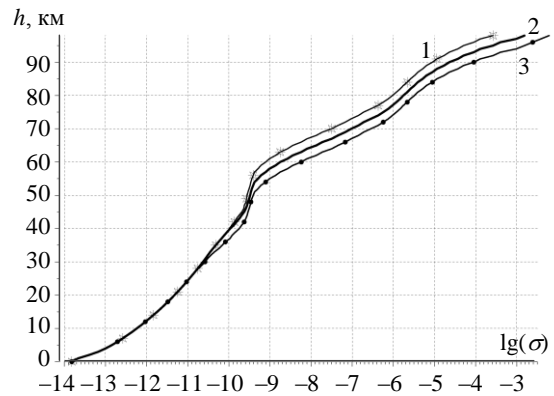


Рис. 5. Вертикальные профили проводимости атмосферы: 1 – профиль для дневных условий; 2 – средний профиль; 3 – профиль для ночных условий

Пользуясь методом полного поля, мы рассчитали частотные зависимости комплексной постоянной распространения для дневных и ночных условий и сравнили полученные данные с эталонной моделью. При известных постоянных распространения можно рассчитать энергетические спектры резонансных колебаний в «дневных» и «ночных» условиях. Мы не исследуем влияние неоднородности ионосферы «день–ночь» на глобальные электромагнитные резонансы. Поэтому термин «дневные условия» означает, что горизонтально однородная ионосфера Земли повсюду описывается одним и тем же дневным профилем проводимости. Аналогичным образом слова «ночные условия» означают, что профиль ионосферы над всеми точками земной поверхности – ночной.

Чтобы устранить в получаемых данных влияние дистанции от источника до наблюдателя, снова используется равномерное распределение источников по поверхности планеты. Очевидно, что полученные таким образом «дневной» и «ночной» спектры описывают две крайние ситуации полностью «дневного» или полностью «ночного» резонатора, спектр реального резонатора с неоднородностью «день–ночь» должен находиться между этими крайними кривыми.

Рис. 6 иллюстрирует расчетные данные для ночного и дневного профилей проводимости. Графики на рис. 6, а показывают, что во всем диапазоне шумановского резонанса эталонное затухание (кривая 1) лежит между значениями, полученными для ночного (кривая 2) и дневного (кривая 3) профиля проводимости. На рис. 6, б показаны графики энергетических спектров вертикального электрического поля.

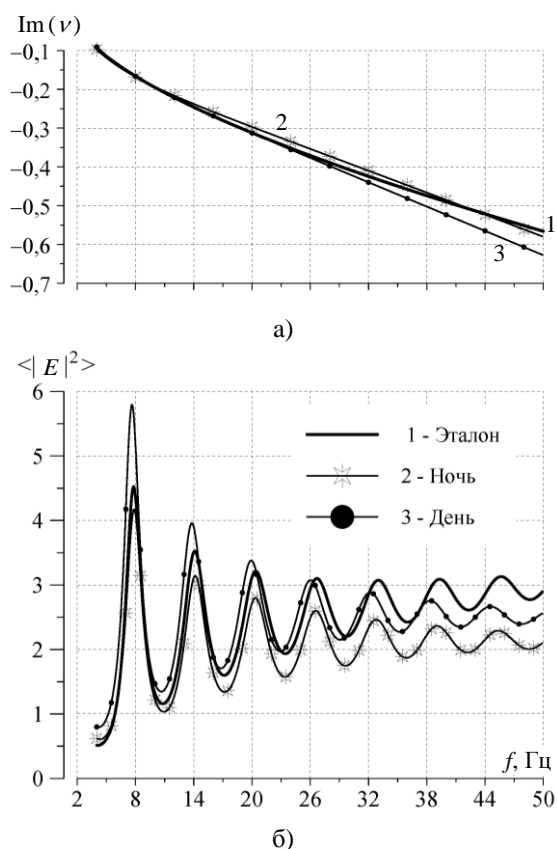


Рис. 6. Затухание радиоволн (а) и расчетные энергетические спектры вертикального электрического поля (б) шумановского резонанса при равномерном распределении источников по Земле

Как и ожидалось, резонансные пики в энергетическом спектре «ночного» резонатора лежат выше, чем пики «дневного». Резонансные частоты и добротности для ночного профиля проводимости также превышают соответствующие значения для дневной ионосферы. Что же касается энергетического спектра, полученного для эталонной постоянной распространения, то он занимает промежуточное положение между дневным и ночным спектрами. Таким образом, расчеты энергетических спектров подтверждают реалистичность дневного и ночного профилей проводимости, показанных на рис. 5 и приведенных в табл. 1.

**5. Обсуждение результатов.** Предложенный высотный профиль проводимости атмосферы, с одной стороны, близок к классическим представлениям, а с другой – хорошо согласуется с результатами наблюдений глобального электромагнитного резонанса. С помощью строгого решения задачи электродинамики при использовании предложенного профиля получается реалистичная зависимость постоянной распространения от частоты. С одной стороны, она оказывается близкой к эталонной зависимости, применяемой в области частот шумановского резонанса. С другой стороны, модельные значения весьма близки к затуханию, измеренному при наблюдениях искусственных СНЧ-радиосигналов на частотах выше шумановского резонанса [28–30]. Мы приводим соответствующие данные в табл. 2.

Таблица 2

Затухание радиоволн на дискретных частотах, измеренное экспериментально и полученное с помощью профилей проводимости

Данные	$\langle \text{Im}(v) \rangle$	$\langle \alpha \rangle$ , дБ/Мм	$\text{Im}(v)$ , день	$\alpha$ , день, дБ/Мм	$\text{Im}(v)$ , ночь	$\alpha$ , ночь, дБ/Мм
$f = 76$ Гц, модель	0,86	1,17	0,96	1,31	0,75	1,02
$f = 76$ Гц, эксперимент [28]	–	1,08	–	1,33	–	0,82
$f = 82$ Гц, модель	0,92	1,25	1,01	1,38	0,79	1,08
$f = 82$ Гц, эксперимент [29, 30]	–	1,26	–	–	–	–

Здесь сравниваются расчетные данные по затуханию радиоволн, полученные для профиля проводимости, представленного в табл. 1, и опубликованные результаты измерений с помощью сигналов СНЧ-радиопередатчиков. Данные на частоте 76 Гц взяты из обзорной статьи [28], в которой подведены итоги многолетних наблюдений сигналов висконсинского передатчика ВМС США (*WTF*) в различных пунктах наблюдения. Результаты для частоты 82 Гц относятся к измерениям дистанционных изменений амплитуды поля от Кольского радиопередатчика ВМФ СССР [29, 30]. Здесь необходимо пояснить, что в модельных

расчетах получают безразмерную величину  $\text{Im}(v)$ , измеряемую в неперх/радиан. В эксперименте находят погонное затухание радиоволн  $\alpha$ , измеряемое в децибеллах на Мм. Эти величины связаны следующим соотношением:

$$\alpha = \pi \lg(e) \text{Im}(v) \approx 1,346 \text{Im}(v). \quad (6)$$

В табл. 2 модельные значения  $\text{Im}(v)$  пересчитаны по этой формуле к эквивалентному погонному затуханию  $\alpha$  в дБ/Мм. Как видно из табл. 2, среднее модельное затухание на частоте 76 Гц должно быть равно 1,17 дБ/Мм. Экспериментально измеренное значение составляет

1,08 дБ/Мм, что соответствует отклонению около 7 %. Относительные различия модельного и измеренного дневного и ночного затухания равны соответственно 2 и 24 %. На частоте 82 Гц величины затухания практически равны и составляют 1,25 дБ/Мм при взаимном отклонении меньше 1 %. Рассмотренный нами вертикальный профиль проводимости воздуха оказывается состоятельным не только в диапазоне глобального электромагнитного резонанса, но и на частотах СНЧ-радиосвязи, лежащих выше резонанса.

**Выводы.** Проведенный анализ и сравнение полученных результатов с имеющимися литературными данными позволяют утверждать, что рассмотренный нами вертикальный профиль проводимости атмосферы близок к реальности. Во-первых, он согласуется с классическими представлениями об ионизации воздуха. Во-вторых, его применение в методе полного поля позволило получить реалистичную зависимость постоянной распространения от частоты в диапазоне шумановского резонанса, близкую к эталонной. В-третьих, эта постоянная распространения хорошо согласуется с данными измерений искусственных радиосигналов СНЧ-диапазона.

#### Библиографический список

1. *Nickolaenko A. P.* Resonances in the Earth-ionosphere cavity / A. P. Nickolaenko, M. Hayakawa. – Dordrecht-Boston-L.: Kluwer Academic Publ., 2002. – 380 p.
2. *Nickolaenko A.* Schumann resonance for tyros (Essentials of Global Electromagnetic Resonance in the Earth-Ionosphere Cavity) / A. Nickolaenko, M. Hayakawa. – Tokyo-Heidelberg-N. Y.-Dordrecht-L.: Springer, 2014. – Ser. XI. Springer Geophysics. – 348 p.
3. *Ishaq M.* Method of obtaining radiowave propagation parameters for the Earth-ionosphere duct at ELF / M. Ishaq, D.L.I. Jones // *Electronic Lett.* – 1977. – 13, N 2. – P. 254–255.
4. *Кириллов В.В.* Электромагнитные волны СНЧ-диапазона в волноводе Земля-ионосфера / В. В. Кириллов, В. Н. Копейкин, В. К. Муштак // *Геомагнетизм и аэронавигация.* – 1997. – 37, № 3. – С. 114–120.
5. *Кириллов В. В.* Двумерная теория распространения электромагнитных волн СНЧ-диапазона в волноводе Земля-ионосфера / В. В. Кириллов // *Изв. вузов. Радиофизика.* – 1996. – 39, № 12. – С. 1103–1112.
6. *Кириллов В. В.* Решение двумерных телеграфных уравнений с анизотропными параметрами / В. В. Кириллов, В. Н. Копейкин // *Изв. вузов. Радиофизика.* – 2002. – 45, № 12. – С. 1011–1024.
7. *Pechony O.* Schumann resonance parameters calculated with a partially uniform knee model on Earth, Venus, Mars, and Titan / O. Pechony, C. Price // *Radio Sci.* – 2004. – 39, Iss. 5. – RS5007 (10 p.).
8. *Yang H.* Three-dimensional finite-difference time domain modeling of the Earth-ionosphere cavity resonances / H. Yang, V. P. Pasko // *Geophys. Res. Lett.* – 2005. – 32, Iss. 3. – L03114 (4 p.).
9. *A numerical simulation of Earth's electromagnetic cavity with the Transmission Line Matrix method: Schumann resonances* / J. A. Morente, G. J. Molina-Cuberos, J. A. Port et al. // *J. Geophys. Res.* – 2003. – 108, Iss. A5. – P. SIA 17-1–17-11.
10. *Cole R. K.* Electrification in the Earth's atmosphere from altitudes between 0 and 100 kilometers / R. K. Cole, E. T. Pierce // *J. Geophys. Res.* – 1965. – 70, N 11. – P. 2735–2749.
11. *Mushtak V. C.* Propagation parameters for uniform models of the Earth-ionosphere waveguide / V. C. Mushtak, E. Williams // *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* – 2002. – 64, N 6. – P. 1989–2001.
12. *Greifinger C.* Approximate method for determining ELF eigenvalues in the Earth-ionosphere waveguide / C. Greifinger, P. Greifinger // *Radio Sci.* – 1978. – 13, N 5. – P. 831–837.
13. *Николаенко А. П.* О возможности существования глобальных электромагнитных резонансов на планетах Солнечной системы / А. П. Николаенко, Л. М. Рабинович // *Космические исслед.* – 1982. – 20, № 1. – С. 82–89.
14. *Николаенко А. П.* О применимости сверхнизко-частотных глобальных резонансов для исследования грозовой активности Венеры / А. П. Николаенко, Л. М. Рабинович // *Космические исслед.* – 1987. – 25, № 2. – С. 301–306.
15. *Sentman D. D.* Electrical conductivity of Jupiter Shallow interior and the formation of a resonant planetary-ionospheric cavity / D. D. Sentman // *ICARUS.* – 1990. – 88, Iss. 1. – P. 73–86.
16. *Füllekrug M.* Dispersion relation for spherical electromagnetic resonances in the atmosphere / M. Füllekrug // *Phys. Lett. A.* – 2000. – 275, Iss. 1–2. – P. 80–89.
17. *Williams E. R.* Distinguishing ionospheric models using Schumann resonance spectra / E. R. Williams, V. C. Mushtak, A. P. Nickolaenko // *J. Geophys. Res.* – 2006. – 111, N D16. – D16107 (12 p.).
18. *Parallel 3D-TLM algorithm for simulation of the Earth-ionosphere cavity* / S. Toledo-Redondo, A. Salinas, J. A. Morente-Molina et al. // *J. Computational Phys.* – 2013. – 236, N 3. – P. 367–379.
19. *Schumann resonances as a tool to study the lower ionospheric structure of Mars* / G. J. Molina-Cuberos, J. A. Morente, B. P. Besser et al. // *Radio Sci.* – 2006. – 41, Iss. 1. – RS1003 (8 p.).
20. *Diurnal and seasonal variations in the Schumann resonance parameters observed at Chinese observatories* / H. Zhou, H. Yu, B. Cao, X. Qiao // *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* – 2013. – 98, N 1. – P. 86–96.
21. *Sentman D. D.* Approximate Schumann resonance parameters for a two-scale-height ionosphere / D. D. Sentman // *J. Atmos. Terr. Phys.* – 1990. – 52, N 1. – P. 35–46.
22. *Greifinger P. S.* On modeling the lower characteristic ELF altitude from aeronautical data / P. S. Greifinger, V. C. Mushtak, E. R. Williams // *Radio Sci.* – 2007. – 42, Iss. 2. – RS2S12 (12 p.).
23. *Гюннинен Э. М.* Поле вертикального электрического диполя над сферической землей с неоднородной по высоте ионосферой / Э. М. Гюннинен, Ю. П. Галюк // *Проблемы дифракции и распространения радиоволн.* – Вып. 11. – Л.: ЛГУ, 1972. – С. 109–120.
24. *О резонансных явлениях в полости Земля-ионосфера* / П. В. Блюх, Ю. П. Галюк, Э. М. Гюннинен и др. // *Изв. вузов. Радиофизика.* – 1977. – 20, № 4. – С. 501–509.
25. *Блюх П. В.* Глобальные электромагнитные резонансы в полости Земля-ионосфера / П. В. Блюх, А. П. Николаенко, Ю. Ф. Филиппов. – К.: Наук. думка, 1977. – 199 с.
26. *Галюк Ю. П.* Определение характеристик распространения СДВ-полей в волноводе Земля-неоднородная по высоте анизотропная ионосфера / Ю. П. Галюк, В. И. Иванов // *Проблемы дифракции и распространения радиоволн.* – Вып. 16. – Л.: ЛГУ, 1978. – С. 148–153.
27. *Галюк Ю. П.* Модель колена: сравнение точного и эвристического решения задачи о шумановском резонансе / Ю. П. Галюк, А. П. Николаенко, М. Хайкава // *Радиофизика и электрон.* – 2015. – 6(20), № 2. – С. 40–46.
28. *Bannister P. R.* Further examples of seasonal variations of ELF radio propagation parameters / P. R. Bannister // *Radio Sci.* – 1999. – 34, N 1. – P. 199–208.
29. *Николаенко А. П.* Определение СНЧ-затухания по дистанционной зависимости амплитуды радиоволны, возбужденной искусственным источником / А. П. Николаенко //

- Радиофизика и электрон.: сб. науч. тр. / Ин-т радиофизики и электрон. НАН Украины. – X., 2008. – 13, № 1. – С. 40–44.
30. Nickolaenko A. P. ELF Attenuation Factor Derived from Distance Dependence of Radio Wave Amplitude Propagating from an Artificial Source / A. P. Nickolaenko // Telecommunications and Radio Engineering. – 2008. – 67, Iss. 18. – P. 1621–1629.

*Рукопись поступила 13.05.2015.*

A. P. Nickolaenko, Yu. P. Galuk, M. Hayakawa

#### VERTICAL PROFILE OF ATMOSPHERIC CONDUCTIVITY CORRESPONDING TO SCHUMANN RESONANCE PARAMETERS

Constructing a realistic vertical conductivity profile of atmosphere remains an update task for the direct electromagnetic modeling of global electromagnetic (Schumann) resonance. The conductivity data are obligatory when accounting for influence of various factors on the ionosphere: the space weather or the seismic activity. The knowledge of the regular profile is of particular importance, as it must provide in computations the actually observed values of Schumann resonance parameters in undisturbed conditions. Using the classical data, we suggested a new height profile of atmospheric conductivity in the range from 2 to 98 km, which allows obtaining the Schumann resonance parameters consistent with observations. Using the method of the full wave solution, we computed the extremely low frequency (ELF) propagation constant that corresponds to this profile of atmospheric conductivity. The high correspondence of the results obtained to the standard radio propagation model based on the Schumann resonance data is demonstrated. The conductivity profiles are also suggested for ambient day and ambient night conditions. Using the full wave solution, we computed the relevant propagation constants. The power spectra of Schumann resonance in the vertical component of the electric field were computed and compared for the globally uniform distribution of thunderstorms in the framework of standard model and different conductivity profiles. Reciprocity of data obtained to the measurements of ELF radio transmissions is demonstrated.

**Key words:** vertical profile of atmospheric conductivity, ELF radio propagation constant, power spectra of Schumann resonance, attenuation factor of ELF radio transmissions.

О. П. Ніколаєнко, Ю. П. Галюк, М. Хайакава

#### ВЕРТИКАЛЬНИЙ ПРОФІЛЬ ПРОВІДНОСТІ АТМОСФЕРИ, ЩО ВІДПОВІДАЄ ПАРАМЕТРАМ ШУМАНІВСЬКОГО РЕЗОНАНСУ

Пошук реалістичного вертикального профілю провідності атмосфери залишається актуальною задачею при прямому електромагнітному моделюванні глобального електромагнітного (шуманівського) резонансу. Потреба в профілі обумовлена необхідністю враховувати вплив на йоносферу різних факторів космічної погоди або сейсмічної активності. При цьому особливого значення набуває знання регулярного профілю, що дозволяє отримувати в розрахунках реально спостережувані значення параметрів шуманівського резонансу в незбурених умовах. Спираючись на класичні дані, ми розробили новий висотний профіль провідності атмосфери в інтервалі від 2 до 98 км, який дозволяє отримувати параметри шуманівського резонансу, що узгоджуються зі спостереженнями. За допомогою методу повного поля була обчислена стала поширення наднизькочастотних (ННЧ) радіохвиль, що відповідає цьому профілю. Продемонстрована відповідність отриманої залежності до еталонної моделі, заснованої на ресстраціях глобального електромагнітного резонансу. Запропоновано також профілі провідності для нічних і денних умов поширення. Для цих профілів за методом повного поля були обчислені відповідні сталі поширення. Розраховано та зіставлено енергетичні спектри шуманівського резонансу у вертикальній електричній компоненті поля при рівномірному глобальному розподілі світових гроз як для стандартної моделі, так і для різних профілів провідності. Продемонстрована узгодженість отриманих модельних даних з результатами вимірювань радіовипромінювання ННЧ-передавачами.

**Ключові слова:** вертикальний профіль провідності повітря, стала поширення ННЧ-радіохвиль, енергетичні спектри шуманівського резонансу, коефіцієнт загасання радіохвиль від ННЧ-передавачів.