

Эмпирическое описание вариаций резонансных частот шумановских резонансов в Томске

С.А. Колесник

*Национальный исследовательский Томский государственный университет
634050, г. Томск, пр. Ленина, 36
E-mail: serkol@mail.tsu.ru*

Представлены результаты мониторинговых исследований спектральных характеристик шумановских резонансов в Томске в период с 1997 года по настоящее время. Основным результатом является эмпирическое описание сезонно-суточных вариаций и долгопериодные тренды резонансных частот первых четырех мод шумановских резонансов.

Ключевые слова: мониторинг, эмпирическая модель, шумановские резонансы, резонансные частоты

Empirical description of variations in the resonant frequencies of Schumann resonances in Tomsk

S.A. Kolesnik

Tomsk State University

The results of monitoring studies of the spectral characteristics of Schumann resonances in Tomsk in the period from 1997 to the present are presented. The main result is an empirical description of seasonal-diurnal variations and long-period trends in the resonant frequencies of the first four modes of Schumann resonances.

Keywords: monitoring, empirical model, Schumann resonances, resonant frequencies

Введение

Проводимые с марта 1997 года в Томском государственном университете измерения электромагнитных полей крайне низких частот в режиме непрерывного мониторинга позволили накопить большой объем уникальных данных. Методика проведения измерений, изложенная в [1], позволяет определять основные резонансные характеристики (частоты, амплитуды и добротности) для первых четырех мод шумановских резонансов.

Проведенные исследования позволили определить вид изменений во времени среднемесячных значений резонансных частот за весь период наблюдений (с марта 1997г. по март 2024г.). Для каждой резонансной частоты имеет место годовая повторяемость. Также у каждой резонансной частоты есть свой характерный сезонный ход. Наряду с сезонными изменениями имеют место изменения с масштабом порядка суток и менее.

Таким образом, установлено, что вариации резонансных частот имеют выраженную квазипериодическую зависимость от времени, это отмечалось и ранее в [2, 3].

Эмпирическая модель шумановских резонансных частот

Полученные эмпирические зависимости, описанные в [3], указывают на довольно устойчивую повторяемость наблюдаемых значений резонансных частот, что подразумевает существование временных периодичностей, обуславливающих характер данного явления. Количественная оценка наблюдаемого явления позволит разделить на

регулярные и прочие временные изменения. Для описания вклада регулярных временных изменений была построена эмпирическая модель, описывающая динамику изменений резонансных частот для первых четырех мод.

При построении этой модели в качестве исходных данных были взяты для каждого часа среднемесячные значения резонансных частот первых четырех мод с марта 1997 года по март 2024 года. Спектральный анализ этих вариаций показал, что доминирующими по амплитуде являются 24-, 12-, 8- часовые гармоники, что, в свою очередь, определило выбор вида эмпирической модели:

$$f(m, t) = \langle f(m) \rangle + \sum_{i=1}^3 (I_i(m) \cos(2\pi t \frac{i}{24}) - Q_i(m) \sin(2\pi t \frac{i}{24})) + Trend + \Delta, \quad (1)$$

где $f(m, t)$ – резонансная частота,

m – номер месяца,

t – местное время в часах,

$Trend$ – низкочастотный длиннопериодный тренд,

Δ – остаточная часть,

$\langle f(m) \rangle$, $I_i(m)$ и $Q_i(m)$ – среднее значение и квадратурные составляющие, определяющие сезонные гармонические колебания параметров суточного разложения ($F(m)$).

Здесь также спектральный анализ вариаций $F(m)$ показал, что доминирующими по амплитуде являются 12-, 6- и 4- месячные гармоники, что, в свою очередь, определило выбор вида параметров суточного разложения:

$$F(m) = A_0 + \sum_{j=1}^3 \left(C_j \cos\left(2\pi m \frac{j}{12}\right) - S_j \sin\left(2\pi m \frac{j}{12}\right) \right). \quad (2)$$

В таблицах 1 – 4 представлены численные значения спектральных параметров двумерного гармонического разложения и их амплитуд:

$$A_j = \sqrt{C_j^2 + S_j^2}. \quad (3)$$

Таблица 1. Спектральные параметры для расчета первой резонансной частоты, выраженные в мГц

i	Параметр	A0	j=1			j=2			j=3		
			C1	S1	A1	C2	S2	A2	C3	S3	A3
0	$\langle f(m) \rangle$	7835	18	6	19	-4	12	13	4	-3	5
1	$I1(m)$	7	57	1	57	-11	0	11	5	0	5
	$Q1(m)$	-21	17	2	17	0	-5	5	-6	1	6
2	$I2(m)$	-4	-8	0	8	-1	3	3	0	0	0
	$Q2(m)$	-14	-10	-5	11	0	5	5	-1	0	1
3	$I3(m)$	-1	10	5	11	1	-1	1	0	-1	1
	$Q3(m)$	2	-3	0	3	1	1	2	0	1	1

Таблица 2. Спектральные параметры для расчета второй резонансной частоты, выраженные в мГц

i	Параметр	A0	j=1			j=2			j=3		
			C1	S1	A1	C2	S2	A2	C3	S3	A3
0	$\langle f(m) \rangle$	14049	-84	0	84	-6	0	6	21	9	23
1	$I1(m)$	87	117	18	118	-22	3	23	-8	3	8
	$Q1(m)$	5	-15	16	22	-3	-24	25	0	6	6
2	$I2(m)$	-19	-38	-36	52	16	-13	20	-3	5	6
	$Q2(m)$	11	40	1	40	2	16	17	-4	-2	4
3	$I3(m)$	-43	-29	1	29	-6	4	8	5	-1	5
	$Q3(m)$	-17	9	4	10	12	1	12	2	0	2

Таблица 3. Спектральные параметры для расчета третьей резонансной частоты, выраженные в мГц

i	Параметр	A0	j=1			j=2			j=3		
			C1	S1	A1	C2	S2	A2	C3	S3	A3
0	$\langle f(m) \rangle$	20029	54	-21	58	80	-38	89	-16	12	21
1	I1(m)	164	12	3	12	-86	7	86	26	-11	28
	Q1(m)	-43	-48	17	51	39	-1	40	-1	-3	4
2	I2(m)	103	-65	-28	71	-37	-12	39	0	12	12
	Q2(m)	-1	18	10	20	-25	14	29	8	-5	10
3	I3(m)	-27	5	-9	10	48	17	51	-4	-4	6
	Q3(m)	-14	29	-12	31	-3	-1	3	-5	5	8

Таблица 4. Спектральные параметры для расчета четвертой резонансной частоты, выраженные в мГц

i	Параметр	A0	j=1			j=2			j=3		
			C1	S1	A1	C2	S2	A2	C3	S3	A3
0	$\langle f(m) \rangle$	25490	-85	29	90	0	-3	3	-24	1	24
1	I1(m)	100	101	46	111	21	-32	38	-4	0	4
	Q1(m)	41	50	-10	51	5	23	23	-34	-9	36
2	I2(m)	21	-54	-14	56	-30	-14	33	15	4	16
	Q2(m)	20	27	34	43	15	-5	16	5	0	5
3	I3(m)	-19	-33	-9	35	-7	16	17	-3	13	13
	Q3(m)	5	-8	2	8	-3	-4	5	7	-10	12

Из анализа рассчитанных численных значений амплитуд спектральных параметров следует, что значения, меньше 10 мГц, которые ниже порога определения значений резонансных частот, можно не учитывать (эти значения выделены в таблицах 1 – 4 красным цветом), поэтому:

- при расчете первой резонансной частоты можно не учитывать 4-х месячные сезонные гармоники во всех спектральных параметрах, а также 6-ти месячные в 12-ти и 8-ми часовых суточных гармониках, коэффициент детерминации $R^2=0.96$;

- при расчете второй резонансной частоты можно не учитывать 4-х месячные сезонные гармоники во всех суточных гармониках, а также 6-ти месячные в 8-ми часовых суточных гармониках, $R^2=0.98$;

- при расчете третьей резонансной частоты можно не учитывать только 4-х месячные сезонные гармоники и только в 8-ми часовых суточных гармониках. $R^2=0.93$;

- при расчете четвертой резонансной частоты коэффициент детерминации $R^2=0.85$.

В качестве примера на рис. 1 представлено сезонно-суточное распределение первой резонансной частоты.

Низкочастотные длиннопериодные тренды для первых четырех резонансных частот представлены на рис. 2. Ранее в [3] на более коротком временном ряду эти тренды можно было описать полиномами 7-ой степени. Сегодня уже ясно, что это описание не подходит к эмпирическому описанию 27-летнего ряда. В работах [4, 5] на разных длительностях, в разное время и в разных регионах Земли делается попытка объяснения поведения тренда только для первой резонансной частоты под влиянием 11 летнего цикла солнечной активности. Но здесь тоже появляются разные не стыковки, такие как опережающее изменение в тренде первой резонансной частоты по сравнению с изменениями в солнечной активности, а по данным, полученным в Томске, наблюдается разное поведение трендов на резонансных частотах. В результате проведенного спектрального анализа, оказалось, что наибольшее значение приходится на амплитуду самой длиннопериодической гармоники (27-летней), 11-летней гармоники вообще не

наблюдается. Поэтому, скорее всего такое поведение трендов обусловлено какими-то длиннопериодными климатическими изменениями, и не связано с 11-летним циклом солнечной активности.

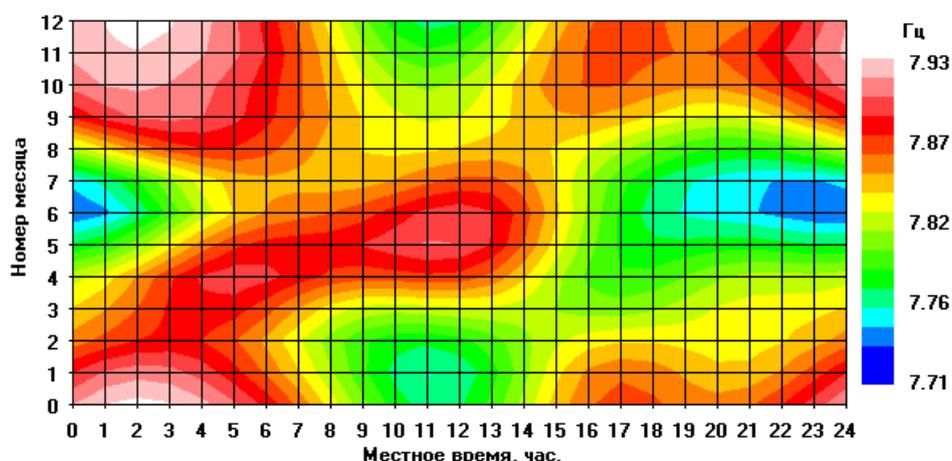


Рис. 1. Сезонно-суточное распределение первой резонансной частоты

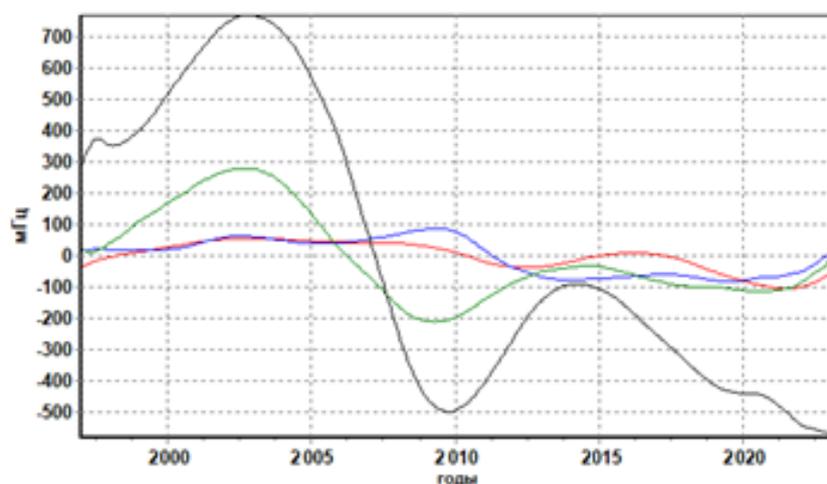


Рис. 2. Низкочастотные длиннопериодные тренды первых четырех резонансных частот (тренд первой – красный цвет, второй – синий, третьей – зеленый, четвертой – черный)

Заключение

Вариации резонансных частот первых четырех мод шумановских резонансов имеют выраженную квазипериодическую зависимость от времени суток и сезона года.

Медленные изменения (тренды) обусловлены длиннопериодными климатическими изменениями.

Литература

1. Колесник А.Г., Колесник С.А., Колмаков А.А., Шинкевич Б.М. Шумановские резонансы. 1. Мониторинг электромагнитного фона КНЧ диапазона Изв. ВУЗов. Физика. 2003. N 2. С.69-73.
2. Колесник А.Г., Колесник С.А., Колмаков А.А., Марков Г.А., Нагорский П.М., Шинкевич Б.М. Шумановские резонансы. 2.Сезонно-суточные вариации резонансных частот Изв. ВУЗов. Физика. 2003. N 11. С.92-95.
3. Деревянных А.А., Колесник А.Г., Колесник С.А. Эмпирическая модель резонатора шумановских резонансов // Изв. вузов. Физика, 9/3. – Томск: ТГУ, 2010. – С. 266-267

4. Koloskov, O. V., Nickolaenko, A. P., Yampolski, Y. M., & Budanov, O. V. (2022). Electromagnetic seasons in Schumann resonance records. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 127, e2022JD036582. <https://doi.org/10.1029/2022JD036582>
5. Han, B., Tang, J., Zhao, G. Z., Wang, L. F., Dong, Z. Y., & Xu, Y. C. (2023). Seasonal and interannual variations in the Schumann resonance observed in the ELF electromagnetic networks in China. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 128, e2023JD038602. <https://doi.org/10.1029/2023JD038602>