

**RADIATION DOSE RECEIVED BY A RESEARCHER IN A
CRITICAL ASSEMBLY ACCIDENT AT RUSSIAN FEDERATION
NUCLEAR CENTER/ALL-RUSSIAN SCIENTIFIC-RESEARCH INSTITUTE OF
EXPERIMENTAL PHYSICS (RFYaTs-VNIIEF) IN SAROV**

G. F. Khodaley, E. Yu. Tarasova, A. K. Zhitnik,
M. V. Kalashnikov, V. I. Tsvetkov, E. D. Kleshchenko,
I. A. Bochvar, and F. K. Levochkin

UDC 539.12.08:621.039.5

A critical assembly accident occurred at Russian Federation Nuclear Center/All-Russian Scientific Research Institute of Experimental Physics (RFYaTs-VNIIEF) on June 17, 1997, at 10:50 am [1]. Because of a spontaneous chain reaction, the researcher saw a flash of light and physically felt heat, and then 5-10 sec later he vacated the room containing the critical assembly stand. In this paper, we present the results of determination of the neutron and γ radiation dose received by the victim.

The RFYaTs-VNIIEF deployed a personal emergency dosimetry system developed in the 1970's at the Institute of Biophysics and adopted in all sections of Minatom facilities which involved nuclear risk. This system is based on the GNEIS personal emergency dosimeter for β , γ , and neutron radiation [2], including a rhodium neutron activation detector [3], a DINA track etch neutron dosimeter with targets made from ^{237}Np -Al alloy, developed jointly with VNIINM, on a boron filter [4], two IKS-A thermoluminescent γ radiation dosimeters [5] on lead and aluminum filters, compensating for the energy dependence of its sensitivity. The system also includes instructions and recommendations for radiation safety departments in emergency situations [6].

Following the instructions and recommendations in [6], from the results of measurement of the induced γ radiation activity from the body of the victim (A. N. Zakharov), the head of the dosimetric monitoring group estimated the average whole-body neutron dose: ~ 10 Gy. The nurse who answered the emergency call at the medical center administered an antiradiation drug to the victim, then he was sent to the central medical unit in Sarov. At 6:30 pm, the victim was sent via airplane to Moscow, to the clinic at the State Science Center of the Russian Federation/Institute of Biophysics.

The GNEIS dosimeter was located in the area of the left collarbone of the victim, on the collar of his coverall. From the results of spectrometric measurements of the activation of the rhodium detector and also the aluminum filter of the thermoluminescent dosimeter, a preliminary estimate was made of the fast neutron dose at the position where the dosimeter was worn: about 50 Gy. In going from the neutron flux determined from the activation of the ^{103}Rh detectors and the ^{27}Al filters to the dose, we used the known neutron leakage spectrum from a metallic core. Then the fast neutron dose was refined using the DINA track etch dosimeter, considering the dose scale division of the track typical for these neutron leakage spectra. The neutron dose at the location of the dosimeter was 45 ± 5 Gy; the neutron fluence on the surface of the upper third of the breast bone, determined using DINA track etch detectors, was equal to $(1.8 \pm 0.2) \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-2}$, which matched subsequent calculations. The thermoluminescent γ radiation dosimeters showed (using two glasses) 3.5 ± 0.3 Gy (average over two detectors).

The victim arrived at the clinic of the Institute of Biophysics at 9:20 pm. Using a DRG-01 T1 dosimeter right against the body, we measured the whole-body γ radiation dose rate for the victim. A repeated measurement at 10:20 am on June 18, 1997, showed that over this time period, the dose rate dropped by almost a factor of two. Such a change corresponds to the half-life of the induced activity from ^{24}Na . From the results of measurement of the activation of the body, the neutron dose averaged over the entire body was estimated as 8-11 Gy.

Russian Federation Nuclear Center/All-Russian Scientific Research Institute of Experimental Physics. State Science Center of the Russian Federation/Institute of Biophysics. Translated from *Atomnaya Énergiya*, Vol. 85, No. 2, pp. 153-158, August, 1998. Original article submitted June 3, 1998.

TABLE 1. Specific Activity of Hairs and Neutron Dose

| Location | Activity, Bq/g | Dose, Gy |
|--------------|----------------|----------|
| Face | 15 ± 1 | 41 ± 12 |
| Back of head | 5 ± 0.5 | 13 ± 4 |
| Left armpit | 16 ± 1 | 43 ± 13 |
| Right armpit | 22 ± 2 | 60 ± 18 |
| Pubic area | 11 ± 1 | 29 ± 9 |

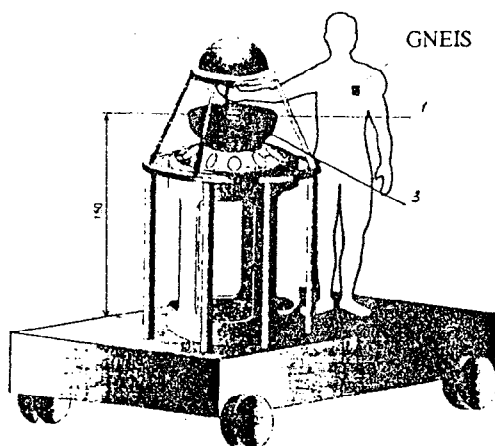


Fig. 1

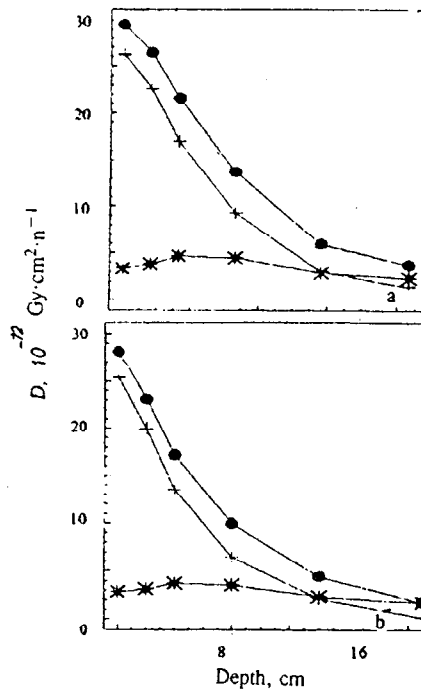


Fig. 2

Fig. 1. Diagram showing the location of the victim relative to the critical assembly: 1, 3 indicate the directions for the depth distribution of the dose in the body.

Fig. 2. Depth distribution of the dose in the body of the victim in direction 1 (a) and 3 (b): ● means the total dose, + means the kerma; * means the γ radiation dose.

Based on the results of measurement of the neutron and γ radiation dose using the GNEIS emergency dosimeter (~50 Gy) and a description of the position of the victim relative to the assembly (as reported by the victim himself), a preliminary estimate of the total γ and neutron radiation dose on the wrist was 200-250 Gy.

At 8 pm on June 18, 1997, two blood samples and hair samples from the face, back of the head, left and right armpits, and the pubic area were taken from the victim for analysis. Studies of the blood samples showed that the ^{24}Na specific activity induced at the time of the spontaneous chain reaction was equal to 260 and 290 Bq/ml, which according to the procedure in [7] corresponds to a dose of 14 ± 4 Gy on uniform irradiation by neutrons from such an assembly.

Hair analysis from the fast neutron reaction $^{32}\text{S}(n, p)^{32}\text{P}$ at first was hindered by the presence of a significant amount of ^{24}Na in sweat-soaked hairs. So the measurements were made over the course of a week to isolate components with different half-lives (Table 1). To calculate the dose, we used the energy dependence of the reaction cross section and the neutron leakage spectrum.

Figure 1 shows the relative positions of the victim and the assembly at the time of the accident, as indicated by the victim himself while he was at the clinic of the Institute of Biophysics. The irradiation was almost instantaneous, strongly nonuniform, and mainly localized in the area of the hands, the head, and the torso.

TABLE 2. Energy Spectrum of Leakage γ Photons, Normalized Per Fission in the Assembly

| i | $E_i - E_{i+1}$, MeV | f_i , γ photons/fission |
|-----|-----------------------|----------------------------------|
| 1 | 0-0.05 | 0 |
| 2 | 0.05-0.1 | $4.555 \cdot 10^{-4}$ |
| 3 | 0.1-0.5 | $9.554 \cdot 10^{-2}$ |
| 4 | 0.5-0.7 | $5.080 \cdot 10^{-2}$ |
| 5 | 0.7-1 | $6.270 \cdot 10^{-2}$ |
| 6 | 1-5 | $1.406 \cdot 10^{-1}$ |
| 7 | 5-7 | $1.745 \cdot 10^{-3}$ |
| 8 | 7-10 | $1.805 \cdot 10^{-4}$ |

TABLE 3. Energy Spectrum of Leakage Neutrons, Normalized Per Fission in the Critical Assembly

| j | $E_j - E_{j+1}$, MeV | F_j , neutrons/fission 10^{-2} | j | $E_j - E_{j+1}$, MeV | F_j , neutrons/fission 10^{-2} |
|-----|-----------------------|------------------------------------|-----|-----------------------|------------------------------------|
| 1 | 10^{-10} -0.1 | 4,484 | 11 | 0.76-0.88 | 7,642 |
| 2 | 0.1-0.16 | 5,203 | 12 | 0.88-1.0 | 6,533 |
| 3 | 0.16-0.22 | 5,615 | 13 | 1.0-1.2 | 9,361 |
| 4 | 0.22-0.30 | 7,941 | 14 | 1.2-1.4 | 7,742 |
| 5 | 0.30-0.36 | 5,812 | 15 | 1.4-1.7 | 8,911 |
| 6 | 0.36-0.425 | 6,262 | 16 | 1.7-2 | 6,675 |
| 7 | 0.425-0.5 | 6,574 | 17 | 2-2.4 | 7,227 |
| 8 | 0.5-0.575 | 6,233 | 18 | 2.4-3 | 8,104 |
| 9 | 0.575-0.66 | 6,534 | 19 | 3-4 | 8,016 |
| 10 | 0.66-0.76 | 7,003 | 20 | 4-18 | 8,453 |

From the neutron leakage spectrum for metallic cores, the position of the victim relative to the source, and data in [8], we calculated the depth distribution of the total neutron dose and its individual components (the neutron kerma and neutron capture γ radiation dose) per cm^{-2} .

Anthropometric data of the victim: height, 180 cm; front-to-back measurement at the level of the lower part of the chest, 20 cm; sacrum, 21 cm; in the direction from the forehead to the back of the head, 18 cm.

The radiation dose distribution for the directions 1 ($0 \pm 20^\circ$) and 3 ($35 \pm 15^\circ$) from the horizontal plane is given in Fig. 2. The numbering of the directions corresponds to those used in [8].

After the death of the victim, we studied his tooth enamel and established that the EPR signal corresponds to a dose of 5.7 ± 0.5 Gy. If we consider that the sensitivity of the tooth enamel to neutrons is $\leq 3\%$ of its sensitivity to γ radiation [9] and that the neutron dose in the region of the face was ~ 41 Gy, then ≤ 1.2 Gy may be assigned to the neutron count and the neutron capture γ radiation dose can be estimated as approximately 4.5 Gy. This value is appreciably closer to the calculated value for the face, 5.4 Gy, especially if we consider that 3% is the upper estimate of the sensitivity of the tooth enamel to neutrons.

Using the Monte Carlo method, at RFYaTs-VNIIEF we calculated the leakage spectrum from the assembly involved in the accident and the dose characteristics for individual parts of the body. The calculation was done using the S-90 program, which is designed for calculation of neutron transport and generation of γ photons in $n-\gamma$ reactions in activation and transport processes [10]. To describe the interaction of neutrons and γ photons with matter, we used several libraries and multigroup sets of constants. The calculations allowed us to make estimates with statistical error no greater than 3% with respect to the neutron flux and γ radiation spectra per fission in the assembly (Tables 2-4). The energy release during the time the victim was near the assembly was established based on analysis of:

the readings of the emergency set of GNEIS dosimeters of the victim:

TABLE 4. Dose Received by Victim During the Spontaneous Chain Reaction

| Location | Neutron radiation | | γ Radiation | |
|-------------------|--------------------|--|--------------------|----------------------------------|
| | Kerma, Gy | Method | Dose, Gy | Method |
| Face | 41 ± 12 (face) | $^{32}\text{S}(n, p)^{32}\text{P}$ | 4.5 (teeth) | EPR |
| | | | 5.4 | Calculation |
| Back of head | 13 ± 4 | $^{32}\text{S}(n, p)^{32}\text{P}$ | — | — |
| Left armpit | 43 ± 13 | $^{32}\text{S}(n, p)^{32}\text{P}$ | — | — |
| Right armpit | 60 ± 18 | $^{32}\text{S}(n, p)^{32}\text{P}$ | — | — |
| Pubic area | 29 ± 9 | $^{32}\text{S}(n, p)^{32}\text{P}$ | 3 | Calculation |
| Breast bone | 45 ± 5 | DINA | 3.4 ± 0.1 | IKS-A |
| | 40 ± 1 | Calculation | 2.5 ± 0.5 | Calculation |
| Back | 6.7 | Calculation | 4.1 | Calculation |
| Wrists | 200—250 | Estimate from GNEIS readings | — | — |
| | 1700 ± 170 | Calculation (1 cm from assembly) ^C | 120 ± 12 | Calculation (1 cm from assembly) |
| Average over body | 8—11 | $^{23}\text{Na}(n, \gamma)^{24}\text{Na}$ (rapid) | — | — |
| | 14 ± 4 | $^{23}\text{Na}(n, \gamma)^{24}\text{Na}$ (spectrometer) | — | — |

determination by the victim himself of the distance from his chest to the center of the assembly, which was ~ 53 cm; the results of a calibration run estimating the detection efficiency and the individual characteristics of the DINA dosimeter [11];

calculation of neutron and γ photon transport in the emergency situation and a calibration run using the S-90 program;

anthropometric measurements on the FKBN-2M stand, which showed that the victim might have been located 50-56 cm from the center of the assembly.

The data obtained allowed us to estimate the energy release in the assembly during the time the victim was near it: $(4.9 \pm 1.1) \cdot 10^{16}$ fissions from analysis of the penetration of γ photons and up to $(5.2 \pm 0.6) \cdot 10^{16}$ fissions from analysis of the penetration of neutron radiation, assuming that the distance from the center of the assembly to the victim was 53 cm. We also determined the dose components generating the readings of the DINA and thermoluminescent dosimeters. The readings of the DINA neutron detector were generated as a result of the absorbed dose from the direct neutron radiation flux and the absorbed dose from the neutron radiation flux reflected from the body $D = D_{df} + D_{rf}$, where $D_{df} = 0.9D$, $D_{rf} = 0.1D$ are the dosimeter readings due to the direct and reflected neutron radiation flux, respectively.

The readings of the thermoluminescent γ radiation dosimeters were generated as follows: $D = D_{df} + D_{rf} + D_r + D_n$, where $D_{df} = 0.764D$, $D_{rf} = 0.033D$ are the dosimeter readings due to the direct and reflected γ radiation flux, respectively; $D_r = 0.203D$ are the dosimeter readings due to the γ radiation flux generated in the body from the reaction $^1\text{H}(n, \gamma)^2\text{H}$; $D_n = 1 \cdot 10^{-11} \text{ rad} \cdot \text{cm}^2 \cdot \text{neutrons}^{-1} \cdot 1.89 \cdot 10^{12} \text{ neutrons} \cdot \text{cm}^{-2}$ [5] are the dosimeter readings due to the neutron sensitivity.

Based on the above, the actual dose from the radiation caused by the accident can be estimated as 40 ± 1 Gy for the neutron component and 2.5 ± 0.5 Gy for the γ component. The calculated dose on the hand of the victim was 1700 ± 170 Gy for the neutron component and 120 ± 12 Gy for the γ component (assuming that the hands were at a distance of ~ 1 cm from the assembly). Considering the differences in the geometry used in the preliminary estimates and in the calculations, the results agree satisfactorily.

The results of the dosimetric measurements are summarized in Table 4. The relative biological efficiency of neutrons of such energy and for such a dose is not very different from unity, and the combined equivalent dose [12] in fact is equal to the absorbed dose.

The neutron flux on the surface of the lower part of the abdomen of the victim was estimated as $1.2 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-2}$, the neutron capture γ radiation dose was estimated as ≈ 3 Gy.

At the present time, to obtain a more complete picture of the irradiation pattern, using EPR we are investigating the bone tissue of the finger bones and the ribs of the victim. For a correct interpretation of the measurement results, we need an estimate of the sensitivity of bone tissue to neutrons, which in contrast to the tooth enamel is only 50% mineralized.

In conclusion we would like to thank T. N. Skvortsova for processing the GNEIS emergency dosimeters, A. P. Botova and Z. V. Volkova for preparing the calculation programs, and I. B. Keirim-Markus for discussion of the results and useful comments.

REFERENCES

1. V. T. Punin, I. G. Smirnov, and S. A. Zykov, "Accident on a critical assembly stand at the Russian Federation Nuclear Center/All-Russian Scientific Research Institute of Experimental Physics," *At. Énerg.*, **83**, No. 2, 154-156 (1997).
2. I. A. Bochvar, I. B. Keirim-Markus, V. A. Knyazev, et al., "GNEIS personal beta-gamma-neutron radiation dosimeter kit," in: *Collected Papers on Some Topics in Dosimetry and Radiometry of Ionizing Radiation* [in Russian], Dmitrovgrad (1974), No. 5, pp. 51-54.
3. I. B. Keirim-Markus, S. N. Kraitor, K. K. Kushnereva, and O. V. Cherkashina, "Use of an isomeric rhodium detector for measuring fast neutron flux density," in: *Metrology of Neutron Radiation in Reactors and Accelerators* [in Russian], TsNIIatominform, Moscow (1974), Vol. 1, pp. 94-96.
4. I. B. Keirim-Markus, T. V. Koroleva, S. N. Kraitor, and L. N. Uspenskii, "Characteristics of the DINA personal track etch neutron dosimeter," *At. Énerg.*, **34**, No. 1, 11-13 (1973).
5. I. A. Bochvar, T. I. Gimadova, I. B. Keirim-Markus, et al., *Thermoluminescent Dosimetry Method* [in Russian], Atomizdat, Moscow (1977).
6. "Determination of radiation doses in accidents," in: *Dosimetric Survey of Casualties in Radiation Accidents* [in Russian], Atomizdat, Moscow (1975).
7. S. N. Kraitor, *Dosimetry in Radiation Accidents* [in Russian], Atomizdat, Moscow (1979), pp. 182-186.
8. V. G. Zolotukhin, I. B. Keirim-Markus, O. A. Kochetkov, et al., *Tissue Doses of Neutrons in the Human Body* [in Russian], Atomizdat, Moscow (1972).
9. I. A. Bochvar, E. D. Kleshchenko, K. K. Kushnereva, and F. K. Levochkin, "Sensitivity of human tooth enamel to a radiation and neutrons," *At. Énerg.*, **83**, No. 5, 380-383 (1997).
10. E. N. Donskoi, V. A. El'tsov, A. K. Zhitnik, et al., "The Monte Carlo method at the All-Russian Scientific Research Institute of Experimental Physics," in: *Topics in Atomic Science and Technology. Series: Mathematical Modeling of Physical Processes* [in Russian], No. 2, 61-64 (1993).
11. L. F. Belovodskii, I. A. Velikanova, A. S. Koshelev, and E. Yu. Tarasova, "Individual features of DINA emergency neutron dosimeters," *At. Énerg.*, **69**, No. 3, 318-320 (1990).
12. V. L. Gozenbuk and I. B. Keirim-Markus, *Dosimetric Criteria for the Severity of Acute Radiation Exposure in Humans* [in Russian], Énergoatomizdat, Moscow (1988).

идла бы здесь
венная оценка
вной оценкой,

надо знать за-
ионно опасные
и при авариях,
аемых мероп-
симость нужна
разницей, что
арактеристика

критерия, а не
ия должна ха-
кватратичным

обствующие, на
именения этого

неоднозначно.
и сопровождать
таковые. Поня-
относительное
зе радиобиоло-
ионного риска

вать таким об-
рмативов, были
е уместны не-
блюдение логи-
при этом слож-
ой безопасности
отражают собой

уточнения зна-
я.

зных математи-
ржится в стан-
я понятие «на-
тности различ-
ного старения,
тонным риском,
сти радиацион-

рассматривать не
радиационной опас-
ни, но и ее сред-

ого исхода при воз-
вып. 6, с. 604—612.

2. ГОСТ 25645.214-85. Безопасность радиационная экипажа космического аппарата в космическом полете. Модель обобщенного радиобиологического эффекта. М.: Госстандарт СССР, 1986.
3. ГОСТ 25645.215-85. Безопасность радиационная экипажа космического аппарата в космическом полете. Нормы безопасности при продолжительности полета до трех лет. М.: Госстандарт СССР, 1986.
4. Нормы радиационной безопасности (НРБ-96): гигиенические нормативы. М.: Информационно-издательский центр Госкомсанэпиднадзора России, 1996.
5. Рекомендации МКРЗ. Публикация №60. Ч. 1. Радиационная безопасность. Пер. с англ. М.: Энергоатомиздат, 1990.
6. Губин А.Т. К вопросу обоснованности общепринятой методологии оценки радиационного риска. — Атомная энергия, 1993, т. 74, вып. 1, с. 63—70.
7. Рекомендации МКРЗ. Публикация №60. Ч. 2. Радиационная безопасность. Пер. с англ. М.: Энергоатомиздат, 1990.
8. Thomas D., Darby S., Fagnani F. e.a. Definition and estimation of lifetime detriment from radiation exposures: principles and methods. — Health Phys., 1992, v. 63, p. 259—271.
9. РД 50-25645.205-83. Безопасность радиационная экипажа космического аппарата в космическом полете. Метод расчета радиационного риска. М.: Госстандарт СССР, 1984.
10. Газенко О.Г., Сакович В.А., Сычков М.А., Шафиркин А.В. Модельное описание влияния временной неравномерности облучения на радиационное поражение организма. — В кн.: Сб. докл. Всесоюз. науч.-практ. конференции по проблеме стандартизации «Канопус». М.: Госстандарт, 1982, с. 89—91.
11. Губин А.Т., Зухбая Т.М., Сакович В.А. и др. Модель эффективной дозы для расчета радиационного риска при космических полетах. Тез. докл. на XVII совещ. рабочей группы по косм. биол. и мед. Гагра, 27—31 мая 1985 г., с. 276.
12. Губин А.Т., Сакович В.А., Сычков М.А. и др. Математическая модель скорости смертности животных при радиационных воздействиях. — Там же, с. 277.
13. Губин А.Т., Сакович В.А., Шафиркин А.В. Математическая модель изменения клеточности костного мозга при радиационных воздействиях. — Радиационная биология. Радиоэкология, 1995, т. 35, вып. 6, с. 889—897.
14. Gompertz B. On the nature of the function expressive of the law of human mortality and on a new mode of determining life contingencies. — Philos. Trans. Roy. Soc. London A, 1825, v. 115, p. 513—585.
15. ГОСТ 25645.201.83. Безопасность радиационная экипажа космического аппарата в космическом полете. Термины и определения. М.: Госстандарт СССР, 1983.
16. Веселовский Л.Н., Ковалев Е.Е., Кузнецов В.Г. и др. Основные принципы отыскания оптимальной защиты ядерных установок космических аппаратов. — В кн.: Проблемы космической биологии, т. VI. М.: Наука, 1967, с. 489—495.
17. Petrov V.M., Kovalev E.E., Sakovich V.A. Radiation: risk and protection in manned space flight. — Acta Astronautica, 1981, v. 8, №9—10, p. 1091—1097.
18. Воробьев Е.И., Ковалев Е.Е., Петров В.М., Сакович В.А. Нормативы радиационной безопасности для космических полетов. — Атомная энергия, 1981, т. 50, вып. 5, с. 331—333.
19. Ковалев Е.Е., Петров В.М., Сакович В.А., Сычков М.А. О возможных направлениях совершенствования критериев радиационной безопасности космических полетов. — Космическая биология и авиакосмическая медицина, 1983, №2, с. 8—13.
20. Kovalev E.E., Sakovich V.A. State standards for radiation of space flights. — Nucl. Tracks Radiat. Meas., 1989, v. 6, №1, p. 49—52; см. также Ковалев Е.Е., Сакович В.А. Государственные стандарты по радиационной безопасности космических полетов. — Атомная энергия, 1990, т. 65, вып. 5, с. 381—385.
21. ГОСТ 25645.202-83. Безопасность радиационная экипажа космического аппарата в космическом полете. Требования к индивидуальному и бортовому дозиметрическому контролю. М.: Госстандарт СССР, 1984.

Поступила в Редакцию 18.06.98

УДК 539.12.08:621.039.5

ДОЗА ОБЛУЧЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАТОРА ПРИ АВАРИИ НА КРИТИЧЕСКОЙ СБОРКЕ В РФЯЦ—ВНИИЭФ

Ходалев Г.Ф., Тарасова Е.Ю., Житник А.К., Калашиников М.В.
(РФЯЦ—ВНИИЭФ),

Цветков В.И., Клещенко Е.Д., Бочвар И.А., Левочкин Ф.К.
(ГНЦ РФ—Институт биофизики)

Авария на критической сборке РФЯЦ—ВНИИЭФ произошла 17 июня 1997 г. в 10 ч 50 мин [1]. Вследствие возникшей самопроизвольной цепной реакции экспериментатор увидел световую вспышку и ощутил телом тепло, после чего за 5—10 с

покинул помещение стенда. В настоящей работе приводятся результаты определения дозы нейтронного и γ -излучения, полученной пострадавшим.

В РФЯЦ—ВНИИЭФ развернута система индивидуальной аварийной дозиметрии, разработанная в 70-е гг. в Институте биофизики и внедренная на всех ядерно опасных участках предприятий Минатома. Ее основой является индивидуальный аварийный дозиметр β -, γ -, нейтронного излучения ГНЕЙС [2], включающий в себя родиевый активационный детектор нейтронов [3], трековый нейтронный дозиметр ДИНА с мишенями из сплава $^{237}\text{Np}-\text{Al}$, разработанного совместно с ВНИИМ, в борном фильтре [4], два термолюминесцентных дозиметра γ -излучения ИКС-А [5] в фильтрах из свинца и алюминия, выравнивающих энергетическую зависимость его чувствительности. Система также включает инструкции и рекомендации для служб радиационной безопасности в аварийных ситуациях [6].

В соответствии с инструкциями и рекомендациями [6] по результатам измерения наведенной активности γ -излучения от тела пострадавшего А.Н. Захарова начальником группы дозиметрического контроля была оценена средняя по телу доза нейтронов — она составила ~ 10 Гр. Прибывшая по аварийному вызову медсестра находящегося на площадке медпункта ввела пострадавшему противорадиационный препарат, после чего он был доставлен в отделение центральной медсанчасти (г. Саров). В 18 ч 30 мин пострадавшего отправили самолетом в Москву в клинику ГНЦ РФ — Институт биофизики.

Дозиметр ГНЕЙС размещался в области левой ключицы пострадавшего на воротнике халата. По результатам спектрометрических измерений активации родиевого детектора, а также алюминиевого фильтра дозиметра ИКС предварительно оценили дозу быстрых нейтронов в месте ношения дозиметра, которая оказалась примерно равной 50 Гр. При переходе от потока нейтронов, определенного по активации детекторов из ^{103}Rh и фильтров из ^{27}Al , к дозе использовали известный спектр утечки нейтронов из металлической активной зоны. В дальнейшем дозу быстрых нейтронов уточнили с помощью трекового дозиметра ДИНА с учетом дозовой цены трека, характерной для данных спектров утечки нейтронов. Доза нейтронов в месте размещения дозиметра составила 45 ± 5 Гр, флюенс нейтронов на поверхности верхней трети груди, определенный с помощью трековых детекторов ДИНА, оказался равным $(1,8 \pm 0,2) 10^{12} \text{ см}^{-2}$, что совпало с проведенными затем расчетами. Дозиметры γ -излучения ИКС показали (по двум стеклам) $3,5 \pm 0,3$ Гр (среднее по двум детекторам).

Пострадавший поступил в клинику Института биофизики в 21 ч 20 мин. С помощью дозиметра ДРГ-01 Т1 вплотную к телу измерили мощность дозы γ -излучения пострадавшего. Повторное измерение в 10 ч 20 мин 18 июня 1997 г. показало, что за это время мощность дозы упала почти вдвое. Такая динамика соответствует периоду полураспада наведенной активности ^{24}Na . По результатам измерения активации тела доза нейтронов, усредненная по всему телу, была оценена в 8—11 Гр.

На основании результатов измерения дозы нейтронов и γ -излучения с помощью аварийного дозиметра ГНЕЙС (~ 50 Гр) и описания положения пострадавшего относительно сборки, сделанного им самим, предварительная оценка суммарной дозы γ -нейтронного излучения на кисти рук составила 200—250 Гр.

В 8 ч 18 июня 1997 г. у пострадавшего для анализа были взяты две пробы крови и образцы волос со лба, затылка, левой и правой подмышек и области лобка. Исследования проб крови показали, что удельная активность ^{24}Na , приведенная к моменту СЦР, оказалась равной 260 и 290 Бк/мл, что согласно методике [7] соответствует дозе 14 ± 4 Гр при равномерном облучении нейтронами от такого типа сборок.

Анализ волос по реакции на быстрых нейтронах $^{32}\text{S}(n, p)^{32}\text{P}$ в первое время был затруднен присутствием значительного количества ^{24}Na в потных волосах. Поэтому измерения проводили в течение недели для выделения компонентов с разным периодом полураспада (табл. 1). Для расчета дозы использовали энергетическую зависимость сечения реакции и спектр утечки нейтронов.

аты определения

иной дозиметрии, ядерно опасных аварийный в себя родиевый метр ДИНА с мивборном фильтре рильтрах из свинувствительности. идиационной без-

татам измерения юва начальником оза нейтронов — находящегося на парат, после чего). В 18 ч 30 мин — Институт био-

радавшего на воивации родиевого ительно оценили залась примерно активации детекий спектр утечки истрых нейтронов е цены трека, хаесте размещения хней трети груди, азался равным Дозиметры γ -извум детекторам). ч 20 мин. С поюзы γ -излучения показало, что за етствует периоду я активации тела Гр.

нения с помощью традавшего относуммарной дозы

две пробы крови ти лобка. Исслеенная к моменту 7] соответствует пла сборок.

первое время был волосах. Поэтому разным периодом кую зависимость

Таблица 1. Удельная активность волос и доза нейтронов

| Локализация | Активность, Бк/г | Доза, Гр |
|-----------------|------------------|-------------|
| Лоб | 15 ± 1 | 41 ± 12 |
| Затылок | $5 \pm 0,5$ | 13 ± 4 |
| Левая подмышка | 16 ± 1 | 43 ± 13 |
| Правая подмышка | 22 ± 2 | 60 ± 18 |
| Лобок | 11 ± 1 | 29 ± 9 |

Схема размещения пострадавшего относительно сборки в момент аварии, указанная им самим во время пребывания в клинике Института биофизики, показана на рис. 1. Облучение было почти мгновенным, сильно неравномерным, в основном локализованным в области рук, головы и торса.

По спектру нейтронов утечки для металлических активных зон, положению пострадавшего относительно источника и по данным работы [8] было рассчитано глубинное распределение суммарной дозы нейтронов и отдельных ее компонентов (кермы нейтронов и дозы захватного γ -излучения) в расчете на 1 см^{-2} .

Антропометрические данные пострадавшего: рост 180 см, передне-задний размер на уровне нижней части грудины 20 см, крестца 21 см, в направлении лоб—затылок 18 см.

Распределение дозы облучения для направлений 1 — $0 \pm 20^\circ$ и 3 — $35 \pm 15^\circ$ от горизонтальной плоскости приведено на рис. 2. Нумерация направлений соответствует принятой в работе [8].

После смерти была исследована эмаль зубов пострадавшего и установлено, что сигнал ЭПР соответствует дозе $5,7 \pm 0,5$ Гр. Если учесть, что чувствительность эмали зубов к нейтронам $\leq 3\%$ ее чувствительности к γ -излучению [9] и доза нейтронов в области лица ~ 41 Гр, то $\leq 1,2$ Гр можно отнести на счет нейтронов, дозу захватного γ -излучения оценить приблизительно в 4,5 Гр. Это значение заметно ближе к рассчитанному для лица 5,4 Гр, особенно если учесть, что 3% являются верхней оценкой чувствительности эмали зубов к нейтронам.

Методом Монте-Карло в РФЯЦ—ВНИИЭФ были рассчитаны спектры

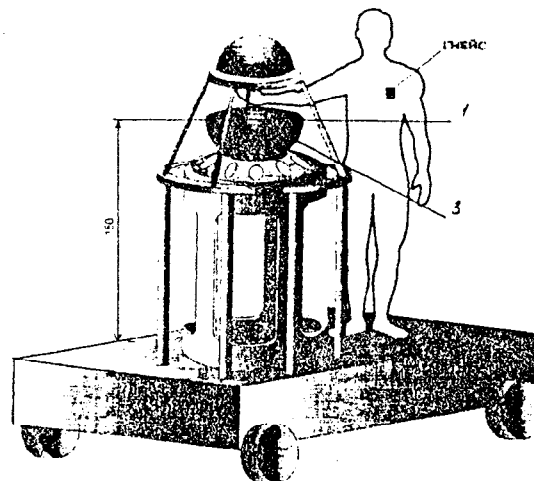


Рис. 1. Схема размещения пострадавшего относительно критической сборки; 1, 3 — направление распределения дозы облучения по глубине тела

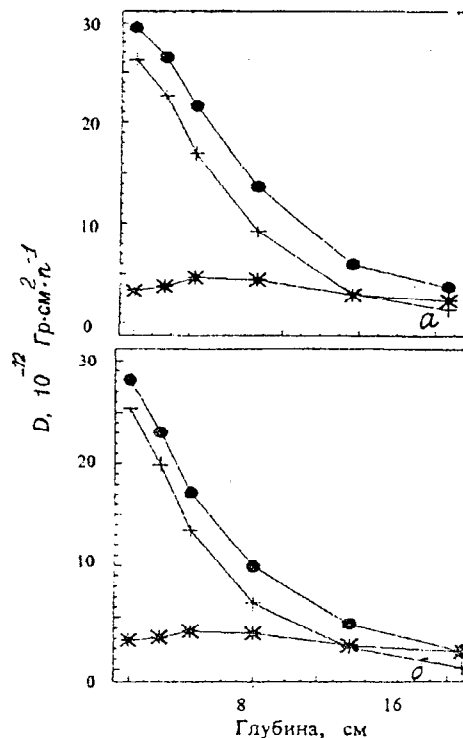


Рис. 2. Распределение дозы по глубине тела пострадавшего в направлении 1 (а) и 3 (б): ● — полная доза, + — керма; * — доза γ -излучения

утечки из аварийной сборки и дозовые характеристики на отдельные части тела. Расчет проводили по программе С-90, которая предназначена для расчета переноса нейтронов, образования γ -квантов в реакциях $n-\gamma$ в процессах активации и переноса [10]. Для описания взаимодействия нейтронов и γ -квантов с веществом использовали несколько библиотек и многогрупповые системы констант. Данные расчетов позволили сделать оценки со статистической погрешностью, не превышающей 3% по спектрам потоков нейтронного и γ -излучения на одно деление в сборке (табл. 2—4). Энерговывделение за время нахождения пострадавшего у сборки было оценено на основании анализа:

показаний аварийного комплекта дозиметров ГНЕЙС пострадавшего;
определения самим пострадавшим расстояния от грудной клетки до центра сборки, которое составило ~ 53 см;

результатов калибровочного опыта по оценке эффективности регистрации и индивидуальных особенностей дозиметра ДИНА [11];

расчета переноса нейтронов и γ -квантов в аварийной ситуации и калибровочном опыте по программе С-90;

антропометрических измерений на стенде ФКБН-2М, которые показали, что пострадавший мог находиться на расстоянии 50—56 см от центра сборки.

Т а б л и ц а 2. Энергетический спектр γ -квантов утечки, нормированный на одно деление в сборке

| i | $E_i - E_{i-1}$, МэВ | F_i , γ -квант/дел. |
|-----|-----------------------|------------------------------|
| 1 | 0—0,05 | 0 |
| 2 | 0,05—0,1 | $4,555 \cdot 10^{-4}$ |
| 3 | 0,1—0,5 | $9,554 \cdot 10^{-2}$ |
| 4 | 0,5—0,7 | $5,080 \cdot 10^{-2}$ |
| 5 | 0,7—1 | $6,270 \cdot 10^{-2}$ |
| 6 | 1—5 | $1,406 \cdot 10^{-1}$ |
| 7 | 5—7 | $1,745 \cdot 10^{-3}$ |
| 8 | 7—10 | $1,805 \cdot 10^{-4}$ |

Т а б л и ц а 3. Энергетический спектр нейтронов утечки, нормированный на одно деление в критической сборке

| j | $E_j - E_{j-1}$, МэВ | F_j , нейтр./дел. $\cdot 10^{-2}$ | j | $E_j - E_{j-1}$, МэВ | F_j , нейтр./дел. $\cdot 10^{-2}$ |
|-----|-----------------------|-------------------------------------|-----|-----------------------|-------------------------------------|
| 1 | 10^{-10} —0,1 | 4,484 | 11 | 0,76—0,88 | 7,642 |
| 2 | 0,1—0,16 | 5,203 | 12 | 0,88—1,0 | 6,533 |
| 3 | 0,16—0,22 | 5,615 | 13 | 1,0—1,2 | 9,361 |
| 4 | 0,22—0,30 | 7,941 | 14 | 1,2—1,4 | 7,742 |
| 5 | 0,30—0,36 | 5,812 | 15 | 1,4—1,7 | 8,911 |
| 6 | 0,36—0,425 | 6,262 | 16 | 1,7—2 | 6,675 |
| 7 | 0,425—0,5 | 6,574 | 17 | 2—2,4 | 7,227 |
| 8 | 0,5—0,575 | 6,233 | 18 | 2,4—3 | 8,104 |
| 9 | 0,575—0,66 | 6,534 | 19 | 3—4 | 8,016 |
| 10 | 0,66—0,76 | 7,003 | 20 | 4—18 | 8,453 |

Т а б л и ц а 4. Результаты определения дозы, полученной пострадавшим при СЦР

| Локализация | Нейтронное излучение | | γ-Излучение | |
|-----------------|----------------------|--|-------------------|-------------------------|
| | Керма, Гр | Метод | Доза, Гр | Метод |
| Лицо | 41 ± 12 (лоб) | $^{32}\text{S}(n, p)^{32}\text{P}$ | 4,5 (зубы) 5,4 | ЭПР Расчет |
| Затылок | 13 ± 4 | $^{32}\text{S}(n, p)^{32}\text{P}$ | — | — |
| Левая подмышка | 43 ± 13 | $^{32}\text{S}(n, p)^{32}\text{P}$ | — | — |
| Правая подмышка | 60 ± 18 | $^{32}\text{S}(n, p)^{32}\text{P}$ | — | — |
| Лобок | 29 ± 9 | $^{32}\text{S}(n, p)^{32}\text{P}$ | 3 | Расчет |
| Грудь | 45 ± 5 | ДИНА | 3,4 ± 0,1 | ИКС-А |
| | 40 ± 1 | Расчет | 2,5 ± 0,5 | Расчет |
| Спина | 6,7 | Расчет | 4,1 | Расчет |
| Кисти рук | 200—250 | Оценка по показаниям ГНЕЙС | | |
| | 1700 ± 170 | Расчет (1 см от сборки) | 120 ± 12 | Расчет (1 см от сборки) |
| Средняя по телу | 8—11 | $^{23}\text{Na}(n, \gamma)^{24}\text{Na}$ (экспрессно) | — | — |
| | 14 ± 4 | $^{23}\text{Na}(n, \gamma)^{24}\text{Na}$ (спектрометр) | — | — |

Полученные данные позволили оценить энерговыделение в сборке за время нахождения пострадавшего возле нее $(4,9 \pm 1,1)10^{16}$ дел. по анализу прохождения γ-квантов и до $(5,2 \pm 0,6)10^{16}$ дел. по анализу прохождения нейтронного излучения в предположении, что расстояние от центра сборки до пострадавшего составляло 53 см. Также были определены дозовые компоненты, формирующие показания дозиметров ДИНА и ИКС. Показания нейтронного детектора ДИНА сформировались за счет поглощенной дозы от прямого потока нейтронного излучения и поглощенной дозы от отраженного от тела потока нейтронного излучения $D = D_{\text{пр}} + D_{\text{от}}$, где $D_{\text{пр}} = 0,9 D$, $D_{\text{от}} = 0,1 D$ — показания дозиметра, обусловленные прямым и отраженным потоком нейтронного излучения соответственно.

Показания дозиметров γ-излучения ИКС сформированы следующим образом: $D = D_{\text{пр}} + D_{\text{от}} + D_{\text{р}} + D_{\text{п}}$, где $D_{\text{пр}} = 0,764 D$, $D_{\text{от}} = 0,033 D$ — показания дозиметра, обусловленные прямым и отраженным потоком γ-излучения соответственно; $D_{\text{р}} = 0,203 D$ — показания дозиметра, обусловленные потоком рожденного в теле γ-излучения по реакции $^1\text{H}(n, \gamma)^2\text{H}$; $D_{\text{п}} = 1 \cdot 10^{-11}$ рад · см² · нейтр.⁻¹ · $1,89 \cdot 10^{12}$ нейтр. · см⁻² [5] — показания дозиметра, обусловленные нейтронной чувствительностью.

Исходя из изложенного, действительную дозу аварийного облучения можно оценить 40 ± 1 Гр для нейтронной и $2,5 \pm 0,5$ Гр для γ-составляющей. Расчетная доза на руки пострадавшего составила 1700 ± 170 Гр для нейтронной и 120 ± 12 Гр для γ-составляющей (в предположении, что руки находились на расстоянии ~1 см от сборки). С учетом различий в геометрии, принятой при предварительных оценках и в расчетах, результаты удовлетворительно согласуются.

Результаты дозиметрических измерений сведены в табл. 4. Относительная биологическая эффективность нейтронов такой энергии и при такой дозе мало отличается от единицы, и обобщенная эквивалентная доза [12] фактически равна поглощенной.

Поток нейтронов на поверхности нижней части живота пострадавшего оценен в $1,2 \cdot 10^{12}$ см⁻², доза захватного γ-излучения ≈ 3 Гр.

части тела. Расчет переноса нейтронов, переноса [10]. Для вызвали несколько позволили сделать спектрам потоков Энерговыделение вании анализа:

авшего;
до центра сборки, регистрации и ин-

и калибровочном

показали, что по-рки.

но деление в сборке

γ-квант/дел.

0

$4,555 \cdot 10^{-4}$

$4,554 \cdot 10^{-2}$

$5,080 \cdot 10^{-2}$

$5,270 \cdot 10^{-2}$

$1,406 \cdot 10^{-1}$

$1,745 \cdot 10^{-3}$

$1,805 \cdot 10^{-4}$

на одно деление

F_{γ} , нейтр./дел. · 10⁻²

7,642

6,533

9,361

7,742

8,911

6,675

7,227

8,104

8,016

8,453

В настоящее время для получения более полной картины облучения методом ЭПР исследуется костная ткань фаланг пальцев и ребер пострадавшего. Для корректной интерпретации результатов измерений необходима оценка чувствительности к нейтронам костной ткани, которая в отличие от эмали зубов минерализована лишь на 50%.

В заключение авторы приносят благодарность Т.Н. Скворцовой за обработку аварийных дозиметров ГНЕЙС, А.П. Ботовой и З.В. Волковой за подготовку программ к расчету и И.Б. Кеирим-Маркусу за обсуждение результатов и полезные замечания.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пунин В.Т., Смирнов И.Г., Зыков С.А. Авария на стенде критических сборок в РФЯЦ—ВНИИЭФ. — Атомная энергия, 1997, т. 83, вып. 2, с. 154—156.
2. Бочвар И.А., Кеирим-Маркус И.Б., Князев В.А. и др. Комплект индивидуальных дозиметров бета-гамма-нейтронного излучения ГНЕЙС. — В кн.: Сб. работ по некоторым вопросам дозиметрии и радиометрии ионизирующих излучений. Дмитровград, 1974, вып. 5, с. 51—54.
3. Кеирим-Маркус И.Б., Крайтор С.Н., Кушнерева К.К., Черкашина О.В. Об использовании изомерного ролевого детектора для измерения плотности потока быстрых нейтронов. — В ст.: Метрология нейтронного излучения на реакторах и ускорителях. М., ЦНИИАтоминформ, 1974, т. 1, с. 94—96.
4. Кеирим-Маркус И.Б., Королева Т.В., Крайтор С.Н., Успенский Л.Н. Характеристики индивидуального трекового дозиметра нейтронов ДИНА. — Атомная энергия, 1973, т. 34, вып. 1, с. 11—13.
5. Бочвар И.А., Гимадова Т.И., Кеирим-Маркус И.Б. и др. Метод дозиметрии ИКС. М.: Атомиздат, 1977.
6. Определение доз излучения при авариях. — В сб.: Дозиметрическое обследование пострадавших при радиационных авариях. М.: Атомиздат, 1975.
7. Крайтор С.Н. Дозиметрия при радиационных авариях. М.: Атомиздат, 1979, с. 182—186.
8. Золотухин В.Г., Кеирим-Маркус И.Б., Кочетков О.А. и др. Тканевые дозы нейтронов в теле человека. М.: Атомиздат, 1972.
9. Бочвар И.А., Клещенко Е.Д., Кушнерева К.К., Левочкин Ф.К. Чувствительность эмали зубов человека к α -излучению и нейтронам. — Атомная энергия, 1997, т. 83, вып. 5, с. 380—383.
10. Донской Е.Н., Ельцов В.А., Житник А.К. и др. Метод Монте-Карло во ВНИИЭФ. — Вопросы атомной науки и техники. Сер. Математическое моделирование физических процессов, 1993, вып. 2, с. 61—64.
11. Беловодский Л.Ф., Великанова И.А., Кошелев А.С., Тарасова Е.Ю. Индивидуальные особенности аварийных дозиметров нейтронов ДИНА. — Атомная энергия, 1990, т. 69, вып. 3, с. 318—320.
12. Гозенбук В.Л., Кеирим-Маркус И.Б. Дозиметрические критерии тяжести острого облучения человека. М.: Энергоатомиздат, 1988.

Поступила в Редакцию 03.06.98

УДК 621.039.58

ОЦЕНКА РИСКА РАДИОАКТИВНОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ АЭС

Крышев И.И. (НПО «Тайфун»), Рязанцев Е.П. (РНЦ «Курчатовский ин-т»)

В XX веке человечество получило в свои руки принципиально новый источник ядерной энергии, в миллионы раз превосходящий его прежние энергетические возможности. Использование столь мощного источника энергии остро ставит приоритетную задачу безопасности человека и среды его обитания. Развитие ядерной технологии сопровождается образованием радиоактивных отходов, потенциально являющихся источником риска для человека и биосферы. Радиоактивные отходы поступают в окружающую природную среду на всех этапах ядерного топливного цикла: при добыче и переработке урановых руд, изготовлении ядерного топлива, использовании топлива в ядерных реакторах, регенерации отработавшего топлива, хранении радиоактивных отходов. Предметом настоящей статьи является оценка риска радиоактивного загрязнения окружающей природной среды, обусловленного выбросами и сбросами АЭС России. Оценку проводили на основе методологии множественных источников и путей облу-