

ЧАСТОТНО-ВРЕМЕННОЙ АНАЛИЗ ИЗМЕНЕНИЙ РАДОНОВЫХ ВЫБРОСОВ В ПОДЗЕМНОЙ ЛАБОРАТОРИИ LNGS, ИЗМЕРЕННЫХ ДЕТЕКТОРОМ LVD

*В. Ф. Якушев**, *Н. Ю. Агафонова***, *В. В. Ашишмин*, *Е. А. Добрынина****, *Р. И. Еникеев*,
Н. А. Филимонова, *И. Р. Шакирьянова*, от имени Коллаборации LVD

*Институт ядерных исследований Российской академии наук
117312, Москва, Россия*

Поступила в редакцию 13 февраля 2024 г.,
после переработки 23 апреля 2024 г.
Принята к публикации 24 апреля 2024 г.

Представлен частотно-временной анализ временных рядов скорости счета гамма-квантов, измеренных детектором LVD в Лаборатории LNGS, Гран-Сассо, Италия. Изменение темпа счета гамма-квантов связано с выбросами радона в атмосферу подземного зала Лаборатории. Радиоактивный газ радон поступает в помещение через микротрещины и поровую воду из грунта. На вариации радона влияют гравитационные эффекты вращения Солнца и Земли, а также подвижки грунта от сейсмических явлений в Итальянском регионе. С помощью дискретного преобразования Фурье были найдены суточные (солнечные и лунные), полусуточные, лунно-месячные, недельный и годовой периоды.

DOI: 10.31857/S0044451024090049

1. ВВЕДЕНИЕ

Радон ^{222}Rn образуется в грунте в результате деления и распадов элементов уранового и ториевого рядов [1] и выходит в атмосферу подземного помещения через множественные микротрещины в породе или из воды, насыщающейся радоном (радон хорошо растворяется в воде) на пути через скальную породу до подземного зала.

Уменьшение концентрации радона происходит а) за счет распада (период полураспада радона равен 3.825 сут), б) за счет миграции из массива окружающего грунта в воздух. Однако же новая генерация газа появляется из цепочки распадов урана. Поэтому среднее содержание радона в грунте всегда постоянно и определяется концентрацией урана (радия) в этом массиве. Миграция радона в горном массиве и его выделение с поверхности определяются макроскопическим коэффициентом диффузии, который зависит от многих факторов. Наиболее важными из них являются пористость, проницаемость

и трещиноватость. Поскольку количество микротрещин увеличивается при деформациях земной коры во время землетрясений или в результате гравитационных приливов от Солнца и Луны, должна усиливаться и эманация радона.

На установке LVD, описание которой будет дано в разд. 2, можно наблюдать выбросы радона, связанные с гравитационными приливами, техногенной деятельностью (микротряской) и сейсмической активностью в регионе [2]. Эти исследования могут стать еще одним инструментом для создания общей системы наблюдения и помочь геофизикам в прогнозе разрушительных землетрясений.

Из низкоэнергетического фона LVD методом наложения эпох получены годовые вариации скорости счета гамма-квантов от распада радона $\delta N = (4 \pm 2)\%$, которые связаны с насыщением водой грунта [3]. В недавних работах [4, 5] на LVD были обнаружены техногенные недельные и суточные вариации скорости счета гамма-квантов, а также найдены лунно-месячные вариации методом наложения эпох [6].

Цель этой работы — проведение гармонического анализа методом дискретного преобразования Фурье непрерывного временного ряда скорости счета гамма-квантов для нахождения периодов гар-

* E-mail: yakushevvaleriy897@gmail.com

** E-mail: agafonova@inr.ru

*** E-mail: dobrynina02@mail.ru

моник, связанных с гравитационными приливами от движения Солнца и Луны — это солнечно-суточные, лунно-суточные, лунные периоды и годовой период [7].

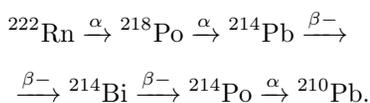
2. ОПИСАНИЕ ДЕТЕКТОРА LVD И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ

Детектор LVD [8] находится в Лаборатории LNGS [9] (Италия) на глубине 3300 м в.э. в сейсмоопасном регионе под горным массивом Гран-Сассо. Три башни детектора (Т1, Т2, Т3) состоят из 840 сцинтилляционных счетчиков. Каждый счетчик размером 1.5 м^3 заполнен жидким сцинтиллятором на основе уайт-спирита (C_nH_{2n} , $n \approx 9.6$) и просматривается тремя фотоэлектронными умножителями (ФЭУ). Общая масса детектора 1 кт железа и 1 кт сцинтиллятора. Внешние счетчики установки, расположенные рядом с окружающим детектор грунтом, экранируют внутренние счетчики (240 шт.) от внешней радиоактивности скалы.

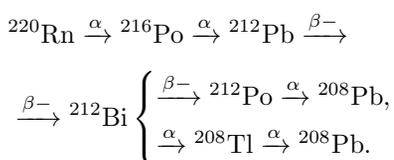
Эксперимент LVD сконструирован для регистрации нейтрино от коллапсов звездных ядер в нашей Галактике. Фоном детектора в области высоких энергий являются мюоны космических лучей и продукты их взаимодействия в веществе детектора. В области низких энергий фон детектора — гамма-кванты от естественной радиоактивности грунта и материалов конструкции, а также гамма-кванты от радиоактивного газа радона, находящегося в атмосфере подземного зала.

Гамма-кванты распада дочерних ядер радона и торона от цепочек распада урана и тория в диапазоне от 0.5 до 3.5 МэВ регистрируются всеми счетчиками детектора в течении 10 с каждые 10 мин.

Гамма-излучение создается в основном ядрами ^{214}Bi , за счет β -распада превращающимися в ^{214}Po с характерным временем $\tau = 19.7$ мин. Наиболее вероятная цепочка распада:



Число гамма-квантов от цепочки распада торона почти на порядок меньше:



Спектры гамма-квантов и цепочки распада ^{232}Th и ^{238}U приведены в [10].

Количество отсчетов, обусловленных радоном, для 70 внутренних счетчиков одной башни составляет около 3150 за 10 с. Это задает чувствительность метода 5% на уровне 3σ , т. е. за 10-секундный интервал измерений установка зафиксирует 5-процентное отклонение концентрации с достоверностью $\sim 99.7\%$. Подробно метод регистрации описан в [11].

Установка работает с 1992 г. Временные ряды скоростей счета гамма-квантов формируются для внутренних счетчиков каждой башни детектора отдельно, так как башни работают независимо и немного различаются по своим характеристикам и расположению в экспериментальном зале [12].

Данные представляют собой темп счета импульсов выше низкого энергетического порога ~ 0.5 МэВ. Данные усредняются по многим детекторам для каждой из трех башен LVD и для шести измерений каждого часа. Данные почищены. Таким образом, для гармонического анализа получены непрерывные временные ряды $y_{T1}(t)$, $y_{T2}(t)$, $y_{T3}(t)$ — темп счета радона соответственно башен Т1, Т2 и Т3 детектора LVD в герцах.

Затем данные усредняются только по первой и второй башням, так как третья башня несколько отличается конструктивно и по физическим параметрам (сцинтиллятор, ФЭУ, конструкция детекторов), т. е. $y(t) = (y_{T1}(t) + y_{T2}(t))/2$ для каждого часа. Полное время измерения 157800 ч (18 лет) с 1 января 2004 г. Статистическую ошибку в каждом бине входной гистограммы y_n , $n = 1, \dots, 157800$ можно определить пересчетом ошибок в процессе усреднения данных. Систематические ошибки оценить сложно. Их много, и они изменяются со временем (температура, напряжение питающей сети, изменение характеристик сцинтиллятора, ФЭУ, электроники за многие годы и прочее).

Поэтому представляется неплохим вариантом взять мажоритарную ошибку в виде среднеквадратичного отклонения y_n за все время измерений T_{meas} :

$$s(y_n) = \sqrt{\frac{1}{157800} \sum_{n=1}^{157800} (\bar{y} - y_n)^2}. \quad (1)$$

Сюда автоматически войдут все статистические и изменяющиеся систематические ошибки. Результат по ошибкам: $\bar{y} = 59.18$ Гц, $s(y_n) = 9.82$ Гц. Эта мажоритарная оценка ошибки одинакова для всех y_n . Теперь у нас есть два временных ряда y_n и $s(y_n)$. Это все, что нужно для проведения анализа Фурье.

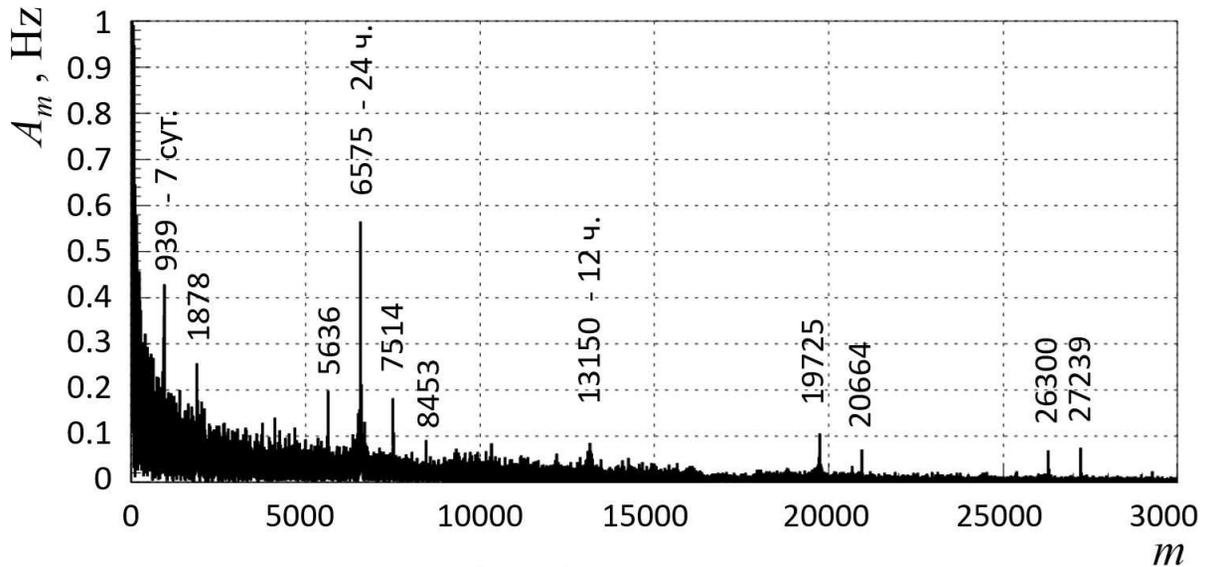


Рис. 1. Фурье-гармоники

3. ФУРЬЕ-АНАЛИЗ

Дискретный Фурье-анализ проводился по формулам Бесселя для нахождения амплитуд гармоник косинуса и синуса с нулевой фазой и потом результат приводился к одной функции косинуса (без синуса) с ненулевой фазой (для простого графического представления результатов).

Параллельно с вычислением амплитуд гармоник и их фаз проводился перенос ошибок (на основе $s(y_n)$). Формула переноса ошибок стандартная:

$$s(z_m(y_n)) = \sqrt{\sum_{n=1}^{157800} \left(\frac{\partial z}{\partial y_n} s(y_n) \right)^2},$$

где $z_m(y_n)$ — функция амплитуды m -й гармоники A_m , зависящая от всех значений y_n входной радоновой гистограммы, $s(y_n)$ — ошибка y_n .

Всего было 157800 (18 лет) измерений ($n = 1, \dots, 157800$), поэтому число гармоник на выходе равно $157800/2 = 78900$ ($m = 1, \dots, 78900$). Период гармоники номер $m = 1$ (самой медленной): $T_1 = 157800 \text{ ч} = 18 \text{ лет}$ (частота $f_1 = 1/T_1$). Период гармоники номер 78900 (самой быстрой): $T_{78900} = 2 \text{ ч}$ (частота $f_{78900} = 1/T_{78900}$). Связь между номером гармоники m и ее периодом T_m : $T_m = 157800/m$.

Чтобы потом оценивать значимость какой-либо гармоники на основе ее амплитуды, в этой же программе вычисляется амплитуда B_m гармоник эквивалентного по мощности белого шума (и ошибка $s(B_m)$). У белого шума все гармоники имеют одинаковую амплитуду $B = B_m$.

Пусть A_m — амплитуда m -й гармоники радоновых данных; $s(A_m)$ — ошибка A_m . Мощность гармоники пропорциональна квадрату ее амплитуды.

Тогда $B^2 \cdot 78900 = \sum_{m=1}^{78900} A_m^2$, следовательно, амплитуда белого шума

$$B = B_m = \sqrt{\frac{1}{78900} \sum_{n=1}^{78900} A_n^2} \text{ [Гц]}.$$

В результате получаем $B = 0.0495 \text{ Гц}$, $s(B) = 6.66 \cdot 10^{-4} \text{ Гц}$ — среднеквадратичная ошибка величины B . Вычислим значимость каждой гармоники:

$$\eta_m = \frac{A_m - B}{s(A_m - B)} = \frac{A_m - B}{\sqrt{(s(A_m))^2 + (s(B))^2}}. \quad (2)$$

Величина η_m может быть отрицательна, это значит, что амплитуда гармоники ниже белого шума. Значимость гармоники показывает, на сколько среднеквадратичных отклонений $s(A_m - B)$ амплитуда гармоники превышает амплитуду белого шума.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ АНАЛИЗА ФУРЬЕ ДАННЫХ LVD

Результатом анализа Фурье являются амплитуды гармоник A_m в герцах и их ошибки, фазы гармоник в радианах и их ошибки, а также значимости η_m амплитуд гармоник.

На рис. 1 представлен график, полученный с помощью дискретного преобразования Фурье. В некоторых областях спектра гармоник наблюдаются ясно выраженные пики с весьма значимыми амплитудами — эти области спектра представлены на отдельных графиках, обсуждаемых ниже. На всех графиках по оси абсцисс отложены номера гармоник.

Таблица 1. Параметры основных и комбинационных частот видимых пиков

Период, сут	Частота f_{comb}	Номер гармоники m	A_m , Гц	Видимый пик, m	Значимость η
7.000	f_2	939	0.43	939	$> +10$
3.501	$2f_2$	$2 \cdot 939 = 1878$	0.26	1879	+5.98
1.166	$f_1 - f_2$	$6575 - 939 = 5636$	0.20	5635	+4.26
1.000	f_1	6575	0.56	6575	$> +10$
0.875	$f_1 + f_2$	$6575 + 939 = 7514$	0.18	7515	+3.82
0.778	$f_1 + 2f_2$	$6575 + 2 \cdot 939 = 8453$	0.090	8454	+1.18
0.500	$2f_1$	$2 \cdot 6575 = 13150$	0.077	13149	+0.79
0.333	$3f_1$	$3 \cdot 6575 = 19725$	0.074	19726	+0.70
0.318	$3f_1 + f_2$	$3 \cdot 6575 + 939 = 20664$	0.032	20664	-0.51
0.250	$4f_1$	$4 \cdot 6575 = 26300$	0.038	26301	-0.33
0.241	$4f_1 + f_2$	$4 \cdot 6575 + 939 = 27239$	0.075	27231	+0.74

Рассмотрим подробно значимые пики на рис. 1. Обозначим f_1 ($T = 1$ сут) частоту самой значимой гармоники (суточный пик) с максимальной значимой амплитудой, а f_2 ($T = 7$ сут) — следующую по амплитуде гармонику. Комбинационные частоты должны зависеть в основном от этих двух частот: $f_{comb} = (nf_1 \pm kf_2)$, при условиях n, k целые ≥ 0 ; $f_{comb} > 0$. В табл. 1 приведены одиннадцать номеров гармоник экспериментальных видимых пиков (рис. 1) и их соответствие номерам гармоник комбинационных частот.

Совпадение комбинационных частот с наблюдаемыми значениями подтверждает корректность проведенного фурье-анализа.

4.1. Солнечно-суточный период (1.00 сут = 24 ч). Волна S1

Рассмотрим подробнее солнечно-суточный пик, период которого составляет $T = 1$ сут = 24 ч 00 мин. Это суточная приливная волна S1. Здесь и далее обозначения волн S1, M1, M2, P1, K1 из перечня основных приливных волн по Мельхиору [7]. На рис. 1 это один из самых высоких пиков в районе $m = 6575$ с амплитудой самой высокой гармоники $A_m = 0.56$ Гц и значимостью $\eta_m > 10$. Справа и слева от него видны комбинационные частоты: $(f_1 - f_2)$, гармоника $m = 6575 - 939 = 5636$, значимость $\eta_m \approx 4.2$, и $(f_1 + f_2)$, гармоника $m = 6575 + 939 = 7514$, значимость $\eta_m \approx 3.8$. На рис. 2 приведен диапазон гармоник от $m = 6300$ до $m = 6800$. В центре виден узкий солнечно-суточный пик шириной несколько гармоник. Ширина пика на полувысоте ~ 5 гармоник.

Солнечные волны P1 ($T = 1.003$ сут) и K1 ($T = 0.997$ сут) трудно отличить от соседних пиков рядом.

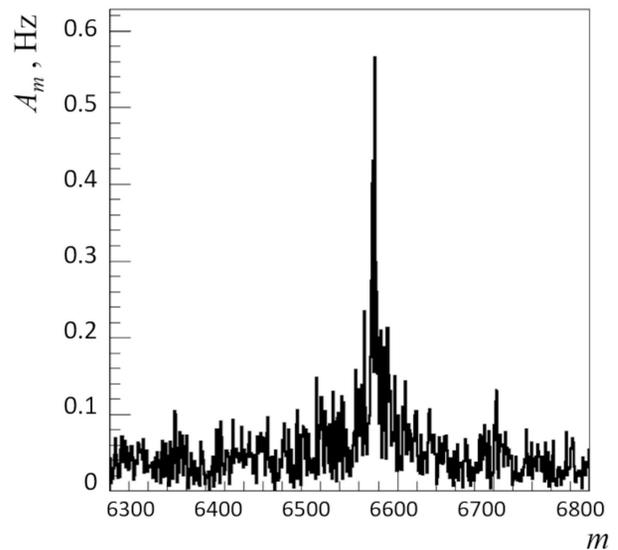


Рис. 2. Фурье-гармоники $m = 6300 \nabla \cdot 6800$

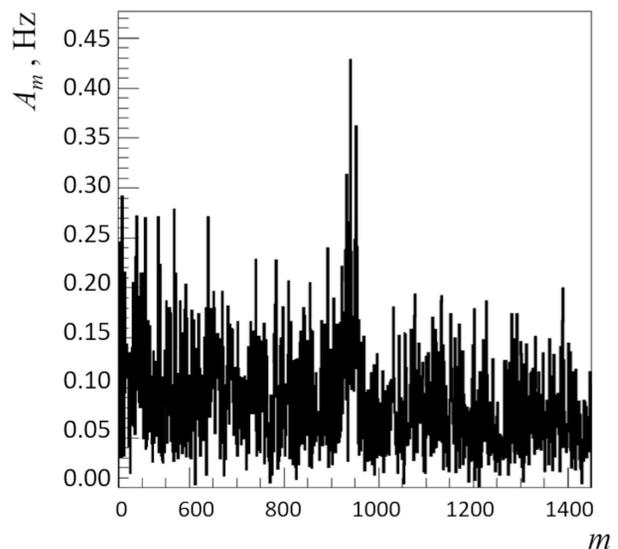


Рис. 3. Фурье-гармоники $m = 450 \nabla \cdot 1450$

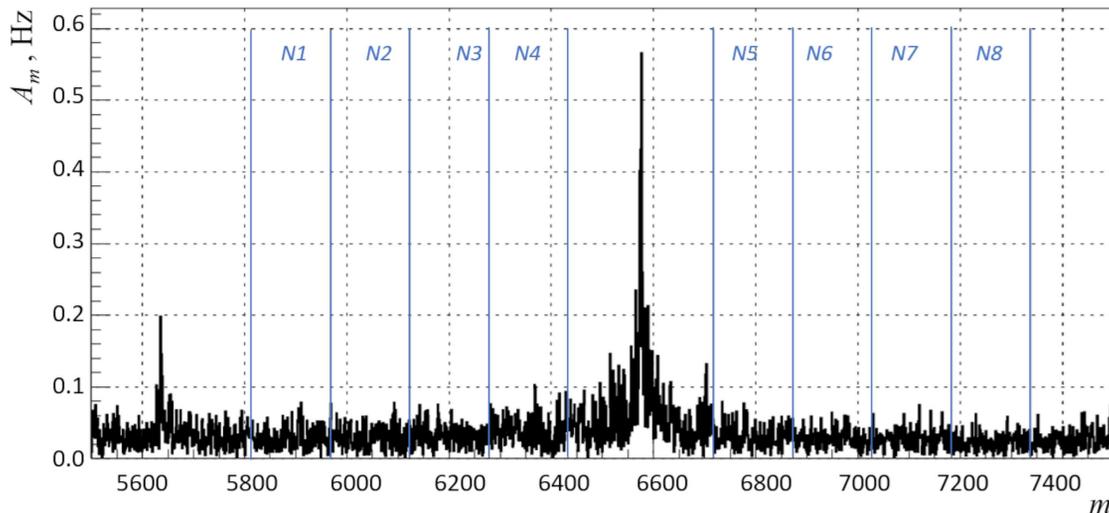


Рис. 4. Фурье-гармоники от 5500 до 7600

В этом же месте $T = 1$ сут находится пик от ежесуточного прихода людей на установку и микро-сейсмического воздействия от тяжелых грузовиков в транспортных туннелях. Эффект от техногенной деятельности человека в рабочие дни был обнаружен на данных LVD в работе [5]. На рис. 3 показаны гармоники в диапазоне $m = 450 \nabla \cdot 1450$ гармоник. В центре виден «размытый» пик с периодом $T = 7$ сут. Амплитуда максимальной гармоники ($m = 940$) в недельном пике составляет 0.43 Гц, а его значимость $\eta_m > 10$.

Полусуточная волна S2 тоже видна (гармоника $m = 13150$), но ее амплитуда в 7 раз меньше, чем амплитуда волны S1.

4.2. Поиск суточного лунного периода

$T = (1.01 \nabla \cdot 1.06)$ сут (волна M1) и
полусуточного периода

$T = (0.505 \nabla \cdot 0.531)$ сут (волна M2)

Область m в диапазоне $6202 \nabla \cdot 6509$ (ширина в 307 гармоник) соответствует $T_m = (1.01 \nabla \cdot 1.06)$ сут — это диапазон лунно-суточной приливной волны M1. Период волны M1 около 24 ч 50 мин. Это лунные сутки, они варьируются в течение месяца из-за эксцентриситета орбиты Луны вокруг Земли. Области изменения периодов приливных волн S1 и M1 не перекрываются.

На рис. 4 показаны гармоники в диапазоне $m = 5500 \nabla \cdot 6600$. Справа суточный пик f_1 ($m = 6575$, $T_{6575} = 1$ сут). Слева пик $(f_1 - f_2)$ ($m = 6575 - 939 = 5636$) — комбинационная частота.

Возьмем слева от солнечного пика ($T = 1.0000$ сут, рис. 4) центральную часть шириной в 154 гармоники ($m = 6278 \nabla \cdot 6432$) — здесь амплиту-

ды гармоник A_m должны существенно превышать эквивалентный по мощности белый шум. Пусть это будет область N4. Усредним в этой области все гармоники по мощности:

$$\bar{A} = \bar{A}_m = \sqrt{\frac{1}{154} \sum_{m=6278}^{6432} A_m^2}.$$

Левее по спектру последовательно возьмем еще три такие же области шириной по 154 гармоники (номера областей N1, N2, N3). Справа от солнечного пика симметрично возьмем еще четыре области (номера областей N5, N6, N7, N8). Таким образом, солнечно-суточный пик «вырезан» и не мешает поиску лунного пика. Области (N1–N8) выбраны так, чтобы не попадать на комбинационные частоты $(f_1 - f_2)$ и $(f_1 + f_2)$. Мажоритарную ошибку амплитуды одной гармоники $s(A_m)$ возьмем как среднеквадратичное отклонение от среднего амплитуд гармоник по всем восьми областям: $s(A_m) = 1.61 \cdot 10^{-2}$ Гц. Вычислим также эквивалентный по мощности белый шум, локально только по восьми областям: $B_m = 3.42 \cdot 10^2$ Гц, $s(B_m) = 4.60 \cdot 10^{-4}$ Гц (для одной гармоники).

Результаты расчета для всех N1–N8 областей представлены в табл. 2. Имеем $s(\bar{A}) = 1.30 \cdot 10^{-3}$ Гц, $s(\bar{B}) = 0.37 \cdot 10^{-4}$ Гц для каждой из областей N1–N8.

Можно утверждать, что мы видим лунно-суточный пик $T = (1.01 \nabla \cdot 1.06)$ сут в ожидаемом для волны M1 месте со значимостью $\eta = 7.96$.

Аналогично с поиском волны M1 проведен поиск волны M2 (лунно-приливной полусуточной волны, ее период 12 ч 25.2 мин). Слева и справа относительно пика волны S2 (гармоника $m = 13150$) выделялись области N1 и N2 шириной в 616 гармоник.

Таблица 2. Параметры выбранных областей для нахождения лунно-суточного пика M1

Область	N1	N2	N3	N4	N5	N6	N7	N8
Диапазон гармоник m	5813∇ · 5967	5968∇ · 6122	6123∇ · 6277	6278∇ · 6432	6718∇ · 6872	6873∇ · 7027	7028∇ · 7182	7183∇ · 7337
Период, сут	1.131∇ · 1.102	1.102∇ · 1.074	1.074∇ · 1.047	1.047∇ · 1.022	0.979∇ · 0.957	0.957∇ · 0.936	0.936∇ · 0.915	0.915∇ · 0.896
$\bar{A} \cdot 10^{-2}$, Гц	3.29	3.46	3.52	4.45	3.45	3.13	3.11	2.64
Значимость η	-0.96	+0.31	+0.79	+7.96	+0.29	-2.18	-2.37	-5.96

Таблица 3. Параметры выбранных областей для нахождения лунного полусуточного пика M2

Область	N1	N2	N3	N4
Диапазон m	12373∇ · 12988	13312∇ · 13927	13928∇ · 14543	14544∇ · 15159
Период, сут	0.531∇ · 0.506	0.494∇ · 0.472	0.472∇ · 0.452	0.452∇ · 0.434
\bar{A} , Гц	$1.26 \cdot 10^{-2}$	$1.114 \cdot 10^{-2}$	$1.137 \cdot 10^{-2}$	$1.064 \cdot 10^{-2}$
Значимость η	+5.42	-1.55	-0.47	-3.83

Область N1 — область искомого расположения пика M2, а область N2 симметрична относительно S2. Правее N2 добавлены еще две области N3 и N4. Результаты сведены в табл. 3.

Эквивалентный по мощности белый шум, локально только по четырем областям: $B_m = 1.148 \cdot 10^{-2}$ Гц, $s(\bar{A} - \bar{B}) = 2.188 \cdot 10^{-4}$ Гц. Волна M2 видна со значимостью $\eta = +5.42$.

4.3. Поиск синодического лунно-солнечного периода (29.3∇ · 29.8) сут

Синодический лунно-солнечный период — это период времени между двумя одинаковыми фазами Луны, например, между двумя полнолуниями. Гравитационное влияние Луны и Солнца создает в Земле приливные волны с амплитудой на ее поверхности в среднем несколько десятков сантиметров.

Солнечно-суточный пик должен быть в районе периода $T_m = 29.5$ сут. Область гармоник лунно-солнечного пика представлена на рис. 5. Гармоника $m = 223$, $T_m = 29.48$ сут имеет значимость $\eta = 11.67$. Влево и вправо значимость сильно снижается. Но слева на гармонике $m = 217$ наблюдается пик значимостью $\eta = 9.8$, $T_m = 30.30$ сут. Пик такой же ширины, как у $m = 223$. Вероятно, это комбинационная частота.

Если f_1 соответствует $m = 223$ и гармоника для $(f_1 - f_2)$ $m = 217$, то f_2 должна соответствовать гармонике $m = 6$. Посмотрим, есть ли пик в районе $m = 6$. В табл. 4 наблюдается явный пик с центром на гармонике приблизительно $m = (5 + 6 + 7 + 8)/4 = 6.5$. Вероятно, пик $m = 217$ является комбинационной частотой по трем причинам:

а) $A_{217} < A_{223}$;

Таблица 4. Значения амплитуд для гармоник $m = 4∇ \cdot 9$

m	T_m , солнечные сут	A_m , Гц
4	1643	0.92
5	1351	2.45
6	1095	0.31
7	939	1.61
8	822	1.37
9	730	0.32

б) пики на $m = 217$ и $m = 223$ имеют одинаковую ширину, и она равна приблизительно одной гармонике;

в) имеется пик на $m = 6$.

Чтобы точнее оценить значимость лунно-солнечного пика, будем определять амплитуду белого шума B_m по участку спектра в области $m = 223$. На рис. 5 видно, что ширину пика $T = 29.5$ сут мож-

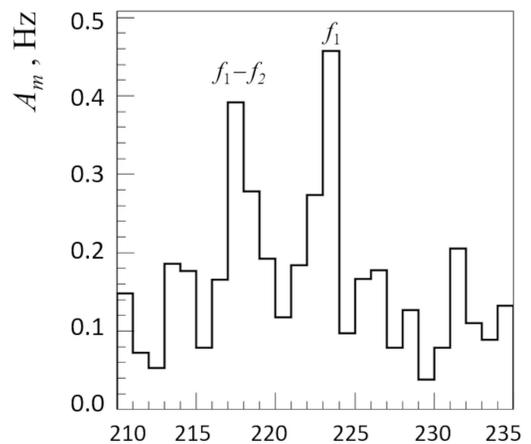


Рис. 5. Фурье-гармоника от 210 до 235 m

но выбрать в одну гармонику $m = 223$. Амплитуда этой гармоники равна $A_{223} = 0.457$ Гц, ошибка $s(A_{223}) = 0.10$ Гц.

Амплитуда каждой гармоники эквивалентного по мощности белого шума (вычисленного по окрестности $m = 210 \nabla \cdot 233$) равна $B_m = 0.19$ Гц, $s(B_m) = 2.05 \cdot 10^{-2}$ Гц. В этих условиях значимость гармоники $m = 223$ равна $\eta = 2.64$.

Для синодического периода, где у нас имеется одна, довлеющая над остальными, гармоника, можно получить фазу — сдвиг максимума функции косинуса относительно начала измерения. Приводя функцию дискретного преобразования Фурье к косинусу, получаем $y_m(t) = A_m \cos(\varpi_m t + \varphi_m)$, где φ_m — фаза в радианах, ϖ_m — круговая частота в рад/сут ($\varpi_m = 2\pi/T_m$, $T_m = 29.5$).

Мы использовали разный набор статистики с 2004 по 2022 гг. Приводим здесь наиболее значимые результаты. На шестилетней статистике с 2004 г. получена фаза $\varphi_m = 4.152 \pm 0.083$ рад. Переводя радианы в сутки и зная, что день полнолуния с 2004 г. приходится на 6.65 сут, посчитаем задержку максимума эффекта влияния луны и солнца на выход радона: $\Delta t = (9.99 - 6.65)$ сут = (3.35 ± 0.39) сут.

На десятилетней статистике с 2011 г. получена фаза $\varphi_m = 1.49 \pm 0.067$ рад. Переводя радианы в сутки и учитывая день полнолуния с 2011 г. (18.89 сут), получаем задержку $\Delta t = (22.501 - 18.89)$ сут = (3.61 ± 0.30) сут.

Посчитав среднее Δt с весом, обратным дисперсиям, по двум разным статистикам, получаем, что через $\Delta t = (3.51 \pm 0.24)$ сут после полнолуния LVD «видит» максимум выхода радона по измеряемым детектором гамма-квантам.

4.4. Поиск аномалистического лунно-месячного периода 27.55455 сут

Луна при движении по орбите вокруг планеты Земля проходит через точку, ближайшую к Земле, — точку перигея. Период между двумя перигеями равен $T_a = 27.55455$ сут — аномалистический лунный месяц (волна Mm). Аналогично Земля проходит вокруг Солнца за период $T = 365.2422$ сут между двумя перигелиями — солнечный год, т. е. возвращается в ту же точку своей орбиты.

Посмотрим на амплитудный спектр гармоник (рис. 6) в диапазоне $215 \nabla \cdot 315$. В области $m = (226 \nabla \cdot 248) \sim T_m = (29.1 \nabla \cdot 26.5)$ сут видны гармоники с повышенными амплитудами — максимальная $A_{max} = 0.392$ Гц, $m = 243$. Выишем гармоники с амплитудами, превышающими $A_{max}/2 = 0.196$ Гц в этой области: $m_i = 231, 235, 237, 240, 243, 244$. За-

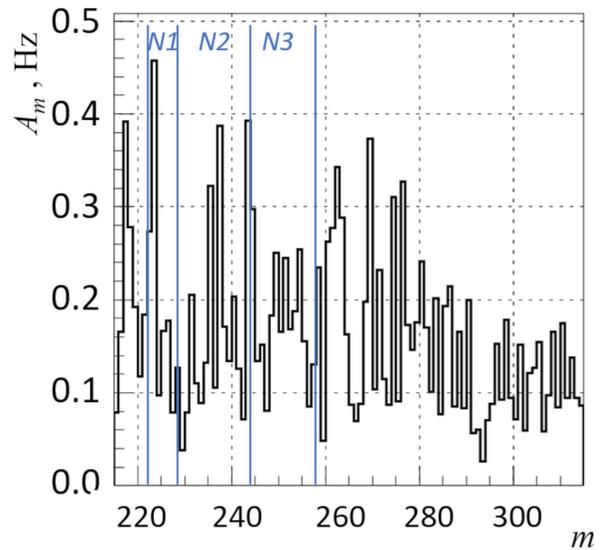


Рис. 6. Фурье-гармоники от 215 до 315

фиксируем эту область гармоник, с 231 по 244 включительно, и будем считать, что здесь сосредоточена большая часть мощности пика $T_a = 27.55455$ сут (ширина на полувысоте). Уточним положение центра пика усреднением всех периодов T_m в указанных границах с весом, равным мощности гармоник (т. е. квадратам амплитуд A_m^2):

$$\bar{T}_m = \frac{\sum_{m=231}^{244} (T_m^2 A_m^2)}{\sum_{m=231}^{244} A_m^2} = 27.54955 \text{ сут.}$$

Эта величина совпадает с астрономическим периодом T_a с точностью 0.005 сут. Теперь найдем значимость пика: предположительно мы имеем пик в области гармоник $m = (231 \nabla \cdot 244)$, включающей 14 гармоник (область N2). Еще левее такую же область в 14 гармоник $m = (217 \nabla \cdot 230)$ мы взять не можем — там пик $T = 29.5$ сут. Поэтому возьмем область только в 7 гармоник $m = (224 \nabla \cdot 230)$ — область N1. А правее можем взять еще одну область в 14 гармоник $m = (245 \nabla \cdot 230)$ — область N3.

Суммарно по трем областям N1 ∇ N3 получаем амплитуду белого шума $B_m = 0.190$ Гц. В результате с учетом числа гармоник в областях получаем табл. 5. Из вычисленных параметров $\bar{T}_m = 27.5495$ и значимости $\eta = +1.384$ мы можем только сказать, что есть указания на существование пика в области аномалистического периода.

4.5. Поиск солнечно-годового периода 365.2422 сут

Солнечный год (или тропический) — это промежуток времени, за который Солнце завершает один цикл смены времен года, как это видно с Земли, или время, необходимое для того, чтобы Солнце, начав

Таблица 5. Параметры выбранных областей для нахождения лунно-месячного пика

Область	N1	N2	N3
Диапазон гармоник	224∇ · 230	231∇ · 244	245∇ · 258
Периоды, сут	29.35∇ · 28.59	28.46∇ · 26.94	26.84∇ · 25.48
Число гармоник	7	14	14
\bar{A} , Гц	0.1187	0.2231	0.1819
Ошибка $s(\bar{A})$, Гц	$3.3711 \cdot 10^{-2}$	$2.3838 \cdot 10^{-2}$	$2.3838 \cdot 10^{-2}$
Ошибка $s(\bar{B})$, Гц	$5.6983 \cdot 10^{-3}$	$4.0293 \cdot 10^{-3}$	$4.0293 \cdot 10^{-3}$
Значимость η	-2.074	+1.384	-0.320

Таблица 6. Параметры выбранных областей для нахождения годового пика

Область	N1	N2	N3	N4	N5
Диапазон m	9∇ · 15	16∇ · 20	21∇ · 25	26∇ · 30	31∇ · 35
Периоды, сут	730.5∇ · 438.3	410.9∇ · 328.7	313.1∇ · 263.0	252.9∇ · 219.2	212.1∇ · 187.9
\bar{A} , Гц	0.598	1.168	0.766	0.481	0.424
Значимость η	-0.91	+2.59	+0.222	-1.45	-1.79

свое движение от выбранной эклиптической долготы, завершило один полный цикл времен года и возвратилось к той же самой эклиптической долготе — это 365 сут и 6 ч, более точно $T = 365.2422$ сут.

На рис. 7 приведены амплитуды гармоник в диапазоне $m = 1\text{∇} \cdot 35$. Гармоника $m = 18$ соответствует периоду $T_m = 365.27$ сут. Объединим гармоники ($m = 16\text{∇} \cdot 20$) вокруг T_m в область N2. Слева и справа фиксируем области N1, N3, N4, N5 (рис. 7, табл. 6). Находим мажоритарную среднеквадратичную ошибку амплитуды одной гармоники $s(A_m) = 0.373$ Гц, уровень белого шума $B_m = 0.728$ Гц, ошибку $s(B_m) = 7.17 \cdot 10^{-2}$ Гц и значимость η усредненных по мощности амплитуд по областям. Результаты показаны в табл. 6. Значимость найденного пика годового цикла солнца $\eta = +2.59$.

5. ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате фурье-анализа временного ряда данных эксперимента LVD по скорости счета гамма-квантов в подземном помещении в спектре гармоник с большой значимостью η найдены пики следующих периодов:

$T = 1$ сут, $\eta > 10$ — пик с самой большой амплитудой, вклад в который дает эффект солнечно-суточных приливов в грунте (волна S1), и в основном (больше 95%) сформирован работой персонала Лаборатории и проездом грузовиков в транспортных туннелях;

$T = 7$ сут — работа персонала в подземной лаборатории и автомобильный трафик в транспортных туннелях, $\eta > 10$;

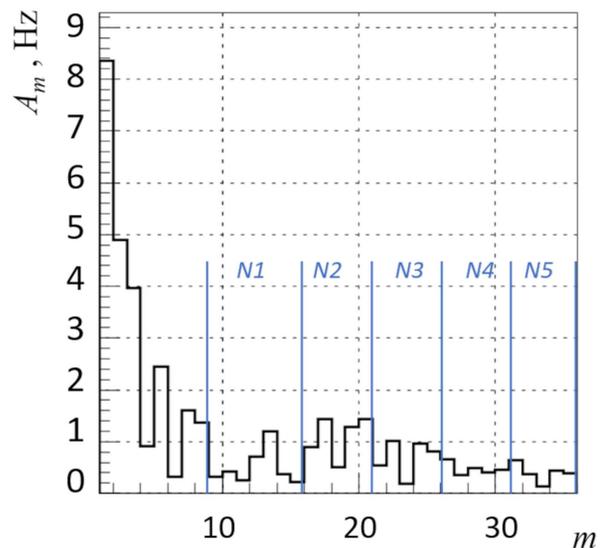


Рис. 7. Фурье-гармоники от 1 до 35

$T = (1.01\text{∇} \cdot 1.06)$ сут — период от лунно-суточных приливов в грунте (волна M1), $\eta = 8$;

$T = (0.506\text{∇} \cdot 0.531)$ сут — период от лунно-полусуточных приливов в грунте (волна M2), $\eta = 5.4$. Вычисленная суммарная мощность пика M2 меньше суммарной мощности пика S1.

Это говорит о том, что происхождение экспериментального пика S1 в основном техногенное и в меньшей степени от гравитационных эффектов Солнца.

Периоды с небольшой значимостью:

$T = (29.3\text{∇} \cdot 29.8)$ сут — синодический лунный месяц — период от лунно-солнечных приливов в грунте, $\eta = 2.7$;

$T = 365.24$ сут — годовой период между перигелиями, $\eta = 2.6$;

$T = 27.55455$ сут — аномалистический лунный месяц — период между перигеями, $\eta = 1.38$.

В нашем исследовании мы подтверждаем наличие связанных с солнечными и в большей степени с лунными периодами вариаций гамма-квантов от естественной радиоактивности под землей, существование которых при анализе потока тепловых нейтронов в приземном слое впервые было получено в работе [13].

Необходимо заметить, мы считаем, что полученный розовый фурье-спектр (большие амплитуды гармоник на малых частотах) связан с долговременной нестабильностью детекторов-счетчиков (в основном фотоумножителей), которая корректируется ежемесячными калибровками LVD, но не корректируется при измерении скорости счета гамма-квантов от распадов радона в зале установки. Однако же это не помешало найти периоды в данных LVD, связанные с гравитационными эффектами от вращения Луны и Земли.

Фаза — положение максимума косинусоиды гармоники — была определена для синодического периода ($T = 29.5$ сут). Было найдено, что через $\Delta t = (3.51 \pm 0.24)$ сут после полнолуния LVD «видит» увеличение выхода радона по измеряемым детектором гамма-квантам.

Другие фазы определить трудно, так как искомые периоды во временном ряде скоростей счета гамма-квантов состоят из нескольких гармоник со своей фазой. Поэтому единственным методом нахождения фазы для уже «заранее известных» периодов остается метод наложения эпох. В статьях [5, 6] методом наложения эпох были найдены фазы для годового периода (середина августа) и лунного синодического периода (полнолуние). В работе [6] было указание на задержку максимума выхода радона после полнолуния от 1 до 5 сут. Полученный результат в работе [6] подтверждает наличие задержки в 3.5 сут с большей точностью.

Земная кора, как и литосфера в целом, под воздействием приливных волн в Земле постоянно подвергается деформациям: во время положительных полуволн — растяжению, а во время отрицательных — сжатию. В результате таких деформаций в породах, из которых складывается земная кора, возникают внутренние напряжения, воздействующие на их физические свойства, а также изменяется объем микропор, микротрещин и капилляров. Изменение объемов микропор, капилляров и микротрещин

влечет за собой изменение соотношения объемов поровой и гравитационной (свободной) воды в водоносных слоях. Результаты нашего анализа подтверждают, что в районах геофизических разломов возрастает эманация глубинных газов, коррелирующая с приливами в земной коре.

Результаты анализа позволят выделить (разделить) в экспериментальных данных детектора случаи возрастания темпа счета гамма-квантов от естественной радиоактивности, связанные с гравитационными эффектами, и возрастания от инъекции радона при землетрясениях в итальянском регионе.

Финансирование. Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант № 23-22-00048), <https://rscf.ru/project/23-22-00048/>.

LVD Collaboration: Authors and Affiliations

N. Yu. Agafonova¹, M. Aglietta^{2,3}, P. Antonioli⁴,
V. V. Ashikhmin¹, G. Bari⁴, G. Bruno^{5,6},
E. A. Dobrynina¹, R. I. Enikeev¹, W. Fulgione^{3,5},
P. Galeotti^{2,3}, M. Garbini^{4,7}, P. L. Ghia⁸, P. Giusti⁴,
E. Kemp⁹, A. S. Malgin¹, A. Molinaro^{5,10},
R. Persiani⁴, I. A. Pless¹¹, O. G. Ryazhskaya¹,
G. Sartorelli⁴, I. R. Shakiryanova¹, M. Selvi⁴,
G. C. Trincherro^{2,3}, C. F. Vigorito², V. F. Yakushev¹,
and A. Zichichi^{4,7}

¹Institute for Nuclear Research of the Russian Academy of Sciences
117312, Moscow, Russia

²Department of Physics, University of Turin and INFN
10125, Turin, Italy

³INAF, Osservatorio Astrofisico di Torino
10025, Turin, Italy

⁴University of Bologna and INFN
40127, Bologna, Italy

⁵INFN, Laboratori Nazionali del Gran Sasso
67100, Assergi, L'Aquila, Italy

⁶New York University Abu Dhabi, NYUAD
129188, Abu Dhabi, United Arab Emirates

⁷Centro Enrico Fermi
00184, Roma, Italy

⁸Laboratoire de Physique des 2 Infinis Irène Joliot Curie, CNRS
91406, Orsay, France

⁹University of Campinas
13083, Campinas, Brazil

¹⁰Gran Sasso Science Institute
67100, L'Aquila, Italy

¹¹Massachusetts Institute of Technology
02139, Cambridge, USA

ЛИТЕРАТУРА

1. Д. В. Сивухин, *Общий курс физики*, т. V, *Атомная и ядерная физика*, Физматлит, Москва (2002).
2. Н. Ю. Агафонова, Е. А. Добрынина, Н. А. Филимонова, от имени Коллаборации LVD, Вестник Московского университета, сер. 3, физика, астрономия **78**, 2310202 (2023) [N. Yu. Agafonova, E. A. Dobrynina, and N. A. Filimonova, Moscow Univ. Phys. **78**, 27 (2023)].
3. Н. Ю. Агафонова, В. В. Ашихмин, В. Л. Дадыкин, Е. А. Добрынина, Р. И. Еникеев, А. С. Мальгин, О. Г. Рязжская, И. Р. Шакирьянова, В. Ф. Якушев и Коллаборация LVD, Изв. РАН, сер. физ. **81**, 551 (2017) [N. Yu. Agafonova, V. V. Ashikhmin, V. L. Dadykin, E. A. Dobrynina, R. I. Enikeev, A. S. Malgin, O. G. Ryazhskaya, I. R. Shakiyanova, V. F. Yakushev, and the LVD Collaboration, Bull. Russ. Acad. Sci., Physics **81**, 512 (2017)].
4. Н. Ю. Агафонова, В. В. Ашихмин, Е. А. Добрынина, Р. И. Еникеев, А. С. Мальгин, К. Р. Рудаков, О. Г. Рязжская, И. Р. Шакирьянова, В. Ф. Якушев, Изв. РАН, сер. физ. **83**, 673 (2019) [N. Yu. Agafonova, V. V. Ashikhmin, E. A. Dobrynina, R. I. Enikeev, A. S. Malgin, K. R. Rudakov, O. G. Ryazhskaya, I. R. Shakiryanova, and V. F. Yakushev, Bull. Russ. Acad. Sci., Physics **83**, 614 (2019)].
5. Н. Ю. Агафонова, Е. А. Добрынина, Н. А. Филимонова, И. Р. Шакирьянова, от имени Коллаборации LVD, ЖЭТФ **164**, 386 (2023) [N. Yu. Agafonova, E. A. Dobrynina, N. A. Filimonova, and I. R. Shakiryanova, JETP **137**, 333 (2023)].
6. N. Yu. Agafonova, V. V. Ashikhmin, E. A. Dobrynina et al., on behalf of the LVD Collaboration, Phys. Atom. Nuclei **86**, 1014 (2023).
7. П. Мельхиор, *Земные приливы*, Мир, Москва (1968).
8. G. Bari, M. Basile, G. Bruni, G. Cara Romeo, A. Castelvetti, L. Cifarelli, A. Contin, C. Del Papa, P. Giusti, G. Iacobucci, G. Maccarrone, T. Massam, R. Nania, V. O'Shea, F. Palmonari et al., Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. A **264**, 5 (1988).
9. Национальная лаборатория Гран-Сассо Национального института ядерной физики Италии <https://www.lngs.infn.it> (дата обращения 20.01.2024).
10. G. Bruno, PhD Thesis, Univ. Degli Studi di L'Aquila, L'Aquila (2012).
11. Н. Ю. Агафонова, В. А. Алексеев, Е. А. Добрынина, В. В. Кузнецов, А. С. Мальгин, О. Г. Рязжская, В. Ф. Якушев, Препринт № 1071/2001 ИЯИ РАН, Москва (2001).
12. Н. Ю. Агафонова, О. Г. Рязжская, от имени Коллаборации LVD, ЖЭТФ **161**, 533 (2022) [N. Yu. Agafonova, M. Aglietta, P. Antonioli, V. V. Ashikhmin, G. Bari, G. Bruno, E. A. Dobrynina, R. I. Enikeev, W. Fulgione, P. Galeotti, M. Garbini, P. L. Ghia, P. Giusti, E. Kemp, A. S. Malgin, A. Molinario, R. Persiani, I. A. Pless, O. G. Ryazhskaya, G. Sartorelli, I. R. Shakiryanova, M. Selvi, G. C. Trinchero, C. F. Vigorito, V. F. Yakushev, and A. Zichichi, JETP **134**, 449 (2022)].
13. В. В. Алексеенко, Ю. М. Гаврилюк, Д. М. Громушкин, Д. Д. Джаппуев, А. У. Куджаев, В. В. Кузьминов, О. И. Михайлова, Ю. В. Стенькин, В. И. Степанов, Физика земли **45**, 91 (2009) [V. V. Alekseenko, Y. M. Gavrilyuk, D. D. Dzhappuev, A. U. Kudzhaev, V. V. Kuzminov, O. I. Mikhailova, Y. V. Stenkin, V. I. Stepanov, D. M. Gromushkin, Izvestiya, Phys. Sol. Earth **45**, 709 (2009)].