

## ОТКЛИК ДЕТЕКТОРА LVD НА ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ В ЦЕНТРАЛЬНОЙ ИТАЛИИ

© 2021 г. Н. Ю. Агафонова<sup>1</sup>, В. В. Ашихмин<sup>1</sup>, Е. А. Добрынина<sup>1</sup>\*, Р. И. Еникеев<sup>1</sup>,  
А. С. Мальгин<sup>1</sup>, О. Г. Рязская<sup>1</sup>, Н. А. Филимонова<sup>1,2</sup>, И. Р. Шакирьянова<sup>1</sup>,  
В. Ф. Якушев<sup>1</sup> (и коллаборация LVD)

<sup>1</sup>Федеральное государственное бюджетное учреждение науки

Институт ядерных исследований Российской академии наук, Москва, Россия

<sup>2</sup>Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования  
“Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)”,  
Долгопрудный, Россия

\*E-mail: Dobrynina@inr.ru

Поступила в редакцию 21.06.2021 г.

После доработки 05.07.2021 г.

Принята к публикации 28.07.2021 г.

Основными источниками фона по низкому порогу в подземном Детекторе большого объема (LVD, LNGS, Италия) являются естественная радиоактивность грунта и радон, который выходит из грунтовых вод в атмосферу подземного помещения через множественные микротрещины в породе. Установка LVD регистрирует гамма-кванты от распада дочерних ядер радона. При деформациях земной коры возникает напряжение, увеличивается количество микротрещин, что приводит к повышению концентрации радона. Представлен анализ темпа счета детектора во время мощных землетрясений в центральной Италии в 2019 году.

DOI: 10.31857/S036767652111003X

### ВВЕДЕНИЕ

Радиоактивный газ радон, всегда присутствующий в грунте, является одним из основных источников фона установок, нацеленных на поиск редких событий [1]. При деформациях земной коры увеличивается количество микротрещин, возникает напряжение и усиливается вибрация грунта, что приводит к значительному повышению концентрации радона.

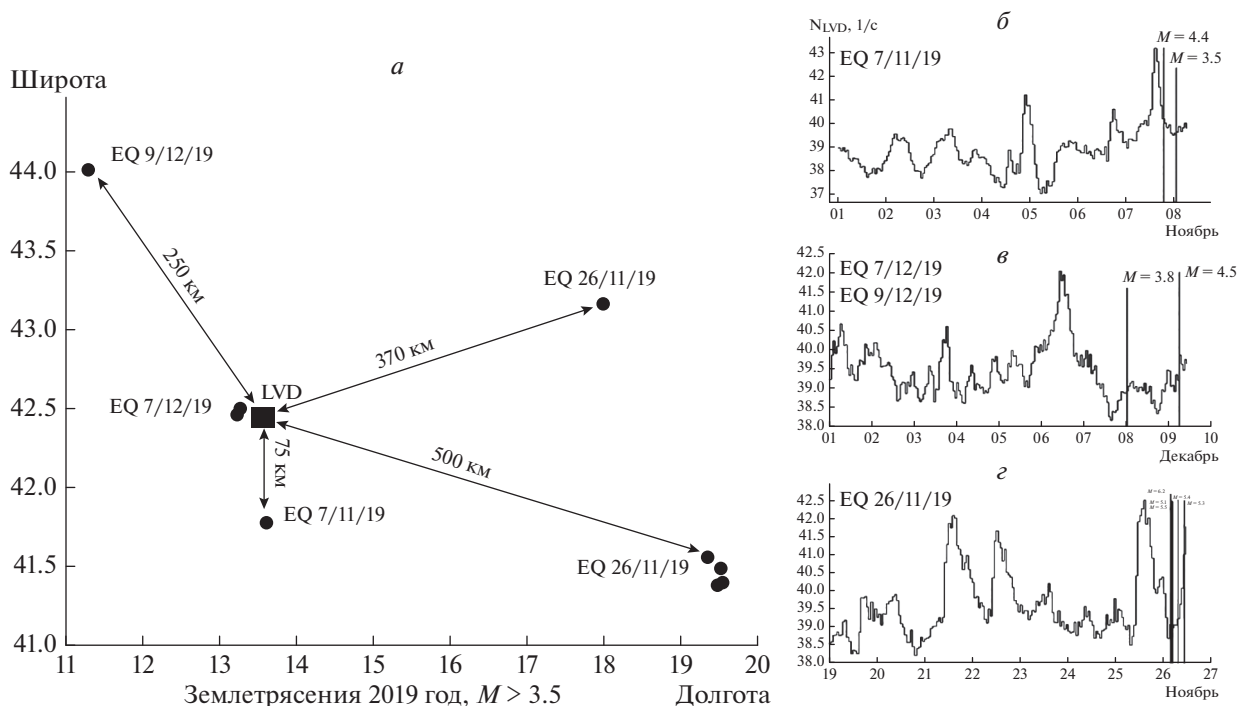
На возможности установки LVD для изучения вариаций концентрации радона под землей было обращено в [2] после обнаружения аномального повышения фонового темпа счета детектора в дни наиболее сильных сейсмических толчков (сентябрь 1997 г.). Эпицентр толчков находился в Центральной Италии, примерно в 300 км от установки. После похожего увеличения темпа счета в 1999 г., которое по времени появления было ассоциировано с разрушительным землетрясением в Турции, началось целевое изучение вариаций темпа счета низкоэнергетических фоновых событий.

В структуру установки помещен альфа-частичный радонометр, который проводит точечные замеры концентрации радона [3, 4]. Сравнение данных помогло понять, что быстро изменяющаяся компонента фона детектора LVD связана

с радоном. На концентрацию радона в подземном экспериментальном зале влияют давление, влажность, температура, вибрация грунта, работа вентиляции. В работе представлен анализ изменений этих факторов и зависимость от них низко-энергетического темпа счета LVD. Указанная связь позволит разделить полный фоновый темп счета установки LVD на три группы: две переменные составляющие, связанные с изменением окружающих условий и концентрации радона, и постоянную составляющую, обусловленную радиоактивностью материалов установки и скальной породы.

### ЭКСПЕРИМЕНТ LVD И МЕТОД РЕГИСТРАЦИИ

Детектор LVD [5], находящийся в подземной лаборатории под толщей грунта 3650 м в.э., предназначен для поиска нейтрино от коллапсов звездных ядер [6]. Установка состоит из 840 полуторакубовых сцинтилляционных счетчиков ( $C_nH_{2n}$ ,  $n \approx 9.6$ ) сгруппированных в 3 башни. Каждая башня размером  $6 \times 10 \times 12$  м объединяет счетчики в 7 уровней и 5 колонн. Для разных научных задач в детекторе имеется два энергетических порога: верхний  $E_{HET} = 4$  МэВ, и нижний  $E_{LET} = 0.5$  МэВ. Данные



**Рис. 1.** Сейсмические события 2019 г. с магнитудой больше 3.5 и отклик установки LVD: слева (а) — показаны эпицентры сильных толчков и их расположение относительно установки LVD; справа (б, в, з) — данные установки по нижнему порогу (по оси абсцисс — дата, по оси ординат — темп счета в секунду на счетчик). Линиями обозначены моменты сильных толчков.

низкоэнергетического порога используются для исследования фона эксперимента и контроля работы счетчиков.

Основным источником фона по низкому порогу на установке LVD является радон. Радон — радиоактивный газ, который образуется в грунте в результате деления и распадов элементов уранового и ториевого рядов. Радон выходит в атмосферу подземного помещения через множественные микротрещины в породе. Радон хорошо растворяется в воде и переносится подземными водами.

Установка LVD регистрирует гамма-кванты от распадов дочерних ядер радона, период полураспада которого 3.8 дня. Гамма-излучение создается, в основном, ядрами висмута, за счет  $\beta$ -распада превращающимися в полоний с характерным временем 19.7 мин. Энергетический спектр гамма-излучения охватывает диапазон от 0.6 до 2.5 МэВ.

Данные детектора, используемые для исследования фона ( $E_{LET}$ ), формируются следующим образом: каждые 10 мин все сцинтилляционные счетчики башни запускаются импульсом от генератора на регистрацию  $E_{LET}$  импульсов в течение 10 с [7].

При обработке данных отбираются наиболее стабильно работающие в течение длительного времени внутренние счетчики одной башни. Число

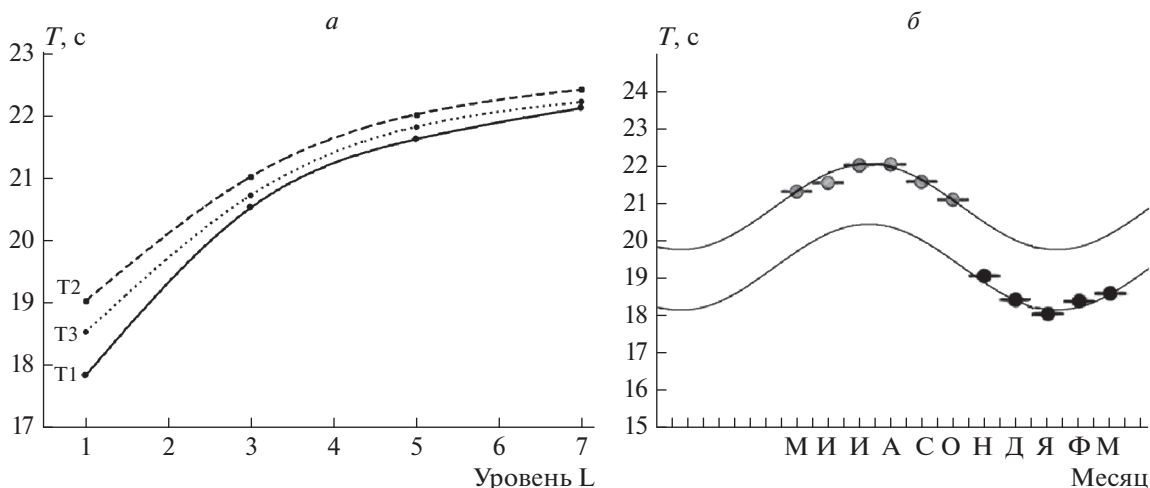
включаемых в обработку счетчиков варьируется от 60 до 76. Данные суммируются за 1 ч. Суммарный темп счета нормируется на один счетчик в герцах. Общее число отсчетов в одном бине  $\sim 184000$  ( $\sim 420$  отсчетов за 10 с  $\times$  73 счетчика  $\times$  6 запусков/ч), что дает относительную ошибку измерений  $\sim 0.2\%$ .

## РЕЗУЛЬТАТЫ АНАЛИЗА ДАННЫХ 2019 ГОДА

Мы отобрали данные установки LVD ( $N_{LVD}$ ) по низкому порогу, совпадающие по времени с произошедшими в 2019 г. сильными землетрясениями [8] на расстояниях до 500 км от установки. На рис. 1 показаны только толчки с магнитудой больше 3.5. Обычно сильные землетрясения сопровождаются серией толчков с небольшой магнитудой. Линиями на рисунках отмечены моменты сильных толчков.

Первое событие произошло вечером 7 ноября в Балсорано (регион Абруццо, провинция Аквила) в 75 км от установки LVD. Было зарегистрировано повышение темпа счета по низкому порогу за несколько часов до землетрясения.

Следующие два сильных землетрясения произошли одно за другим, с разницей по времени порядка суток. Ночью с 7 на 8 декабря произошло землетрясение в Барете (регион Абруццо, провин-



**Рис. 2.** Слева (а) — зависимость температуры от высоты ( $L = 1$  — нижний уровень,  $L = 7$  — верхний), справа (б) — измерения средней температуры за месяц с мая 2019 по март 2020 г., верхняя кривая — для положения ТГ на счетчике N2456, нижняя — на N3512.

ция Аквила), а утром 9 декабря — множественные толчки в провинции Флоренция региона Тоскана в 250 км от установки LVD. Первое землетрясение произошло совсем рядом с установкой LVD, но оно было намного слабее второго события в Тоскане. Повышение темпа счета мы наблюдали за 1.5 сут до первого события. К сожалению, мы не можем достоверно определить, на какое сейсмическое событие дает отклик установка: на близкое, но слабое или на сильное, но более отдаленное.

Третье событие тоже ставит перед нами вопросы: на каком расстоянии от эпицентра землетрясения установка LVD может дать отклик на сейсмическое событие. Утром 26 ноября произошло сильное землетрясение со множественными толчками в Албании в 500 км от установки LVD, а через несколько часов — в Боснии (~370 км от установки). Было зафиксировано повышение темпа счета установки за сутки до землетрясений.

### ВЛИЯНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ УСЛОВИЙ НА ВАРИАЦИИ ФОНОВОГО ТЕМПА СЧЕТА LVD

Изменения температуры, влажности и давления в низкофоновых помещениях, предназначенных для поиска редких событий, являются неотъемлемой частью наблюдений фоновых условий экспериментов. С помощью обычного термогигрометра ИВТМ-7 М 6-Д (ТГ) мы провели две серии измерений температуры ( $T$ ), влажности ( $H$ ) и давления ( $P$ ) в подземном зале Лаборатории. В I-серии измерений с 05.2019 по 10.2019 гг. термогигрометр находился в центре детектора (счетчик номер N2456). Во время II-серии с 11.2019 по 03.2020 гг. ТГ был

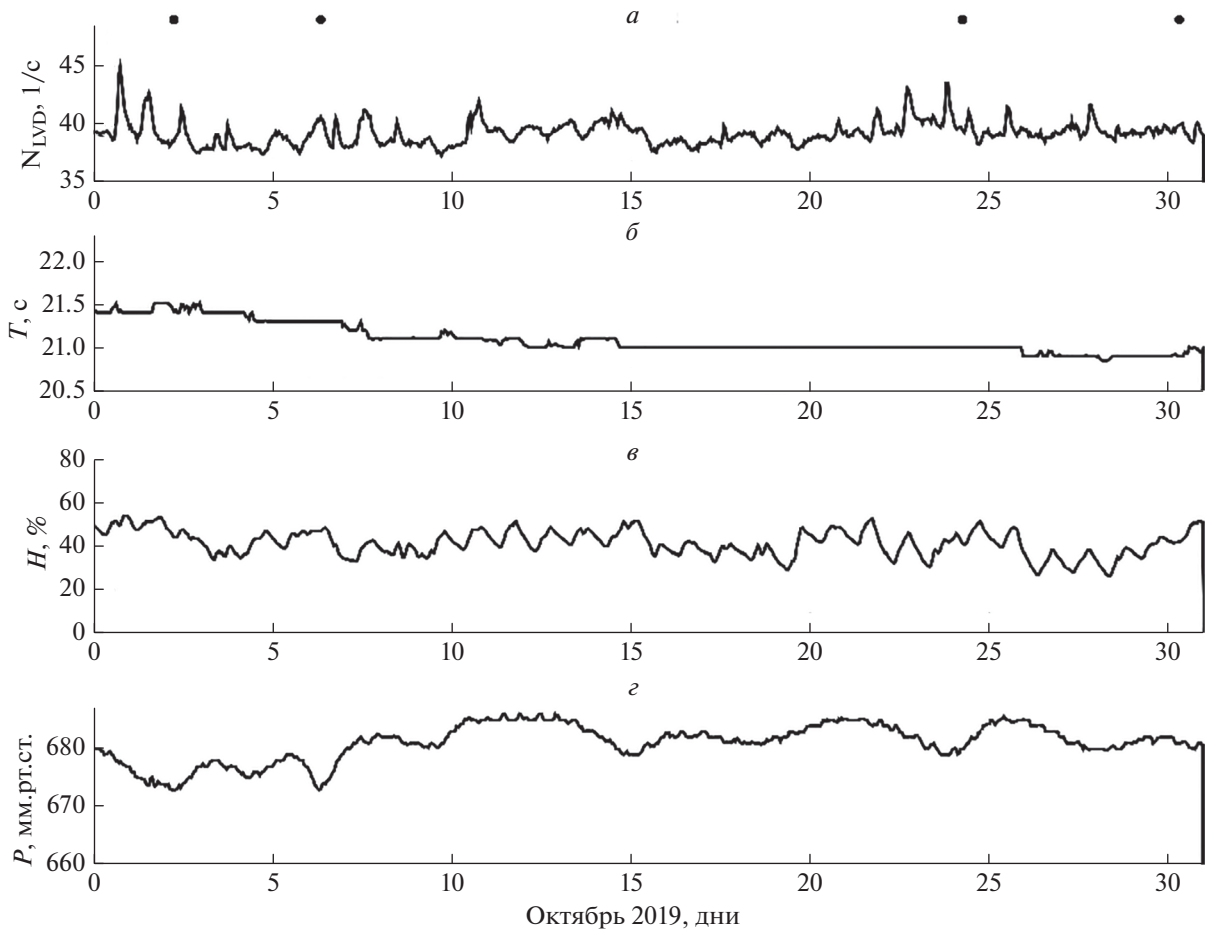
помещен в угол детектора LVD (N3512) на 1 уровне, близко к воротам из зала.

Наши измерения показали, что средняя температура в центре детектора  $\langle T \rangle = 20.0 \pm 0.1$  сис $^{\circ}$ C. Систематическая ошибка — точность измерения. Суточное изменение температуры (метод наложения эпох) составляет не более 0.1%. На нижнем уровне детектора ( $L = 1$ ) температура, как и следовало ожидать, меньше ( $18.4 \pm 0.5^{\circ}$ C), чем средняя температура на верхнем уровне ( $L = 7$ ) —  $22.3 \pm 0.3^{\circ}$ C (рис. 2а). Положение башен в зале относительно выхода вентиляции отражает разброс значений температуры на разных башнях ( $\pm 0.5^{\circ}$ C относительно центральной 2-ой башни).

Сезонная вариация средней температуры в установке составляет  $\delta T/T = 6\%$  ( $\delta T = 1.2^{\circ}$ C). Эта величина получена при аппроксимации данных функцией вида  $f(t) = \langle T \rangle + \delta T \cos(2\pi(t - t_0)/12)$ , где фаза — максимум в распределении  $t_0 = 6.8$  мес. (рис. 2б). Величина сезонных вариации температуры одинакова для обеих серий измерений.

Влажность в помещении обратно пропорциональна температуре:  $(H - \langle H \rangle)/\langle H \rangle = -0.023 - 0.96 \times (T - \langle T \rangle)/\langle T \rangle$ . Средняя влажность в центре детектора ( $41.0 \pm 0.1$  сис) %. Средняя влажность на нижнем уровне детектора  $H(L = 1) = 35\%$ , на верхнем уровне —  $H(L = 7) = 44\%$ . Сезонная вариация средней влажности  $\delta H/H = 17\%$  ( $\delta H = 7.5\%$ ), фаза — максимум в распределении — 7.8 мес. Вариации влажности в течение дня (суточные) зависят, скорее всего, от действий персонала Лаборатории (открывание ворот в зале для прохода тяжелой техники, обслуживающей эксперименты) [9].

В зале детектора среднее давление за месяц постоянно и равно ( $680 \pm 1$  сис) мм рт. ст. В течение года среднее давление меняется на 5 мм рт. ст. Аб-



**Рис. 3.** Измерения за октябрь 2019 г.: *a* – скорости счета LVD (на счетчик в секунду), точками показаны землетрясения с магнитудой  $>3$  баллов, *б* – температуры, *в* – влажности, *г* – давления.

солютное давление меняется  $\pm 10$  мм рт. ст. в течение месяца (недели), и связано с внешним атмосферным давлением. В данных по температуре и давлению мы не обнаружили изменений в зависимости этих параметров от притока нового воздуха, то есть открывания ворот в экспериментальном зале.

Мы провели сравнительный анализ скорости счета данных LVD ( $N_{LVD}$ ) по нижнему порогу с данными ТГ по температуре, влажности и давлению (рис. 3). Пики в  $E_{LET}$  данных LVD ( $N_{LVD}$ ) не связаны с пиками изменений в  $T$ ,  $H$ ,  $P$ .

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследования по выявлению связи поведения радоновых полей с сейсмической активностью проводятся во всем мире в течение многих десятилетий. В данных LVD мы видим отклик установки на повышение сейсмической активности. В ряде случаев наблюдается повышение концентрации радона за 2–3 дня до землетрясения, что

дает надежду на возможность предсказания готовящегося события.

Измерения в зале установки температуры, влажности и давления показали, что условия эксплуатации детектора стабильные как в краткосрочном режиме (в течение суток), так и в долгосрочном (в течение года). Это дает хороший прогноз для выделения резкого изменения концентрации радона и, надеемся, для выделения предвестников землетрясений.

Но прогноз землетрясения предполагает предсказание, с известной достоверностью, трех характеристик: силы, времени и места очага землетрясения. Мы же пока хотим выявить источники фоновых радоновых событий и а posteriori выделить характеристики вариаций концентрации радона под землей, коррелирующие со временем сильных землетрясений.

Работа выполнена при частичной поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 18-02-00064-а).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Bassignani A., Bam B.B., Colombo G. et al.* // *Radiat. Meas.* 1995. V. 25. No. 1–4. P. 557.
2. *Badino G., Fulgione W.* // *LVD Meet. Rep. Preprint N2*, 1998.
3. *Bruno G., Menghetti H.* // *J. Phys. Conf. Ser.* 2006. V. 39. P. 278.
4. *Bruno G. on behalf of the LVD Collaboration* // *J. Phys. Conf. Ser.* 2010. V. 203. Art. No. 012091.
5. *Bari G., Bazile M., Bruni G. et al.* // *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A.* 1988. V. 264. P. 5.
6. *Agafonova N.Y., Aglietta M., Antonioli P. et al. (LVD Collaboration)* // *Astrophys. J.* 2015. V. 802. No. 1. P. 47.
7. *Агафонова Н.Ю., Алексеев В.А., Добрынина Е.А. и др.* // *Препринт № 1071/2001 ИЯИ РАН*, 2001.
8. <http://cnt.rm.ingv.it>.
9. *Агафонова Н.Ю., Ашихмин В.В., Добрынина Е.А. и др.* // *Изв. РАН. Сер. физ.* 2019. Т. 83. № 5. С. 673; *Agafonova N. Yu., Ashikhmin V.V., Dobrynina E.A. et al.* // *Bull. Russ. Acad. Sci. Phys.* 2019. V. 83. No. 5. P. 614.

**LVD detector response to earthquakes in central Italy**

**N. Yu. Agafonova<sup>a</sup>, V. V. Ashikhmin<sup>a</sup>, E. A. Dobrynina<sup>a,\*</sup>, R. I. Enikeev<sup>a</sup>, A. S. Malgin<sup>a</sup>,  
O. G. Ryazhskaya<sup>a</sup>, N. A. Filimonova<sup>a,b</sup>, I. R. Shakyrianova<sup>a</sup>, V. F. Yakushev<sup>a</sup>, and LVD Collaboration**

<sup>a</sup>*Institute for Nuclear Research of the Russian Academy of Sciences, Moscow, 117312 Russia*

<sup>b</sup>*Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University), Dolgoprudny, 141701 Russia*

*\*e-mail: Dobrynina@inr.ru*

The main sources of background at the low threshold in the underground large volume detector (LVD, LNGS, Italy) are the natural radioactivity of the rock and radon, which is released from the groundwater into the atmosphere of the underground room through multiple microcracks in the rock. LVD registers gamma quanta from decays of daughter radon nuclei. With deformations of the earth's crust, stress occurs, the number of microcracks increases, which leads to an increase in the concentration of radon. An analysis of the detector counting rate during powerful earthquakes in central Italy in 2019 is presented.