

ПРОИСХОЖДЕНИЕ СИГНАЛА, ЗАРЕГИСТРИРОВАННОГО ДЕТЕКТОРОМ LSD ПОСЛЕ АВАРИИ НА ЧЕРНОБЫЛЬСКОЙ АЭС

Н. Ю. Агафонова^{a*}, А. С. Мальгин^{a**}, В. Фульджионе^{b***}

^a Институт ядерных исследований Российской академии наук
117312, Москва, Россия

^b Институт физики межпланетного пространства, Турин, Италия, INFN-Torino and OATO-Torino
10100, Torino, Italy

Поступила в редакцию 27 февраля 2013 г.

27 апреля 1986 года в 23 ч 53 мин московского времени низкофоновый сцинтилляционный детектор LSD, расположенный под Монбланом на расстоянии 1820 км от Чернобыля, зарегистрировал редкий сигнал. Для выяснения происхождения сигнала LSD обсуждаются результаты других установок, работавших в мире по аналогичной программе, анализируются характеристики импульсов сигнала, а также факты, относящиеся к взрыву реактора Чернобыльской АЭС. Рассматривается гипотеза, базирующаяся на регистрации детектором LSD гамма-квантов от β -распадов ядер ^{135}I , выброшенных взрывом в атмосферу и внесенных в подземное помещение детектора воздухом принудительной вентиляции. «Взрывное» происхождение сигнала LSD указывает на новый техногенный источник фона при поиске нейтринных вспышек от коллапсирующих звездных ядер.

DOI: 10.7868/S0044451013080087

1. ВВЕДЕНИЕ

В работе [1] приведены характеристики редко-го сигнала, зарегистрированного советско-итальянским детектором LSD (liquid scintillation detector) через 46.1 ч после взрыва на Чернобыльской АЭС (ЧАЭС). Размещенный под Монбланом (Италия) детектор работал в непрерывном режиме с января 1985 г. по март 1999 г. с целью обнаружения всплеска нейтринного излучения от коллапса звездного ядра [2]. Авторы работы [1] связывают сигнал со взрывом реактора ЧАЭС и объясняют его происхождение регистрацией детектором LSD гамма-квантов от радиационного захвата нейтронов спонтанного деления плутония $^{238-240}\text{Pu}$ ядрами железа, входящего в состав установки. Изотопы $^{238-240}\text{Pu}$ могли содержаться в микрочастицах реакторного топлива, достигших Монблана в радио-

активном облаке и занесенных в камеру детектора вентиляцией.

В данной статье анализируются факты, относящиеся как к событиям (импульсам) зарегистрированного сигнала, так и ко взрыву реактора. Результаты анализа дают дополнительные аргументы в пользу связи сигнала LSD со взрывом реактора ЧАЭС и отличного от предложенного в [1] механизма его возникновения.

2. ДЕТЕКТОР LSD

Подробное описание детектора дано в работах [1, 2]. Приведем характеристики LSD, важные для получаемых ниже заключений. Низкофоновый детектор LSD (рис. 1) находился во вспомогательном техническом помещении (гараже) 12-километрового автотранспортного туннеля между Италией и Францией, проходящего на высоте 1400 м с юго-востока на северо-запад. Гараж находился в 3.9 км от въезда с итальянской стороны. Толщина скального грунта около 2 км над установкой подавляла поток мюонов космических лучей на шесть порядков.

*E-mail: natagafonova@gmail.com

**E-mail: malgin@lngs.infn.it

***W. Fulgione

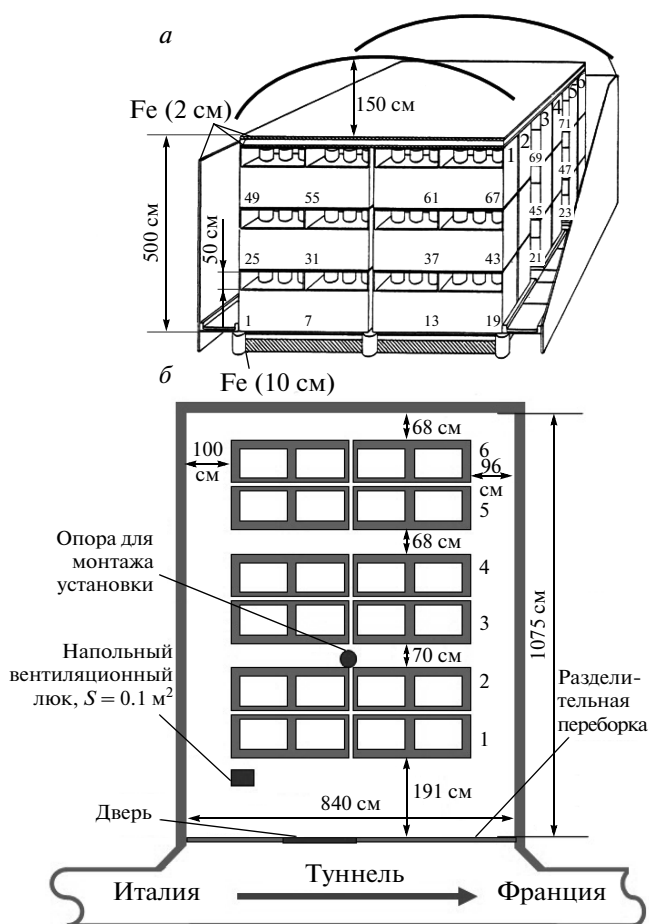


Рис. 1. а) Детектор LSD, цифры от 1 до 72 — порядковый номер счетчика; б) схема эксперимента LSD (вид сверху), 1–6 — номера стенок

Детектор состоял из 72 сцинтилляционных счетчиков объемом $1.5 \text{ м} \times 1.0 \text{ м} \times 1.0 \text{ м} = 1.5 \text{ м}^3$ и массой жидкого сцинтиллятора 1.2 т в каждом, помещенных в железные контейнеры с толщиной стенок около 2.0 см [3]. Толщина стенок корпуса счетчика, изготовленного из листов нержавеющей стали, составляла 0.4 см, масса железа контейнеров — 90 т. Каждый счетчик был оснащен тремя фотомножителями ФЭУ-49Б и имел систему регистрации, фиксирующую амплитуду и время появления импульса-триггера с энергиями выше 5 МэВ у 16 внутренних счетчиков и около 7 МэВ у внешних 56 счетчиков. На вход логической части электроники, отбирающей сигналы для регистрации (схема трехкратных совпадений), поступали импульсы каждого ФЭУ, а на вход аналоговой — суммарный токовый импульс трех ФЭУ. После триггерного импульса в течение 500 мкс регистрировались все им-

пульсы с амплитудой выше 0.8 МэВ, в том числе np - или $n\text{Fe}$ -захватные γ -кванты в случае образования нейтрона в веществе детектора в момент появления триггера. Эффективность регистрации нейтронов по захватным квантам составляла 50 %. Точность определения амплитуды в диапазоне энергий 10–20 МэВ составляет примерно 20 %, временное разрешение — 0.2 мкс, точность временной привязки — 1 мс. Средний темп счета триггеров около 45 ч^{-1} . Темп счета нейтроноподобных фоновых импульсов в воротах 500 мкс равен примерно 0.1 для внутреннего счетчика и 0.8 для внешнего.

Процедура выделения сигнала-кандидата на регистрацию нейтринного всплеска детально описана в работах [1, 2]. Сигналом являлось сгущение (кластер) из трех и более импульсов-триггеров (событий) на выходе детектора. Кластеры выделялись в режиме on-line компьютером, обрабатывавшим и записывавшим информацию на магнитный носитель. Кандидатом считался кластер, рассчитанная частота которого (по среднему темпу счета фоновых импульсов 0.012 с^{-1}) была реже одного в неделю. Напомним, что ожидаемая частота коллапсов в нашей Галактике приблизительно равна 0.025 год^{-1} . В течение 15 лет работы детектора были зафиксированы два кластера с минимальной частотой имитации фоном: 27.04.1986 г. [1] и 23.02.1987 г. [2]. Первый имел частоту имитации 1.5 год^{-1} (11 событий за 67 с), второй — около 0.7 год^{-1} (5 событий за 7 с) и был, наиболее вероятно, вызван потоком нейтрино от Сверхновой SN1987A.

3. ОСОБЕННОСТИ КЛАСТЕРА, ЗАФИКСИРОВАННОГО 27.04.86 г.

Кластер содержал 11 событий и имел длительность 67 с (таблица). Средний интервал между событиями кластера $\overline{\Delta t_c} = 6.7 \text{ с}$, в то время как для фоновых событий $\overline{\Delta t_b} = 80 \text{ с}$. Таким образом, кластер вмещается в интервал $\overline{\Delta t_b}$. Первое событие кластера находится в 48 с от фонового, последнее — в 37 с. Событие № 6 (счетчик № 13) имеет аномально высокую энергию 34 МэВ. Анализ работы счетчика № 13 в течение серии наблюдений (RUN № 1173 длительностью 170 ч) показал, что энергетическое распределение фоновых импульсов счетчика № 13 отличается от стандартного: в нем присутствуют фоновые события с энергией 20–40 МэВ, не являющиеся мюонными. Поскольку в течение 67 с (длительность кластера) возможно появление в среднем 0.8 триггерных импульсов, событие № 6 более вероятно яв-

Таблица. Характеристики кластера 27.04.86 (первый импульс обнаружен в 23 ч 32 мин 17 с московского времени через 48 с после фонового)

	№ события										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
T , с	0	2	13	16	19	23	29	40	48	58	67
№ счетчика	57	51	34*	31	19	13	11*	43	1	72	9*
№ уровня (1–3)	3	3	2	2	1	1	1	2	1	3	1
№ ряда (1–4)	2	1	2	2	4	3	2	4	1	4	2
№ стенки (1–6)	3	3	4	1	1	1	5	1	1	6	3
E , МэВ	8.7	9.3	9.3	9.0	20.4	34.2	9.6	9.0	12.3	12.3	7.2
Импульсы в нейтронном канале, порог 0.8 МэВ	0	0	0	2	0	1	1	0	0	1	0
Фоновый темп счета счетчика, с^{-1} , порог 0.8 МэВ	1132	2928	150	901	1113	655	169	1209	950	2990	111

Примечание: * — внутренние счетчики с энергетическим порогом 5 МэВ.

ляется аномальным фоновым событием, не принадлежащим кластеру.

Счетчики, зарегистрировавшие 10 реальных событий, распределены в объеме детектора неоднородно. Разобьем детектор на ряды (x), стенки (y) и уровни (z) (начало координат — счетчик № 1, ось x направлена вдоль туннеля, см. рис. 1). При однородном (равновероятном) распределении событий в детекторе (это допущение справедливо, так как энергия E всех импульсов выше порога 7 МэВ) среднее количество $\bar{n}$ событий должно составлять $\bar{n}_x = 10/4 = 2.50$ в рядах, $\bar{n}_y = 10/6 = 1.67$ в стенках и $\bar{n}_z = 10/3 = 3.33$ в уровнях. Максимальное число событий зарегистрировано во втором ряду ($n_x^{max} = 5$), в первой стенке ($n_y^{max} = 4$), в первом уровне ($n_z^{max} = 4$). Отклонения η этих величин от $\bar{n}$ составляют

$$\eta_x = \frac{n_x^{max} - \bar{n}_x}{\sqrt{\bar{n}_x}} = \frac{5 - 2.50}{\sqrt{2.50}} = 1.58\sigma_x,$$

$$\eta_y = \frac{4 - 1.67}{\sqrt{1.67}} = 1.81\sigma_y, \quad \eta_z = \frac{4 - 3.33}{\sqrt{3.33}} = 0.37\sigma_z,$$

где $\sigma_i = \sqrt{\bar{n}_i}$, $i = x, y, z$. Максимальное отклонение $\eta_y = 1.81\sigma_y$ соответствует событиям в первой стенке (см. рис. 1).

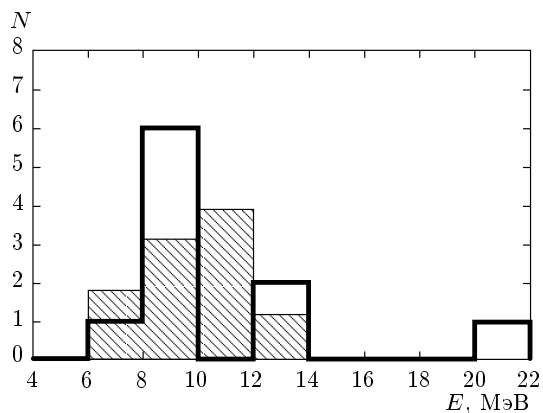


Рис. 2. Пустая гистограмма (сплошная жирная линия) — энергетическое распределение событий кластера; штрихованная — распределение фоновых событий, нормированное на количество событий в кластере. N — число событий; шаг гистограмм $\Delta E = 2$ МэВ выбран в соответствии с энергетическим разрешением счетчиков

События кластера обладают следующими особенностями.

1. Узкое, по сравнению с фоновым, энергетиче-

ское распределение событий (шесть событий с энергией около 9 МэВ), смещенное примерно на 2 МэВ от энергетического порога 7 МэВ (рис. 2).

2. В чувствительном «нейтронном» канале было зафиксировано 5 импульсов, включая импульс счетчика № 13 (см. таблицу, строка 8). Импульсы следует отнести к фоновым γ -квантам, так как нет ни экспериментальных, ни физических оснований связывать их с нейтронами. Три из них — в пяти счетчиках уровней 1 и 2 первой стенки, ближайших к объему 50 м^3 перед установкой. Средний фоновый темп счета этих счетчиков составляет $R(5) = 966 \text{ с}^{-1}$ (см. таблицу, строка 9), чему соответствует темп счета в воротах 500 мкс, равный $r_b(5) = 0.48 (500 \text{ мкс})^{-1}$. Для пяти событий кластера темп счета в воротах составляет $r_c(5) = 3/5 = 0.6 (500 \text{ мкс})^{-1}$. Для остальных шести счетчиков кластера

$$R(6) = 1247 \text{ с}^{-1}, \quad r_b(6) = 0.62 (500 \text{ мкс})^{-1},$$

$$r_c(6) = 2/6 = 0.33 (500 \text{ мкс})^{-1}.$$

Все величины приведены в расчете на один счетчик. Таким образом, соотношение $r_c(5) > r_b(5)$ указывает на то, что темп счета r_c счетчиков первой стенки мог превышать фоновую величину; в остальных шести счетчиках кластера это маловероятно. В целом по счетчикам кластера

$$R(11) = 1119 \text{ с}^{-1}, \quad r_b(11) = 0.56 (500 \text{ мкс})^{-1},$$

$$r_c(11) = 5/11 = 0.45 (500 \text{ мкс})^{-1},$$

т. е. усредненный темп счета $r_c(11)$ не превышал фоновой величины $r_b(11)$.

3. На рис. 3а показано интегральное временное распределение $N(t)$ событий кластера на интервале от 0 до 67 с. При небольшой статистике интегральная форма наглядно представляет характер распределения. Распределение событий кластера отличается от равновероятного (пуассоновского) и согласуется с законом $\exp(-t/\tau_c)$ при $\tau_c = 120 \text{ с}$ (рис. 3а).

Таким образом, особенности сигнала LSD, кроме второй (см. пункт 2), не согласуются с его фоновой природой. Сигнал также нельзя отнести и к регистрации нейтринного всплеска: его длительность 67 с находится на пределе модельных представлений. Кроме того, после 26-го апреля не появилось сообщений ни об астрономических наблюдениях сверхновой, ни о редких сигналах установок, работавших в мире по аналогичной с LSD программе. Это послужило основанием исключить сигнал LSD из кандидатов на регистрацию нейтринного излучения от сверхновой.

4. ДАННЫЕ ДРУГИХ УСТАНОВОК

К моменту аварии на ЧАЭС в мире помимо LSD было 5 установок, непрерывно мониторировавших нейтринные всплески: «Коллапс» [4] (Украина), БПСТ [5] (Баксан, Северный Кавказ), Сцинтилляционный телескоп (Юж. Дакота, США), ИМВ (Огайо, США), КП (Камиока, Япония). Ближе всех к ЧАЭС находились два детектора — «Коллапс» (600 км) и БПСТ (1300 км, рис. 4); установки созданы Институтом ядерных исследований РАН в конце 70-х гг. Оба детектора работают и сегодня.

БПСТ (Баксанский подземный сцинтилляционный телескоп, глубина 850 м.в.э.¹⁾) — модульный сцинтилляционный детектор, состоящий из 3156 счетчиков с полной массой сцинтиллятора 330 т. Каждый счетчик оснащен одним ФЭУ-49. Система регистрации счетчика имеет порог 10 МэВ. Установка «Коллапс» находится вблизи г. Артемовска (соляная шахта, 570 м.в.э.). «Коллапс» — монодетектор цилиндрической формы с равновеликими диаметром и высотой примерно 5.5 м. Объем жидкого сцинтиллятора 130 м^3 просматривается ФЭУ-49, количество которых 128. Методика регистрации нейтринного излучения детектором «Коллапс» была использована в LSD, поэтому «Коллапс» также имел чувствительный «нейтронный» канал с энергетическим порогом 0.8 МэВ, по возросшему темпу счета которого и было зафиксировано появление продуктов аварии. Это произошло через неделю после взрыва, когда подул северо-западный ветер. Нарастание продолжалось несколько дней, а затем сменилось медленным спадом в течение 3 нед. К детектору радиоактивность была принесена шахтной вентиляцией. О каких-либо особенностях потока событий БПСТ не сообщалось, что можно объяснить высоким энергетическим порогом счетчиков БПСТ.

5. ДВИЖЕНИЕ ПРОДУКТОВ ВЗРЫВНОГО ВЫБРОСА

В первые сутки после аварии направление ветра в районе ЧАЭС сильно менялось: 26 апреля — восточный ветер, 26–27 апреля — юго-восточный, 28–29 апреля — юго-западный, 29–30 апреля — северо-западный с переходом на северный. В Швеции (Стокгольм) нарастание радиационного фона было замечено 27 апреля в 8 ч утра московского времени. Расстояние между ЧАЭС и Стокгольмом $D_1 = 1170 \text{ км}$, ЧАЭС и LSD — $D_2 = 1820 \text{ км}$

¹⁾ Метры водного эквивалента.

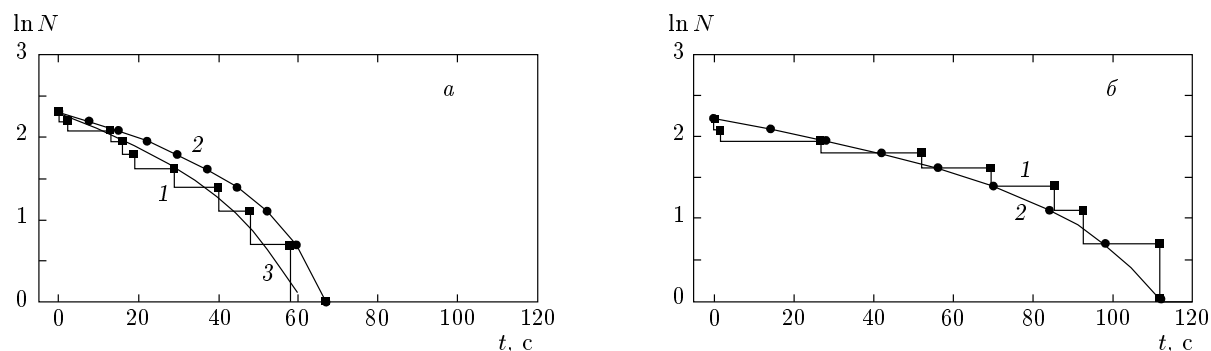


Рис. 3. Интегральное временное распределение $N(t)$ событий: a — в кластере 27.04.86; b — в типичном фоновом кластере: гистограммы 1 — сигнал; расчетные кривые 2 соответствуют равновероятному (пуассоновскому) временному распределению событий в кластерах; кривая 3 — функция $N(t) = \exp(-t/120 \text{ c})$; $t_0 = 23 : 32 : 17$ (a), $23 : 49 : 42$ (b) — время первого импульса в кластере; $F = 1.5 \text{ год}^{-1}$ (a), 41.1 год^{-1} (b) — частота имитации кластера фоном

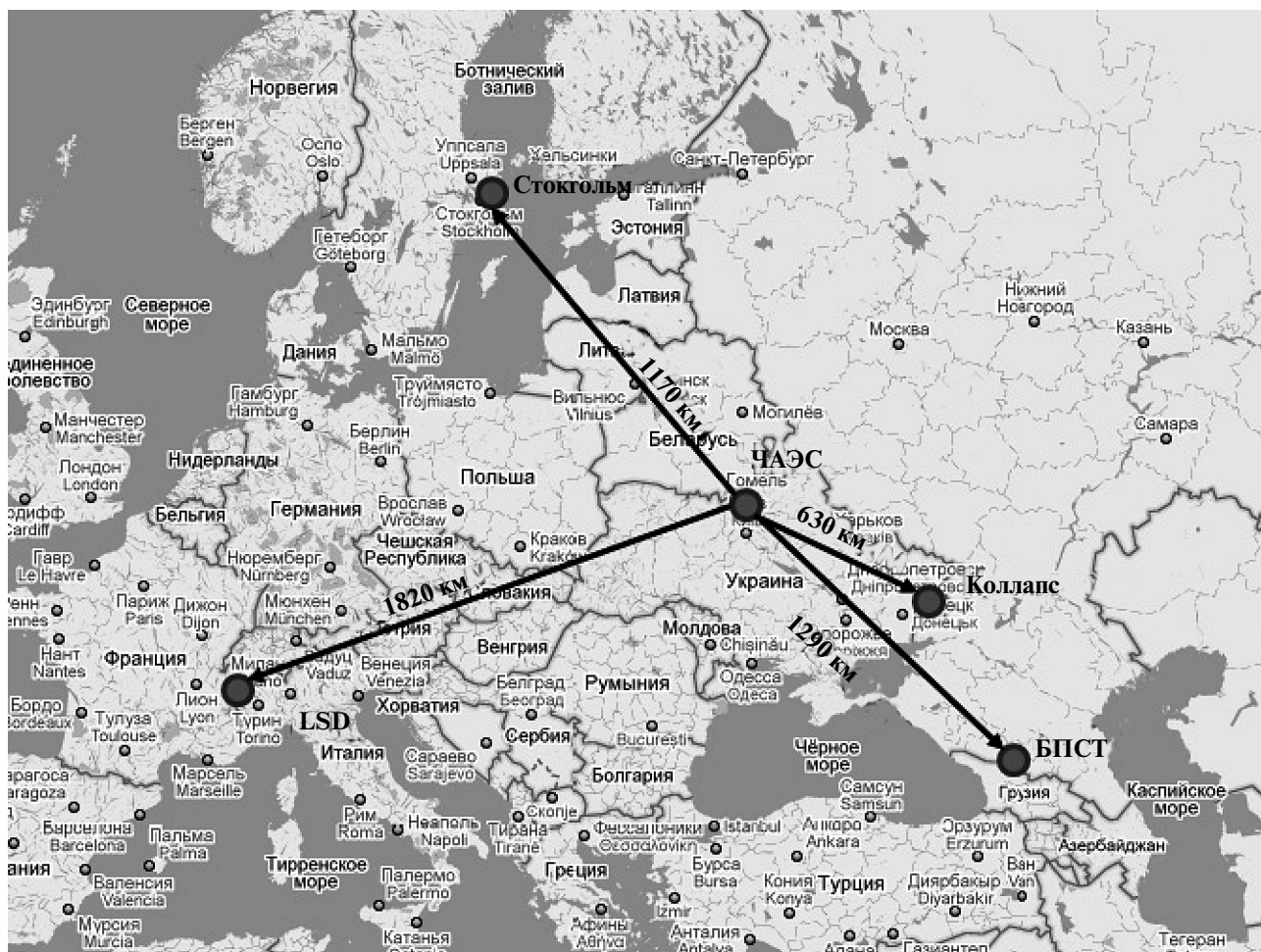


Рис. 4. Расположение детекторов относительно ЧАЭС

(рис. 4). Задержки регистрации сигналов относительно времени аварии составили $\Delta t_1 = 30.6$ ч и $\Delta t_2 = 46.1$ ч, отсюда скорости движения продуктов взрыва к Стокгольму и к Монблану в предположении их прямолинейного движения над поверхностью Земли равны

$$v_1 = \frac{D_1}{\Delta t_1} = 38.2 \frac{\text{км}}{\text{ч}}, \quad v_2 = \frac{D_2}{\Delta t_2} = 39.5 \frac{\text{км}}{\text{ч}}.$$

Таким образом, продукты первичного взрывного выброса, образовав одновременно два радиоактивных облака, РО1 и РО2, двигались от ЧАЭС практически с одинаковой скоростью: РО1 — на северо-запад, РО2 — на юго-запад. Как известно, радиоактивные облака движутся обычно в широтном направлении со скоростями зональных ветров 30–60 км/ч на различных высотах тропосферы (и стратосферы) в зависимости от динамики и состава выброса. Тяжелая фракция выброса, содержащая аэрозоли и микрочастицы топлива, в виде облака РО1 двигалась на высоте около 1 км в северо-западном направлении, создавая радиоактивный след на земле. Благородные газы (в основном ксенон) и газообразный йод, как наиболее летучие вещества, поднявшись в верхние слои тропосферы и образовав РО2, могли перемещаться на юго-запад, не оставляя радиоактивного следа. Это возможно, если в общем потоке воздушных масс, двигавшихся с востока на запад со скоростью около 40 км/ч, существовали разные струйные течения: на высоте около 1 км — в сторону Швеции, на высотах более 5 км — на юго-запад. Если РО2 находилось выше 5–6 км, то оно могло миновать области турбулентности над невысокими горными грядками Восточной Европы (высота $H \leq 3$ км) и достичь Альп. Высокие Альпы (г. Монблан, высота $H = 4810$ м) вызывают интенсивное перемешивание воздушных потоков. Здесь РО2 могло рассеяться, и его зараженный воздух, оказавшись на уровне юго-восточного, итальянского, въезда ($H = 1390$ м над уровнем моря), мог быть внесен вентиляцией в гараж LSD в виде кратковременного вброса. Воздух в туннель подавался по воздуховоду под полотном шоссе со стороны Италии. В гараж воздух поступал с мощностью $600 \text{ м}^3/\text{ч}$ через напольный люк (см. рис. 16). Полный объем гаража 540 м^3 , объем воздуха в гараже около 350 м^3 . Часть объема камеры перед установкой (95 м^3 , см. рис. 1) была занята изолированным помещением для электроники, поднятым над полом и примыкавшим вплотную к счетчикам третьего уровня первой стенки. Объем помещения был 45 м^3 , следовательно, открытый объем перед установкой, куда в первую оче-

редь попадал воздух вентиляции (перед счетчиками уровней 1 и 2 первой стенки) составлял 50 м^3 .

Необходимо отметить, что радиационный фон на северо-западе Италии начал повышаться на пятый день после аварии, т. е. 30-го апреля [6].

6. ПРОИСХОЖДЕНИЕ ИМПУЛЬСОВ СИГНАЛА LSD

Аргументами в пользу связи сигнала LSD с аварией на ЧАЭС являются:

- а) расположение LSD на пути движения воздушных масс от ЧАЭС;
- б) задержка сигнала Δt_2 , соответствующая скорости движения радиоактивного облака;
- в) неоднородное пространственное распределение сработавших счетчиков, концентрирующихся вблизи объема 50 м^3 перед установкой, куда в первую очередь поступал зараженный воздух через вентиляционный люк.

Кроме того, сигнал LSD невозможно связать ни с фоном, ни со сверхновой. Следовательно, в рамках «взрывной» гипотезы должны найти объяснение как указанные выше особенности сигнала 1–3 (см. разд. 3), так и, в дополнение к ним, следующие факты:

4. нормальный уровень радиационного фона 27–28 апреля в районе Монблана;
5. отсутствие похожего сигнала (кластера импульсов при энергетическом пороге 5 МэВ) на детекторе «Коллапс».

При обсуждении происхождения сигнала LSD нужно понимать, что все предлагаемые гипотезы носят вероятностный характер, поскольку зарегистрированные события не имеют характерной сигнатуры, позволяющей однозначно установить тип излучения. В силу конструкции счетчиков и детектора появление источников излучения в атмосфере камеры могло быть зафиксировано только по гамма-квантам.

7. Рu-ГИПОТЕЗА

Рассмотрим соответствие фактов 1–5 (см. разд. 3 и 6) гипотезе, предложенной в работе [1]. Назовем ее Рu-гипотезой, так как она базируется на спонтанном делении ядер $^{238,240,242}\text{Pu}$, входящих в состав аэрозолей реакторного топлива. Ядра Рu имеют времена жизни относительно спонтанного деления примерно на 5 порядков более короткие по сравнению с временами жизни ядер ^{238}U и ^{235}U . При делении Рu появ-

ляются 2.2 нейтрона, в основном надтепловых энергий. Часть из них после термализации в сцинтилляторе захватывается в железных стенках с сечением 2.6 б. Захват сопровождается выходом 1–3 γ -квантов с суммарной энергией $E_\gamma = 7.67$ МэВ для основного изотопа ^{56}Fe (91.7%). По форме спектр импульсов от энерговыделений $n\text{Fe}$ -захватных γ -квантов в области выше порога $E_{th} = 7$ МэВ близок спектру фоновых импульсов, с которым плохо согласуется энергетический спектр зарегистрированных импульсов кластера (см. рис. 2).

Авторами работы [1] получена масса занесенного в гараж реакторного топлива, $m_f = 1$ г, необходимая для создания сигнала LSD. Топливо является мощным источником радиоактивности при энергиях меньше 3 МэВ. Определим радиоактивность i_γ массы $m_f = 1$ г по γ -излучению ^{137}Cs , используя радиоактивность $I_\gamma(^{137}\text{Cs}) = 7$ МКи всего топлива $M_f = 190$ т, загруженного в реактор [7]. Допустим, как и в работе [7], что мощность дозы и количество топлива связаны линейной зависимостью:

$$i_\gamma = \frac{I_\gamma}{M_f} = \frac{7 \cdot 10^6 \cdot 3.7 \cdot 10^{10} \text{ с}^{-1}}{190 \cdot 10^6 \text{ г}} = 1.4 \cdot 10^9 \text{ с}^{-1} \cdot \text{г}^{-1}.$$

При эффективности регистрации γ -кванта с энергией 0.66 МэВ, равной $\eta_\gamma \approx 0.1$, для десяти счетчиков получаем число импульсов n_γ с энергией более 0.8 МэВ во временных воротах $\Delta t_g = 500$ мкс

$$n_\gamma = \frac{10}{72} i_\gamma \eta_\gamma \Delta t_g \approx 10^4,$$

которое более чем в 10^3 раз превышает зарегистрированное количество (см. таблицу) и резко противоречит факту 3.

Активность i_γ была внесена в гараж объемом воздуха ΔV . Величину ΔV можно оценить, считая, что время Δt_{in} вхождения воздуха в гараж сравнимо с длительностью интервала между первым событием кластера и предшествующим ему импульсом фоновой последовательности, $\Delta t_{in} = 48$ с, тогда

$$\Delta V \approx \Delta t_{in} Q_{vent} = 48 \text{ с} \cdot 0.17 \text{ м}^3/\text{с} \approx 8 \text{ м}^3,$$

где $Q_{vent} \approx 0.17 \text{ м}^3/\text{с} = 600 \text{ м}^3/\text{ч}$ — мощность приточной вентиляции гаража.

Таким образом, удельная активность по ^{137}Cs , a_γ , облака РО2 после его рассеяния должна была иметь величину не меньше

$$a_\gamma = i_\gamma / \Delta V = 1.4 \cdot 10^9 / 8 = 1.7 \cdot 10^8 \text{ с}^{-1} \cdot \text{м}^{-3} \quad (170 \text{ МБк}/\text{м}^3),$$

более чем достаточную для уверенного обнаружения службами радиационного контроля Италии и Франции. Полученная величина активности a_γ не согласуется с фактом 4 и данными UNSCEAR [6].

Наряду с фактами 1, 2 и 4 в противоречии с Ри-гипотезой находится и особенность 3 сигнала LSD. Средняя энергия нейтронов деления Ри около 2 МэВ, поэтому в их взаимодействиях с ядрами железа и скального грунта доминирует рассеяние. Альбеда нейтронов деления от стали контейнеров и соотношение размеров установки и камеры подавляли число нейтронов, проникающих в счетчики первой стенки детектора, примерно в 4 раза. Большая часть нейтронов в результате альбеда от железной облицовки гаража и скального грунта за доли секунды распределялась по гаражу, облучая детектор практически со всех сторон с интенсивностью, пропорциональной массе внесенного топлива. Количество аэрозолей в гараже после фазы их поступления должно убывать по экспоненте «выветривания» $\exp(-t/\tau_v)$ за счет притока чистого воздуха. Время τ_v определяется мощностью вентиляции $Q_{vent} = 600 \text{ м}^3 \cdot \text{ч}^{-1}$ и объемом воздуха в гараже $V \approx 350 \text{ м}^3$:

$$\tau_v \approx V / Q_{vent} \approx 0.6 \text{ ч}.$$

В то же время из графика на рис. 3а следует, что реальное распределение лучше согласуется с экспонентой при $\tau_c \approx 120$ с.

Факт 5 в рамках Ри-гипотезы объясняется тем, что состав истекающей из разрушенного реактора струи отличался от состава первичного, взрывного, выброса. Поэтому радиоактивное облако, достигшее Артемовска через неделю после взрыва, не содержало заметного количества Ри (более $0.1 \text{ г} \cdot \text{м}^{-3}$). В противном случае деление ядер Ри в камере детектора «Коллапс» привело бы к появлению кластера импульсов с $E \geq 5$ МэВ как от γ -квантов деления, так и γ -квантов от захвата нейтронов в соли ядрами ^{35}Cl .

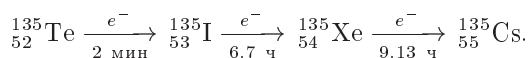
В итоге можно констатировать, что Ри-гипотеза не согласуется с фактами 1–4.

Следует заметить, что внесение в атмосферу гаража топлива с массой даже 0.01 г привело бы, с одной стороны, к повышению темпа счета в «нейтронном» канале всех счетчиков установки и, с другой, к увеличению длительности сигнала до времени экспоненты «выветривания». Поэтому гипотезы, привлекающие микрочастицы топлива и аэрозольную форму радиоактивности, поступившей в гараж, не пригодны для объяснения сигнала LSD.

8. I-ГИПОТЕЗА

I-гипотеза объясняет появление сигнала LSD регистрацией γ -квантов от распада ядер ^{135}I , выброшенных из реактора. Ядро ^{135}I было выбрано по следующим причинам: а) йод имеет газообразную форму и поэтому во взрывном выбросе входит в состав легкой фракции, отделившейся от аэрозолей и микрочастиц топлива; б) изотоп ^{135}I активно нарабатывается как в штатном режиме реактора, так и в критическом; в) время жизни $\tau = 9.67$ ч достаточно для распространения на большие расстояния; г) распадные γ -кванты имеют энергии более высокие, чем от распадов его изотопов и дочерних ядер ^{135}Xe , ^{135}Cs ; д) ^{135}I обладает заметной долей распадов $d_{2\gamma} = 0.064$ с выходом не менее двух квантов, энергия каждого из которых $\varepsilon_{1\gamma} \geq 1$ МэВ. В принципе, на роль кандидата для объяснения сигнала LSD подходит любой радиоактивный изотоп легкой фракции взрыва, обладающий свойствами б, в, д.

Известно, что реактор ЧАЭС незадолго до взрыва находился в «йодной яме». Физической причиной взрыва реактора был его разгон на мгновенных нейтронах в условиях «йодной ямы» и ксенонового отравления реактора. Ядра ^{135}I появляются непосредственно при делении урана, а также в цепочке распадов



Полный выход $^{135}_{53}\text{I}$ составляет около 6 % от числа всех делений.

В штатном режиме работы реактора типа РБМК концентрация $c(\text{I})$ йода ^{135}I около 10^{16} см^{-3} . При разгоне реактора на мгновенных нейтронах величина $c(\text{I})$ линейно зависит от интенсивности делений, которая, в свою очередь, определяется потоком нейтронов. Результаты моделирования, представленные в официальном отчете [9], показывают, что поток нейтронов к моменту взрыва ($t = 0$) вырос в 470 раз по сравнению со стационарным режимом. В таком случае предельной концентрацией $c_0(\text{I})$ в момент $t = 0$ можно принять величину $5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$.

Зафиксированные разрушения [10] и экспериментальные данные (см., например, [11]) говорят о большом быстром энерговыделении в локальном объеме реактора, проявившемся в виде взрыва. Через 46 ч после взрыва, к моменту достижения Монблана, в РО2 за счет распада осталось 0.8 % ядер ^{135}I . Взрывное расширение РО2, перемешивание воздушных потоков и диффузия газа должны были многократно понизить концентрацию $c(\text{I})$ в воздухе, вошедшем в гараж LSD.

Поскольку порция зараженного воздуха $\Delta V \approx 8 \text{ м}^3$ поступила в первую очередь в объем $V = 50 \text{ м}^3$ перед восемью счетчиками уровней 1 и 2 первой стенки, в которых было зафиксировано $N_{event} = 4$ события за 32 с, возможность образования сигнала распадными γ -квантами будем рассматривать, используя данные этих счетчиков в расчете на один счетчик. В таком случае средний темп счета событий составляет

$$i_{event} = \frac{4}{8 \cdot 32 \text{ с}} = 1.56 \cdot 10^{-2} \text{ с}^{-1}.$$

Триггерные импульсы (события) могут возникать в результате одновременного попадания двух квантов с энергией $\varepsilon_{1\gamma} \geq 1$ МэВ в область высокой неоднородности светосбора счетчика, для γ -квантов ограниченную радиусом около 25 см от центра ФЭУ. Реальная величина энерговыделения в этой области может быть завышена в 5–10 раз за счет большого прямого света, пришедшего к ФЭУ [12]. Для создания импульса большой амплитуды (события с завышенной регистрируемой энергией) необходимо, чтобы кванты одновременно попали в симметричные, относительно центрального ФЭУ, области около центрального и боковых ФЭУ. В результате амплитуды импульсов каждого ФЭУ могут превысить энергетический порог дискриминаторов E_{th} , и будет зафиксировано высокое энерговыделение. Чтобы оказаться в области большой неоднородности, каждый из двух квантов должен упасть на один из двух участков крышки с площадью $s^{un} \approx 0.5 \text{ м} \times 0.4 \text{ м} = 0.2 \text{ м}^2$, включающий в себя фотокатоды центрального и бокового ФЭУ.

Поскольку боковая грань счетчика защищена сталью толщиной 2.4 см, счетчик наиболее чувствителен к γ -квантам, выходящим из объема $v_{top} = 1.5 \text{ м} \times 1.0 \text{ м} \times 0.5 \text{ м} = 0.75 \text{ м}^3$ над крышкой счетчика. При степени ослабления γ -излучения с $\varepsilon \geq 1$ МэВ в стальной крышке толщиной 0.4 см, равной $k'_{sup} \approx 0.9$, вероятность создания одним квантом импульсов с амплитудой выше E_{th} на центральном и боковом ФЭУ составляет

$$P_{1\gamma}^{un} = p_{1\gamma} k'_{sup} = 3.6 \cdot 10^{-2} \cdot 0.9 = 3.27 \cdot 10^{-2},$$

где $p_{1\gamma}$ — вероятность кванту из объема v_{top} упасть на участок крышки площадью s^{un} . Используя долю распадов ^{135}I с двумя и более квантами, $d_{2\gamma} = 0.064$, для вероятности создания импульсов с амплитудой выше E_{th} на трех ФЭУ от одновременного попадания двух квантов в разные области s^{un} получаем

$$P_{2\gamma}^{un} = 2(p_{1\gamma}^{un} d_{2\gamma})^2 = 8.77 \cdot 10^{-6}.$$

Эта величина задает интенсивность распадов I_{dec} ядер ^{135}I в объеме v_{top} над счетчиком:

$$I_{dec} = i_{event}/P_{2\gamma}^{un} = 1.8 \cdot 10^3 \text{ с}^{-1}.$$

В соответствии со свойствами в, г изотопа ^{135}I (см. выше в этом разделе), радиоактивность объема 50 м^3 определяется содержанием ядер ^{135}I . После рассеяния зараженного объема $\Delta V = 8 \text{ м}^3$ в объеме воздуха $V = 50 \text{ м}^3$ его активность I_0 составляла величину $I_0 = I_{dec}/v_{top} = 2.37 \cdot 10^3 \text{ с}^{-1} \cdot \text{м}^{-3}$. Отсюда следует, что объем ΔV перед входом в камеру LSD имел активность

$$I(\Delta V) = I_0 V / \Delta V = 14.8 \cdot 10^3 \text{ Бк/м}^3,$$

которой соответствует концентрация $c(\text{I}) = 5.1 \cdot 10^8 \text{ м}^{-3}$, на 16 порядков более низкая по сравнению с начальной ($t = 0$) концентрацией $c_0(\text{I}) \approx 5 \cdot 10^{24} \text{ м}^{-3}$. Оценим темп R счета импульсов в нейтронном канале восьми счетчиков стенки 1 при активности воздуха $I_0 = 2.37 \cdot 10^3 \text{ Бк/м}^3$. Счетчик эффективно «просматривал» объем камеры перед установкой $v \approx 10 \text{ м}^3$ и объем $v_{top} \approx 0.75 \text{ м}^3$. Вероятность для кванта попасть из объема v в счетчик равна $p_{1\gamma}^{out} = 0.06$, ослабление в стальных стенках контейнера и корпуса счетчика с суммарной толщиной 2.4 см составляет $k_{sup}^{out} \approx 0.6$, а вероятность дать энерговыделение больше 0.8 МэВ — $P_\varepsilon^{out} \approx 0.9$. Из объема v счетчиком могли регистрироваться кванты с темпом счета

$$R^{out} = I_0 v p_{1\gamma}^{out} k_{sup}^{out} P_\varepsilon^{out} = 7.6 \cdot 10^2 \text{ с}^{-1},$$

из объема v_{top} —

$$R^t = I_0 v_{top} p_{1\gamma}^t k_{sup}^t P_\varepsilon^t = 3.4 \cdot 10^2 \text{ с}^{-1},$$

где $p_{1\gamma}^t = 0.27$ — вероятность для кванта попасть в счетчик через крышку из объема $v_{top} = 0.75 \text{ м}^3$; $k_{sup}^t = 0.9$, $P_\varepsilon^t = 0.8$.

Суммарный темп счета составляет величину $R(\text{I}) = R^{out} + R^t = 11.0 \cdot 10^2 \text{ с}^{-1}$, которой соответствует темп счета во временных воротах $r(\text{I}) = 0.55 (500 \text{ мкс})^{-1}$. Добавляя к $r(\text{I})$ темп счета фоновых импульсов $r_b(5)$, для счетчиков кластера в первой стенке получаем расчетную среднюю величину

$$\bar{r}_c(5) = r_b(5) + r(\text{I}) = 1.03 (500 \text{ мкс})^{-1}$$

и среднее число импульсов в нейтронном канале пяти счетчиков $\bar{n}(5) = 5$. Зарегистрированное количество $n(5) = 3$ находится в области максимальной вероятности при $\bar{n} = 5$. Точность сделанных оценок не лучше 100 %.

Рассмотрим соответствие I-гипотезы особенностям и фактам 1–5 (см. разд. 3 и 6).

1. Гамма-кванты низкой энергии $\varepsilon_{1\gamma} \approx 1 \text{ МэВ}$ могут создать триггерный импульс с амплитудой E_{th} и выше только за счет неоднородности светосбора, причем наиболее вероятно — вблизи порога срабатывания дискриминатора 7 МэВ. При этом энергия E_{event} превысит пороговую на величину не менее $2\varepsilon_{1\gamma}$ так, что $E_{event} \geq E_{th} + 2\varepsilon_{1\gamma}$. Это объясняется тем, что дискриминатор каждого ФЭУ срабатывает в данном случае, по амплитуде сигнала от прямого света, в которую отраженный свет дает незначительный вклад, поскольку он запаздывает относительно прямого на 8–10 нс и, кроме того, растянут во времени процессом светосбора. Энергия же события определяется по полному току сигнала, в котором фракция отраженного света соответствует энергии $2\varepsilon_{1\gamma}$. Это приводит к смещению максимума распределения $P(E_{event})$ от величины $E_{th} = 7 \text{ МэВ}$ примерно на $2\varepsilon_{1\gamma} \approx 2 \text{ МэВ}$, чем объясняется узкий энергетический спектр событий кластера с максимумом при 9 МэВ (см. рис. 2).

2. Начальная радиоактивность $I_0 \approx 2.4 \text{ кБк/м}^3$ воздуха в гараже (в объеме 50 м^3) при последующем ее уменьшении не могла создать заметного вклада в фоновый темп счета «нейтронного» канала всех счетчиков кластера. В то же время в восьми счетчиках первой стенки уровней 1 и 2 могло быть отмечено превышение $r_c(5) > r_b(5)$.

3. Экспоненциальный спад с $\tau_c = 120 \text{ с}$ объясняется снижением концентрации $c(\text{I})$ и активности $I_0 \approx 2.4 \text{ кБк/м}^3$ в результате, главным образом, принудительного перемешивания воздуха вентиляцией в объеме гаража. Примерно за 1 мин объем 50 м^3 рассеивается в объеме гаража (350 м^3). В результате активность I_0 падает в 7 раз, что приводит к соответствующему увеличению среднего интервала между событиями кластера примерно от 7 до 50 с и окончанию (размытию) кластера. Ри-гипотеза дает более медленный спад с $\tau_r \approx 40 \text{ мин}$ за счет выветривания аэрозолей из гаража вентиляцией.

4. Отсутствие повышения радиации на северо-западе Италии на второй день после аварии объясняется составом облака PO_2 и динамикой его рассеяния: во-первых, газовое облако не несло микро-частиц топлива, поэтому оно не оставляло радиоактивного следа на поверхности Земли, во-вторых, после рассеяния над Альпами в районе Монблана, на высоте около 1400 м, облако создавало активность 15 кБк/м^3 , которая при достижении зараженным воздухом наземных (вблизи уровня моря) пунктов наблюдения упала до фоновой величины.

5. Появление йодно-ксенонового облака в районе Артемовска было невозможно, так как оно образовалось в результате первичного выброса, когда ветер был восточным.

9. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Сигнал, зарегистрированный 27.04.86 детектором LSD, обладает особенностями, позволяющими с большой вероятностью связать его со взрывом реактора на ЧАЭС:

данный сигнал является уникальным по числу и плотности событий среди всех сигналов, зарегистрированных LSD за 15 лет его работы, кроме сигнала от SN1987A;

величина задержки $\Delta t_2 = 46.1$ ч относительно взрыва реактора согласуется с возможной скоростью движения радиоактивного облака;

счетчики, зарегистрировавшие события, распределены по объему детектора неравномерно и группируются вблизи вентиляционного люка;

энергетические и временные характеристики сигнала не отвечают ни фоновой природе его импульсов, ни происхождению от сверхновой и наиболее согласуются с I-гипотезой.

Основные положения I-гипотезы состоят в следующем:

взрыв реактора был следствием цепной неуправляемой реакции на мгновенных нейтронах в ограниченной области активной зоны при высокой концентрации ^{135}I и ^{135}Xe в реакторе;

из места взрыва было выброшено йодно-ксеноновое облако на значительную высоту более 5 км в поток воздуха с направлением движения на юго-запад;

облако двигалось, не оставляя радиоактивного следа на земле;

за счет турбулентности воздушных потоков над Альпами облако рассеялось, и воздух, содержащий ядра ^{135}I , был внесен вентиляцией в гараж LSD;

события сигнала LSD вызваны одновременным попаданием двух γ -квантов в область высокой неоднородности счетчика;

темп регистрации событий падает по экспоненте с $\tau_c = 2$ мин, следуя уменьшению концентрации ядер ^{135}I вследствие перемешивания воздуха в гараже вентиляционным потоком;

радиоактивность воздуха, внесенного в гараж изотоп ^{135}I , была недостаточной, чтобы в «нейтронном» канале вызвать заметное повышение темпа счета.

Регистрация кластера 27 апреля 1986 г. продемонстрировала высокую чувствительность детекто-

ра LSD и его эффективность при выделении редких сигналов в потоке фоновых событий. Этот факт повышает экспериментальную значимость сигнала, зарегистрированного детектором LSD через 10 мес и ассоциируемого с нейтринной вспышкой от гравитационного коллапса SN1987A.

Сигнал LSD указал на новый техногенный источник фона при долговременном поиске нейтринных всплесков от гравитационных коллапсов звездных ядер — радиоактивные облака. При некоторых условиях они могут в детекторах «открытой» конструкции, т. е. не имеющих герметичной активной или пассивной защиты (сегодня таким является 1000-тонный детектор LVD в подземной лаборатории Гран Сассо), вызвать ложный сигнал, имитирующий нейтринный всплеск как по длительности, так и по энергии.

Исключение такого сигнала осложняется тем, что происхождение радиоактивного облака не всегда известно, равно как и его наличие. Радиоактивные облака образуются в результате ядерных взрывов, инцидентов на ядерных реакторах и предприятиях урановой и радиохимической промышленности, падения в атмосферу спутников с радионуклидными энергоблоками. Наблюдаемая частота появления таких облаков сравнима с оценочной частотой всплесков сверхновых, равной 0.02–0.05 в год. В период с октября 1970 г. по 2002 г. над Европейской частью России радиоактивные облака были зафиксированы 4 раза: в октябре 1970 г., апреле–мае 1986 г., апреле 1993 г. и октябре 1999 г. Источники происхождения двух из них (1993, 1999 гг.) не установлены [13].

Авторы благодарны И. Р. Барабанову, критическое замечание которого позволило избежать ошибки при интерпретации данных. Мы благодарим В. И. Третьяка (ИЯИ НАНУ) за расчет доли $d_{2\gamma}$ распадов ^{135}I , а также С. Вернетто (S. Vernetto) за предоставление дополнительной информации о событиях кластера 27.04.1986 и работе счетчиков в течение серии наблюдений № 1173, содержащей кластер. Авторы глубоко признательны А. А. Боровому за консультации и полезные замечания, В. А. Матвееву за поддержку, оказанную в ходе работы над статьей, Л. А. Большову — за проявленный к ней интерес.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 12-02-12127-а), гранта Президента РФ для поддержки ведущих научных школ (НШ 871.2012.2) и Программы фундаментальных исследова-

дований президиума РАН «Фундаментальные свойства материи и астрофизика».

ЛИТЕРАТУРА

1. М. Альетта, В. Л. Дадыкин, Д. Бадино и др., Препринт ИЯИ РАН № 1300/2011 (2011).
2. В. Л. Дадыкин, Г. Т. Зацепин, В. Б. Корчагин и др., Письма в ЖЭТФ **45**, 464 (1987).
3. Н. Ю. Агафонова, В. В. Бояркин, А. С. Мальгин, ПТЭ № 1, 52 (2010).
4. В. И. Береснев, Г. Т. Зацепин, Р. И. Еникеев и др., ПТЭ № 6, 48 (1981).
5. Е. Н. Алексеев, Л. Н. Алексеева, В. И. Волченко, И. В. Кривошеина, Письма в ЖЭТФ **45**, 461 (1987).
6. UNSCEAR, Annex D: Exposures from the Chernobyl Accident (1988).
7. А. А. Боровой, Атомная энергия **100**, 258 (2006).
8. Р. В. Арутюнян, Л. А. Большов, А. А. Боровой и др., *Ядерное топливо в объекте «Укрытие» Чернобыльской АЭС*, Наука, Москва (2010), с. 240.
9. А. А. Абагян, В. Г. Асмолов, А. К. Гуськова и др., Атомная энергия **61**, 301 (1986).
10. Ю. М. Черкашов, О. Ю. Новосельский, К. П. Чечеров, Атомная энергия **100**, 243 (2006).
11. С. А. Пахомов, Ю. В. Дубасов, в сб. *Труды Радиологического института им. В. Г. Хлопина XIV*, 79 (2009).
12. V. L. Dadykin, F. F. Khalchukov, P. V. Korchaguin et al., in *Proc. of 21th ICRC* (1990), Vol. 10, p. 248.
13. Н. С. Свиржевский, Дисс. . . . докт. физ.-матем. наук, ФИАН, Москва (2002).