

УДК 550.344.42

АТМОСФЕРНЫЕ И ФРАГРИТАЦИОННЫЕ ВОЗМУЩЕНИЯ ЯПОНОМОРСКОГО РЕГИОНА

© 2023 г. Академик РАН Г. И. Долгих^{1,*}, М. А. Болсуновский¹, С. Г. Долгих¹

Поступило 21.02.2023 г.

После доработки 10.03.2023 г.

Принято к публикации 13.03.2023 г.

При обработке спутниковых данных полного электронного содержания на трассе между спутниками ГЛОНАСС, GPS и приемными станциями, расположенными на земле в Приморском крае России, выделены инфрагравитационные возмущения, вызванные собственными колебаниями атмосферных слоев япономорского региона, которые оказывают нагружающее воздействие на земную кору и морскую/океаническую поверхность, генерируя в них колебания на соответствующих периодах.

Ключевые слова: полное электронное содержание, спутник, инфрагравитационные возмущения, собственные колебания Атмосферы

DOI: 10.31857/S2686739723600340, **EDN:** RXTBVO

При изучении различных колебательных процессов геосфер первостепенной задачей является поиск их первоисточников. Это позволяет не только их классифицировать и пеленговать, но и определять физические процессы, возбуждавшие данные колебания. При межгеосферном взаимодействии сложно определить первоисточник, особенно в случае, когда регистрирующие установки расположены в одной из геосфер. В качестве примера существования таких колебаний можно упомянуть результаты, описанные в работе [1], полученные на разных измерителях уровня моря, расположенных в различных точках Тихого океана и Японского моря. Регистрируемые ими колебания естественным образом были приписаны океану/моря без определения первоисточника. Таким первоисточником, кроме океана, могут быть атмосферные процессы. Но также нельзя сбрасывать со счетов литосферные процессы, хотя и в меньшей степени. На всех приемных станциях были выделены максимумы в диапазоне периодов от 51 мин 16.3 с до 5 мин 53.6 с. Выделенные колебания на станциях, находящихся в Японском море, при морском происхождении могут относиться как к инфрагравитационным морским волнам [2], так и к собственным колебаниям (сейшам) Японского моря и его отдельных

частей [3]. При анализе данных, полученных на станциях, установленных в Японском море, были выделены общие колебания на периодах в диапазоне 31 мин 58.7 с—30 мин 05.8 с, которые были приписаны одной из мод собственных колебаний Японского моря, что может быть и неверно. Для точного определения первоисточников указанных колебаний необходимы измерительные системы, расположенные в атмосфере на значительном расстоянии от земли и измеряющие колебательные атмосферные процессы.

К одним из подобных измерительных систем можно отнести спутники и станции Глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС). Ионосфера — важный с точки зрения прохождения ГНСС-сигнала слой атмосферы, т.к. именно в этом слое происходят наибольшие его искажения. Ионосферные искажения являются вторым по величине источником ошибок в определении координат приемника. Для ГНСС-сигнала среда ионосферы является диспергирующей, заряженные частицы, содержащиеся в этом слое, взаимодействуют с сигналом и вызывают его задержку или опережение. Благодаря дисперсионной природе ионосферы, используя двухчастотные приемники ГНСС, можно измерять полное электронное содержание (ПЭС или TEC) — интегральная электронная концентрация, характеризующая количество свободных электронов во всей толще ионосферы на вертикальной трассе. ПЭС измеряется в единицах ПЭС (TECU), 1 TECU = 10^{16} электронов на м². ПЭС определяется по задержке (опере-

¹ Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева Дальневосточного отделения Российской академии наук, Владивосток, Россия

*E-mail: dolgikh@poi.dvo.ru

жении) радиосигнала, проходящего через ионосферу. ПЭС можно определить по формуле [4]:

$$\text{ТЕС} = \int N_e ds_0.$$

По сигналам ГНСС, передаваемым на двух различных несущих частотах, f_1 и f_2 , можно рассчитать дифференциальный (относительный) наклонный ПЭС [5]:

$$\text{ТЕС} = \frac{1}{A} \frac{f_1^2 f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} (L_1 \lambda_1 - L_2 \lambda_2 + \text{const} + nL),$$

где $A = 40.308 \text{ м}^3/\text{с}^2$, $L_1 \lambda_1$ и $L_2 \lambda_2$ являются дополнительными путями сигнала, вызванными фазовой задержкой в ионосфере, const — неизвестный начальный фазовый путь, nL — ошибки в определении фазового пути.

Чтобы нормализовать амплитуду ПЭС и избежать влияния низких углов возвышения, наклонный ПЭС можно преобразовать в вертикальный VТЕС, применив формулу [5]:

$$\text{VТЕС} = \text{ТЕС} \cdot \cos \left[\arcsin \left(\frac{R_z}{R_z + H_{\text{ion}}} \cos \theta_s \right) \right],$$

где R_z — радиус Земли, H_{ion} — высота слоя максимальной ионизации, а θ_s — угол возвышения спутника.

Точность дифференциальной оценки ПЭС по фазовым измерениям составляет около 0.01–0.02 TECU [6].

В дальнейшем при анализе мы использовали данные ГНСС, полученные с помощью спутниковых систем ГЛОНАСС (24 спутника на высотах 18 840–19 440 км) и GPS (32 спутника на высоте около 20 150 км) по следующим ГНСС-станциям, расположенным в Приморском крае: ARSN, BKM2, DLNG, IMAN, KALV, LESO, NKHD, NOV, SHUL, SLAV, VLAD, VLDV, ZAPV (рис. 1).

При анализе были обработаны следующие файлы данных: SLAVR22, ARSNR22, SLAVR21, BKM2R17, ARSNR12, BKM2R12, SLAVR11, ARSNR08, KALVR08, BKM2G31, BKM2G31, ARSNG31, ARSNG27, SLAVG26, SHULG26, ARSNG26, BKM2G26, SHULG26, BKM2G19, BKM2G16, ARSNG16, ARSNG08. Где первые четыре буквы (или три буквы с одной цифрой) обозначают наземный пункт приема, далее одна буква обозначает принадлежность спутника к системе ГЛОНАСС (R) или GPS (G), далее номер спутника. В системе GPS и ГЛОНАСС установленные на спутниках высокостабильные эталонные генераторы опорных частот одновременно являются и хранителями точного времени. Каждый спутник имеет 4 цезиевых атомных стандарта частоты с относительной нестабильностью частоты за сутки около 10^{-13} . Таким образом, спутниковые сигналы обеих систем несут еще и метки вре-

мени, при помощи которых осуществляются сверка временных шкал с государственными эталонами и синхронизация часов спутника и аппаратуры потребителя. К сожалению данные, доступные для обработки, не обладали высоким качеством, что не позволило получить файлы данных большой длительности. Максимальная длительность файла составила 430 мин при частоте дискретизации 0.03(3) Гц (30 с). При такой длительности можно получить частотное разрешение $3.87 \times 10^{-5} \text{ с}$, что явно недостаточно для разделения близлежащих максимумов на очень низких частотах, а первым уверенно значащим колебанием можно считать колебание на периоде около 43 мин. Все полученные экспериментальные данные были профильтрованы полосовым фильтром Хэмминга с граничными частотами 0.016 и 0.000278 Гц, соответствующие периодам 1 и 60 мин, что позволило уверенно говорить о выделении колебаний, лежащих в диапазоне периодов от 55–60 до 1 мин.

Обработка всех рядов выполнялась с применением быстрого преобразования Фурье, а для уточнения параметров выделенных колебаний дополнительно применялся метод максимального правдоподобия с числом гармоник 20 или 60, в зависимости от длины ряда. Первоначально ряды обрабатывались целиком. Для более точного изучения времени возникновения выделенных колебаний основные ряды делились на две равные половины, которые были подвергнуты описанным выше методам обработки. Минимальная длительность ряда, который делился пополам, составляла 309 мин. Ряды меньшей длительности не делились. В процессе проведенной обработки для каждого спутника были выделены основные энергонесущие максимумы, полученные по трассе “спутник–приемник”.

Все спутники двигались по сложной траектории, пролегающей над несколькими территориями и акваториями. В качестве характерного примера можно привести треки станция-спутник SLAVR22 и SHULG16, см. рис. 2. Эти спутники пролетали вблизи морских станций, приведенных в статье [1]. Можно предположить, что приемные морские станции, описанные в работе [1] и находящиеся в зоне пролетов спутников, наряду с морскими колебательными процессами, могли записать и атмосферные колебательные процессы. Это может быть как в фоновом режиме, так и при прохождении атмосферного импульса, сгенерированного взрывом вулкана. Треки всех перечисленных выше спутников пролегали над континентальными, островными и полуостровными территориями, окружающими Японское море, выходя частично в Тихий океан, море Бахай и Охотское море. Поэтому данные этих всех спутников могли содержать информацию о колебательных процессах атмосферы в этом регионе исследований, которые могли оказывать нагружаю-

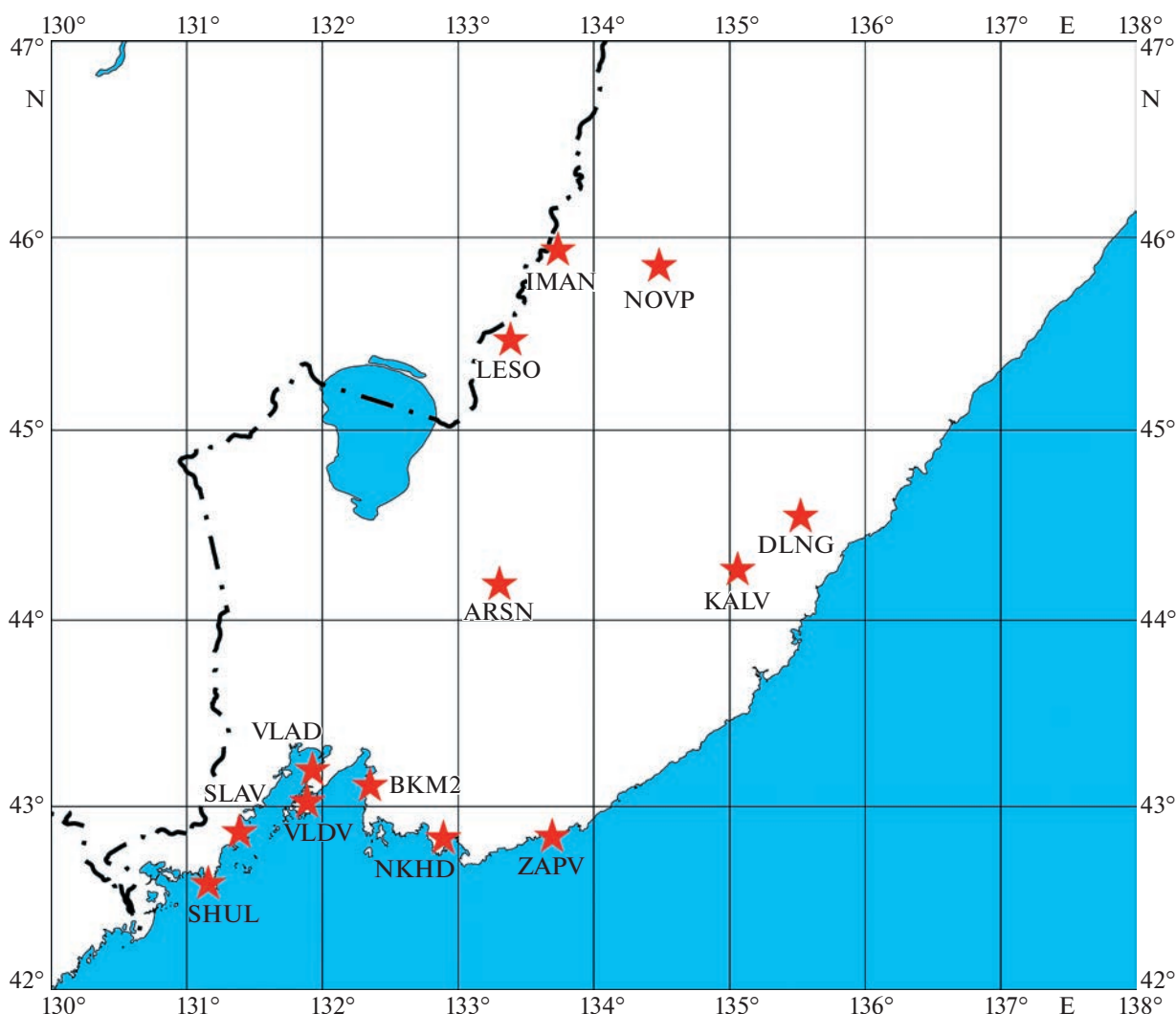


Рис. 1. Расположение ГНСС-станций в Приморском крае. Где: ARSN – с. Старосысоевка, BKM2 – г. Большой Камень, DLNG – г. Дальнегорск, IMAN – г. Дальнереченск, KALV – пгт. Кавалерово, LESO – г. Лесозаводск, NKHD – г. Находка, NOVP – с. Новопокровка, SHUL – м. Шульца, SLAV – пгт. Славянка, VLAD – г. Владивосток, VLDV – о. Русский, ZAPV – с. Заповедный.

шее воздействие на уровень моря/океана, которое регистрировалось приемными станциями, описанными в работе [1]: Preobrazhenije, Vladivostok, Pos'et, Mera, Tosashimizu, Aburatsu, Chichijima, Naha. Конечно, сюда можно добавить и полигон на м. Шульца. В табл. 1 приведем результаты обработки данных указанных измерительных систем, взятых из работы [1].

Далее остановимся на результатах обработки указанных выше рядов спутниковых данных. При спектральной обработке были выделены максимумы, приведенные в табл. 2 и 3. Данные взяты за 15 января 2022 г.

Анализируя данные, приведенные в табл. 2 и 3, можно отметить, что все выделенные максимумы группируются в шесть диапазонов с небольшими отклонениями от среднего по каждому спутнику

и каждой станции. Седьмой диапазон выглядит разрозненным, хотя и там можно отметить максимумы на периодах 2 мин 45.1 с–2 мин 12.3 с, 3 мин 50.4 с–3 мин 28.8 с. Периоды колебаний отмеченных шести диапазонов легко вписываются в наблюдаемые периоды колебаний морских станций, расположенных в Японском море и в Тихом океане вблизи Японских островов. То есть мы можем утверждать, что периоды колебаний полного электронного содержания, зарегистрированные спутниками на трассе “спутник–приемник”, с довольно хорошей точностью совпадают с некоторыми периодами колебаний, выделенных на морских станциях япономорского региона, взятых из работы [1]. В качестве характерного примера можно привести спектр, полученный при обработке ряда длительностью 759

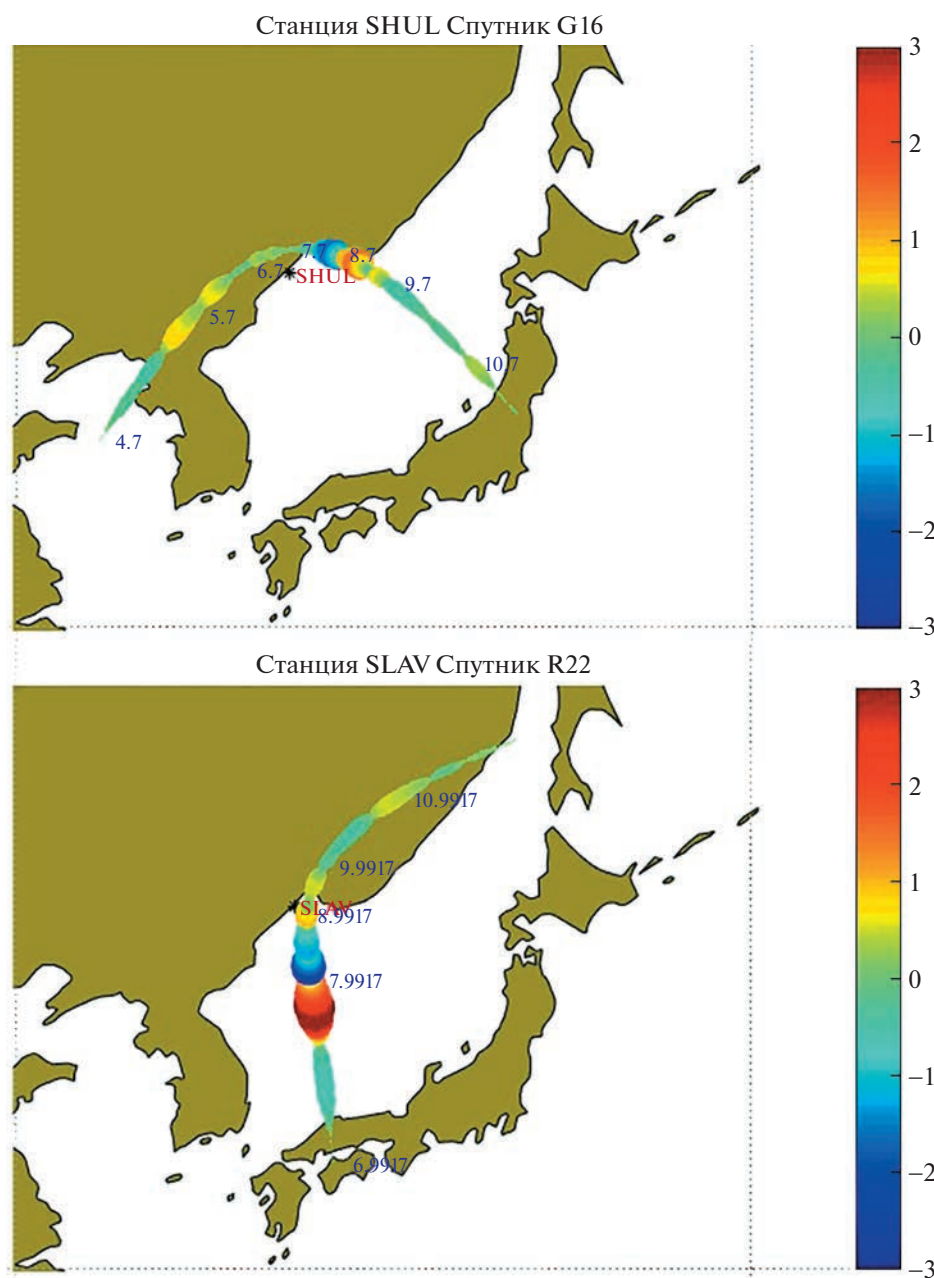


Рис. 2. Треки станция-спутник SLAVR22 и SHULG16. На треках приведены: положение соответствующих станций, время получения отчета (ч.дч. UTC), цветовая шкала, показывающая вариации полного электронного содержания.

(спутник ARSNG08) методом максимального правдоподобия (число гармоник равно 60), см. рис. 3. На нем выделяются мощные максимумы на периодах 30 мин 27.8 с ($A = 0.79$), 46 мин 20.4 с ($A = 0.77$).

Указанные совпадения могут указывать на то, что периоды колебаний полного электронного содержания обусловлены собственными колебаниями Атмосферы. Ранее в работе [7] утверждалось, что многие осцилляции, регистрируемые вертикальными сейсмометрами, гравиметрами,

деформографами и наклономерами, обусловлены собственными колебаниями Атмосферы. Результаты настоящей работы, а также работ [1, 7] показывают, что многие регистрируемые в воде и на земле колебания в диапазоне периодов обычных атмосферных внутренних гравитационных волн обусловлены собственными колебаниями Атмосферы. Эти собственные колебания Атмосферы, воздействуя на земную кору и водную поверхность морей и океанов, вызывают там колебания соответствующих периодов. Хотя нельзя сбрасывать со счетов воздействие океана на генерацию

Таблица 1. Статистические данные результатов обработки фоновых данных и данных сигналов возбуждения

		Максимум 1	Максимум 2	Максимум 3
Chichijima	ФОН	20 мин 28.0 с	16 мин 30.3 с	13 мин 49.7 с
	Сигнал	20 мин 28.0 с	15 мин 02.9 с	12 мин 47.5 с
Mera	ФОН	6 мин 09.9 с	5 мин 19.8 с	22 мин 14.7 с
	Сигнал	22 мин 14.7 с	6 мин 05.5 с	6 мин 38.7 с
Tosashimizu	ФОН	20 мин 28.0 с	39 мин 21.4 с	
	Сигнал	20 мин 28.0 с	24 мин 21.8 с	42 мин 38.2 с
Naha	ФОН	26 мин 55.7 с		
	Сигнал	24 мин 21.8 с	10 мин 26.5 с	
	Сигнал	22 мин 14.7 с	25 мин 34.9 с	19 мин 40.7 с
Preobrazhenije	ФОН	31 мин 58.7 с	15 мин 59.3 с	
	Сигнал	30 мин 05.8 с	9 мин 28.5 с	15 мин 59.3
Pos'et	ФОН	31 мин 58.7	17 мин 38.6	10 мин 53.2 с
	Сигнал	30 мин 05.8 с	17 мин 38.6 с	11 мин 22.2 с
Vladivostok	ФОН	39 мин 21.4 с	31 мин 58.7 с	
	Сигнал	31 мин 58.7 с		
м. Шульца	Сигнал	17 мин 04.0 с	8 мин 32.0 с	4 мин 16.0 с
				3 мин 06.2 с

Таблица 2. Результаты обработки спутниковых данных. Диапазоны 1–4

Спутник, время пролета	Станции приема	Диапазон 1	Диапазон 2	Диапазон 3	Диапазон 4
Спутник R22 06:59:29.0– 11:33:29	Славянка, Арсеньев		39 мин 39.5 с– 39 мин 15.8 с	29 мин 24.0 с– 28 мин 37.3 с	23 мин 51.1 с
Спутник R17 11:37:29.0– 17:43:29	Большой Камень		38 мин 53.0 с– 37 мин 44.8 с	32 мин 48.8 с– 31 мин 57.9с	
Спутник R12 06:21:29.0– 11:30:59	Арсеньев, Большой Камень	40 мин 43.0 с	38 мин 27.3 с	31 мин 44.4 с– 30 мин 11.4 с	25 мин 54.9 с– 24 мин 42.7 с
Спутник G31 01:47:00.0– 08:22:00	Большой Камень, Арсеньев	43 мин 30.6 с– 42 мин 39.1 с	39 мин 35.4 с	31 мин 59.1 с	28 мин 17.1 с– 27 мин 47.8 с
Спутник G27 06:06:59.0– 11:56:59	Арсеньев	42 мин 39.1 с	36 мин 22.3 с– 36 мин 02.5 с	31 мин 59.1 с– 29 мин 29.5 с	
Спутник G26 03:16:59.0– 10:04:59	Славянка, м. Шульца, Арсеньев, Большой Камень	43 мин 12.0 с– 42 мин 39.1 с		31 мин 23.5 с– 30 мин 49.5 с	25 мин 37.2 с– 24 мин 13.2 с
Спутник G19 12:09:59.0– 18:30:59	Большой Камень		37 мин 37.4 с	32 мин 09.5 с– 30 мин 02.0 с	25 мин 19.9 с– 25 мин 19.1 с
Спутник G16 04:59:59.0– 11:11:59	Арсеньев	42 мин 52.7 с	39 мин 02.0 с	33 мин 20.6 с– 31 мин 25.4 с	25 мин 56.5 с– 25 мин 19.5 с
Спутник G08 07:07:59.0– 13:27:59	Арсеньев	42 мин 39.1 с– 41 мин 29.0 с		31 мин 47.6 с– 30 мин 27.8 с	
Среднее		41 мин 33.8 с	37 мин 34.2 с	30 мин 34.0 с	25 мин 32.0 с

Таблица 3. Результаты обработки спутниковых данных. Диапазоны 5–7

Спутник, время пролета	Станции приема	Диапазон 5	Диапазон 6	Диапазон 7
Спутник R22 06:59:29.0–11:33:29	Славянка, Арсеньев	20 мин 20.5 с– 20 мин 19.2 с		
Спутник R17 11:37:29.0–17:43:29	Большой Камень	20 мин 28.4 с	17 мин 25.2 с– 16 мин 39.8 с	2 мин 40.6 с
Спутник R12 06:21:29.0–11:30:59	Арсеньев, Большой Камень	20 мин 01.7 с		11 мин 20.4 с– 11 мин 00.2 с 3 мин 28.8 с
Спутник G31 01:47:00.0–08:22:00	Большой Камень, Арсеньев		17 мин 58.9 с– 17 мин 04.0 с	2 мин 12.3 с
Спутник G27 06:06:59.0–11:56:59	Арсеньев	20 мин 28.0 с		09 мин 45.3 с– 09 мин 39.8 с
Спутник G26 03:16:59.0–10:04:59	Славянка, м. Шульца, Арсеньев, Большой Камень		17 мин 33.8 с– 16 мин 21.7 с	7 мин 28.8 с, 6 мин 44.8 с, 5 мин 29.7 с, 4 мин 06.3 с
Спутник G19 12:09:59.0–18:30:59	Большой Камень	20 мин 04.2 с		3 мин 50.4 с, 2 мин 45.1 с
Спутник G16 04:59:59.0–11:11:59	Арсеньев	21 мин 19.0 с– 20 мин 38.6 с		7 мин 50.0 с, 4 мин 20.2 с
Спутник G08 07:07:59.0–13:27:59	Арсеньев			07 мин 50.0 с, 04 мин 11.8 с
Среднее		20 мин 18.6 с	16 мин 31.9 с	

колебаний аналогичных периодов, на что указано в работе [8].

В заключение можно отметить, что не по всем спутникам наблюдается совпадение выделенных

периодов колебаний. Это естественно, так как каждый спутник летит по своей траектории, захватывая различные слои Атмосферы между местом своего нахождения и наземной станцией.

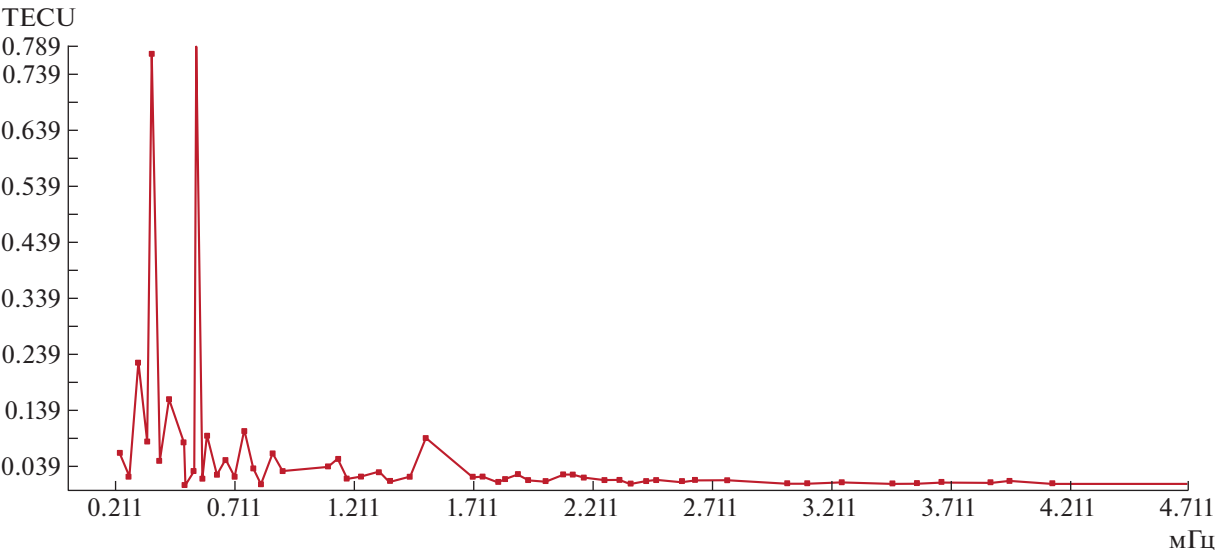


Рис. 3. Спектр максимального правдоподобия ряда ARSNG08.

Поэтому периоды колебаний даже для одной станции, но для разных спутников должны отличаться в каких-то разумных пределах. Более того, Атмосфера достаточно динамичная среда, в которой периоды собственных колебаний не могут быть неизменными в отличие, например, от собственных колебаний Земли, которые также не неизменные, но в гораздо меньших пределах.

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке темы № АААА-А20-120021990003-3 (получение экспериментальных данных) и гранта Российского научного фонда № 22-17-00121, <https://rscf.ru/project/22-17-00121/> (обработка, анализ и интерпретация полученных экспериментальных данных).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Dolgikh G., Dolgikh S., Ovcharenko V.* Initiation of Infrasonic Geosphere Waves Caused by Explosive Eruption of Hunga Tonga-Hunga Ha'apai Volcano // *Journal of Marine Science and Engineering*. 2022. V. 10. Is. 8. N. 1061. <https://doi.org/10.3390/jmse10081061>
2. *Алексеев А.В., Валентин Д.И., Долгих Г.И., Долгих С.Г., Ковалев С.Н., Корень И.А., Овчаренко В.В., Швец В.А., Яковенко С.В., Холодкевич Е.Д.* Регистрация инфрагравитационных волн на границе "гидросфера-литосфера" береговым лазерным деформографом // *ДАН*. 2003. Т. 389. № 2. С. 244–246.
3. *Долгих Г.И., Долгих С.Г., Смирнов С.В., Чупин В.А., Швец В.А., Яковенко С.В.* Инфразвуковые колебания Японского моря // *ДАН*. 2011. Т. 441. № 1. С. 98–102.
4. *Hofmann-Wellenhof B., Lichtenegger H., Wasle E.* GNSS-Global Navigation Satellite Systems / Vienna: Springer. 2008. <https://doi.org/10.1007/978-3-211-73017-1>
5. *Astafoeva E.* Ionospheric detection of natural hazards // *Reviews of Geophysics*. 2019. 57. P. 1265–1288. <https://doi.org/10.1029/2019RG000668>
6. *Coster A., Williams J., Weatherwax A., Rideout W., Herne D.* Accuracy of GPS total electron content: GPS receiver bias temperature dependence // *Radio Science*. 2013. 48. 190–196. <https://doi.org/10.1002/rds.20011>
7. *Швед Г.М., Ермоленко С.И., Карпова Н.В., Вендт З., Якоби К.* Регистрация глобальных осцилляций Атмосферы сейсмическими приборами // *Физика Земли*. 2013. № 2. С. 131. <https://doi.org/10.7868/S0002333713010134>
8. *Rhie A., Romanowicz B.* Excitation of Earth's continuous free oscillations by atmosphere-ocean-seafloor coupling // *Nature*. 2004. V. 431. P. 552–556.

ATMOSPHERIC GRAVITATIONAL DISTURBANCES THE JAPANESE SEA REGION

Academician of the RAS **G. I. Dolgikh^{a, #}**, **M. A. Bolsunovskii^a**, and **S. G. Dolgikh^a**

^a *Il'ichev Pacific Oceanological Institute, Far East Branch of the Russian Academy of Sciences, Vladivostok, Russian Federation*

[#] *E-mail: dolgikh@poi.dvo.ru*

When processing satellite data of total electron content on the route between GLONASS satellites, GPS and receiving stations located on earth in the Primorsky Territory of Russia, infragravity disturbances caused by their own fluctuations of the atmospheric layers of the Jap-Sea region, which have a loading effect on the Earth's crust and the sea/ocean surface, generating fluctuations in them for the corresponding periods, were identified.

Keywords: total electron content, satellite, infragravity perturbations, natural fluctuations of the Atmosphere