

УДК 539.16; 539.165; 551.521

МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ ДОЧЕРНИХ ПРОДУКТОВ РАСПАДА РАДОНА В ПРИЗЕМНОМ АТМОСФЕРНОМ СЛОЕ ЗЕМЛИ

© 2021 г. В. В. Дьячков^{a, b, *}, Ю. А. Зарипова^{a, b}, А. В. Юшков^{a, b}, А. Л. Шакиров^{a, b}, М. Т. Бигельдиева^a, А. А. Медеубаева^b, А. Е. Стваева^b

^aНациональная нанотехнологическая лаборатория открытого типа, Алматы, 050040 Республика Казахстан

^bКазНУ им. аль-Фараби, Алматы, 050040 Республика Казахстан

*E-mail: slava_kpss@mail.ru

Поступила в редакцию 31.10.2020 г.

После доработки 09.11.2020 г.

Принята к публикации 10.11.2020 г.

В настоящее время актуальной проблемой является изучение временных вариаций различных ядерных излучений из литосферы в предгорных и пустынных ландшафтах. Имеются ввиду потоки нейтронов, гамма-квантов, бета-частиц и эманаций тяжелых химических элементов. Проблема изучения таких распределений в приземном атмосферном слое Земли остается актуальной, в связи с тем, что они сосредоточены в среде обитания человека и оказывает непосредственное влияние на здоровье населения. Данная работа посвящена изучению бета-спектров радиационного природного фона в приземном атмосферном слое Земли. Происхождение измеренных бета-спектров связано с дочерними продуктами распада изотопов радона ^{219}Rn , ^{220}Rn , ^{222}Rn в трех природных радиоактивных рядах. Измерения спектров были выполнены с октября 2018 года по октябрь 2019 в предгорьях Заилийского Алатау Тянь-Шаня в г. Алматы. Периодичность измерений, в среднем составляла около 10 измерений в сутки с экспозицией не менее 2000 с. Накоплена база данных суточных, сезонных и годовичных вариаций бета-спектров. Для анализа полученных данных было разработано специальное программное обеспечение “Анализатор массива бета-спектров”, которое позволило обработать стандартные выходные файлы спектрометрической установки “Спутник” и выполнить интегрирование каждого спектра в заданном временном интервале. Временная вариация за измеренный период описывалась при помощи стандартного математического компьютерного пакета вейвлет-анализа. Полученные в результате интегрирования вейвлет-спектры использованы для выявления суточных, сезонных и годовичных эффектов в вариациях бета-эманаций. Наряду с этим аналогичная математическая обработка выполнялась для прогноза воздействия внешних факторов во временных вариациях бета-частиц.

Ключевые слова: дочерние продукты распада радона, бета-спектры, природные радионуклиды, вейвлет-анализ, вариации природного радиационного фона

DOI: 10.56304/S2079562920060159

ВВЕДЕНИЕ

При распаде изотопов урана и тория в радиоактивных природных цепочках образуются изотопы радона, которые из глубин литосферы путем коагуляции и дальнейшей диффузии попадают в приземный атмосферный слой. Несмотря на многочисленные исследования эманации радона [1–4], проблема изучения распределений концентраций радона в атмосфере Земли остается актуальной, в связи с тем, что радиоактивный газ радон сосредоточен в среде обитания человека и оказывает непосредственное влияние на здоровье населения в виде повышенного риска онкозаболеваемости. Вклад радона и его дочерних продуктов распада в общий радиационный фон велик и составляет более 50%. По данным Международной

комиссии по радиологической защите (МКРЗ, публикации № 50 и 65) основная доля онкологических заболеваний легких и бронхов вызывается именно изотопами радона и, в особенности, их дочерние продукты распада [5, 6]. Радон классифицируется Международной организацией здравоохранения, Агентством по исследованию рака (IARC) в качестве канцерогена I группы [7]. Воздействие радона является второй по значимости причиной развития рака легких у курящих и первой для некурящих людей в мире [8, 9].

В результате распадов изотопов радона в приземном атмосферном слое образуются дочерние продукты распада (ДПР). Большинство экспериментальных методов, были разработаны для определения альфа радиоактивного фона, формируе-

Таблица 1. Схема распадов ДПР ^{222}Rn

Радионуклид	Тип распада	$T_{1/2}$	E , МэВ	ДПР
Rn-222	α	3.8235 д	5.590	Po-218
Po-218	α 99.98%	3.10 мин	6.115	Pb-214
	β^- 0.02%		0.265	At-218
At-218	α 99.90%	1.5 с	6.874	Bi-214
	β^- 0.10%		2.883	Rn-218
Rn-218	α	35 мс	7.263	Po-214
Pb-214	β^-	26.8 мин	1.019	Bi-214
Bi-214	β^- 99.98%	19.9 мин	3.272	Po-214
	α 0.02%		5.617	Tl-210
Po-214	α	0.1643 мс	7.883	Pb-210
Tl-210	β^-	1.30 мин	5.484	Pb-210
Pb-210	β^-	22.3 года	0.064	Bi-210
Bi-210	β^- 99.99987%	5.013 сут	1.161	Po-210
	α 0.00013%		5.036	Tl-206
Po-210	α	138.376 сут	5.407	Pb-206
Tl-206	β^-	4.202 мин	1.532	Pb-206
Pb-206		Стабильный		

мого ДПР [10–15]. Однако среди радионуклидов, дающих наибольший вклад в мощность дозы внутреннего облучения, на первом месте стоят короткоживущие продукты распада радона-222 (около 60%): основную часть которых составляют бета-радиоактивные изотопы, такие как, ^{214}Pb (26.8 мин), ^{214}Bi (19.9 мин), ^{210}Tl (1.3 мин), ^{210}Bi (5.013 сут), ^{210}Pb (22.3 года), ^{206}Tl (4. 2020 мин) (табл. 1). Далее идут естественные радионуклиды: калий-40 и рубидий-87.

Измерения эманации радона довольно сложны, так как, зависят от различных сопутствующих природных и антропогенных факторов. Временные вариации эманации радона, изученные авторами [16, 17], показали также сильную динамику концентрации не только от суточных и сезонных вариаций. Помимо временных вариаций радона и его ДПР их концентрации зависят от высоты внутри зданий и в свободной атмосфере, геологического ландшафта, температуры, давления и других сложных факторов [18]. Вариации эманации радона зависят также от локализации тектонических разломов в земной коре, состава, пористости грунта и наличия приповерхностных подземных вод, а также других геологических свойств местности.

Основная доза, получаемая при вдыхании радона, формируется вследствие насыщения клеток организма и межклеточного пространства дочерними продуктами распада [19]. Таким образом, актуальным представляется выполнение измерений активности распределений бета-активных радионуклидов ДПР радона в приземном слое атмосферы

в различные моменты времени. Это связано, прежде всего, с изучением рисков возникновения онкозаболеваний, вызванной радионуклидами, попадающими в организм человека через дыхательные пути и пищеварительную систему. Для оценки фактора накопления в организме человека бета-радиоактивных ДПР радона выполнены круглогодичные измерения бета-спектров в селитебной предгорной зоне Тянь-Шаня в отрогах Заилийского Алатау.

МЕТОДИКА И РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

Методика измерений временных вариаций природного бета-излучения основана на регистрации спектров в диапазоне до 5.5 МэВ. При проведении измерений активности радионуклидов в исследуемых почвенных образцах использовался сцинтилляционный бета-спектрометр типа СКС-99 “Спутник”. Были проведены измерения спектров природных бета-активных радионуклидов в период с октября 2018 года по октябрь 2019. Периодичность круглогодичных измерений, в среднем составляла около 10 измерений в сутки с экспозицией не менее 2000 сек. За год измерений накопился большой массив экспериментальных данных по спектрам. Для анализа которых авторами разработано специальное программное обеспечение “Анализатор массива бета-спектров”. Данное программно-математическое обеспечение позволило обработать стандартные выходные файлы спектрометрической установки “Спутник” путем интегрирования каж-

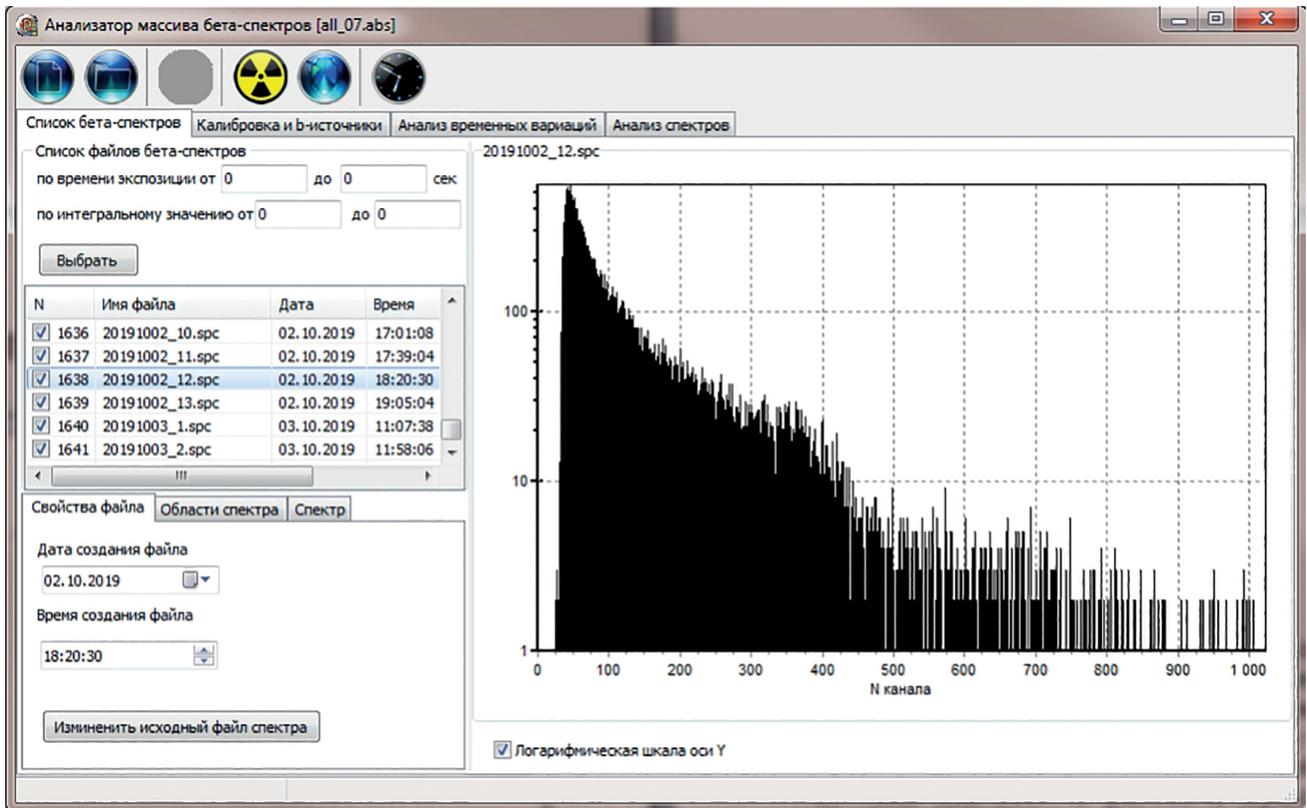


Рис. 1. Вид спектра с интерфейса ПО “Анализатор массива бета-спектров”.

ного спектра в заданных интервалах. На рис. 1 представлен интерфейс данного программно-математического обеспечения, позволяющего визуализировать результаты анализа и выбрать оптимальный диапазон интегрирования.

За период измерений было накоплено более 1600 файлов с бета-спектрами. Разработанное ПО, после интегрирования каждого спектра, формировало временную вариацию (рис. 2), усредненную за определенный период. В данном случае усреднение выполнялось за 2 дня. Видно, что на фоне суточных колебаний определенно прослеживается сезонная вариация природных бета-активных радионуклидов.

Временная вариация за измеренный период была математически анализировалась с применением вейвлет-анализа. Вейвлеты представляют собой особые функции в виде коротких волн (всплесков) с нулевым интегральным значением и с локализацией по оси независимой переменной (t или x), способных к сдвигу по этой оси и масштабированию (растяжению/сжатию). Любой из наиболее часто используемых типов вейвлетов порождает полную ортогональную систему функций. В случае вейвлет-анализа (декомпозиции) процесса (сигнала) в связи с изменением масштаба вейвлеты способны выявить аномалии в характеристиках про-

цесса на различных шкалах, а посредством сдвига можно проанализировать свойства процесса в различных точках на всем исследуемом интервале. Именно благодаря свойству полноты этой системы, можно осуществить восстановление (реконструкцию или синтез) процесса посредством обратного вейвлет-преобразования. Благодаря этому, зная вычисленные коэффициенты вейвлет-анализа, можно спрогнозировать поток бета-частиц природного радиационного фона в ближайшей перспективе.

Методика вейвлет-анализа заключалась в следующем [20]: вейвлет-преобразование (ВП) одномерного сигнала — это его представление в виде обобщенного ряда или интеграла Фурье по системе базисных функций

$$\Psi_{ab}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \Psi\left(\frac{t-b}{a}\right), \quad (1)$$

сконструированных из материнского (исходного) вейвлета $\Psi(t)$, обладающего определенными свойствами за счет операций сдвига во времени (b) и изменения временного масштаба (a). Все обозначения общеприняты. Тогда непрерывное вейвлет-преобразование примет следующий вид для прямого

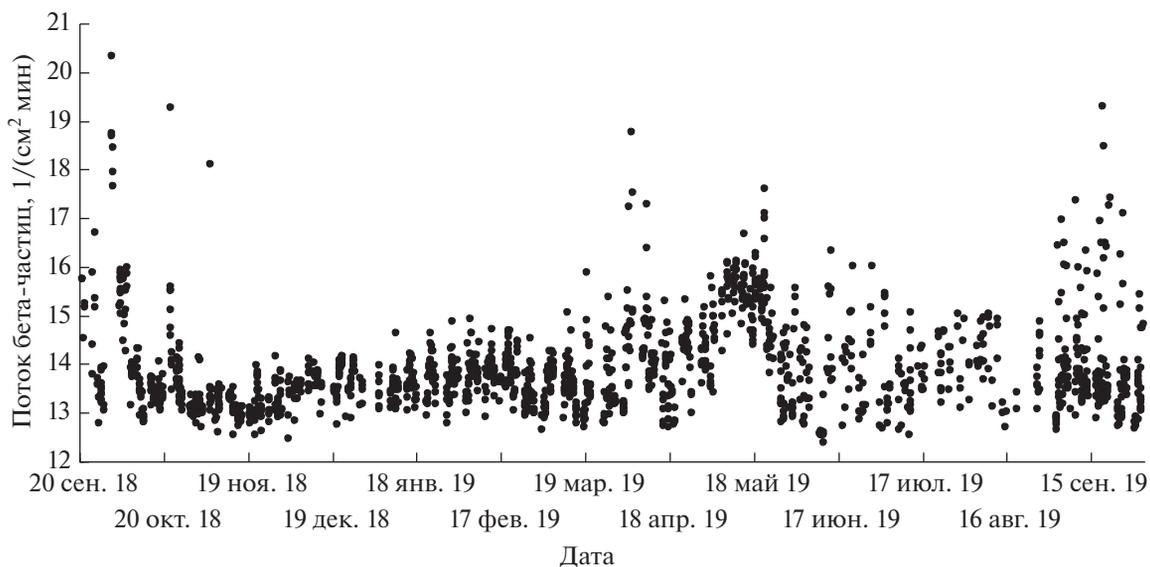


Рис. 2. Временные вариации радиационного бета фона.

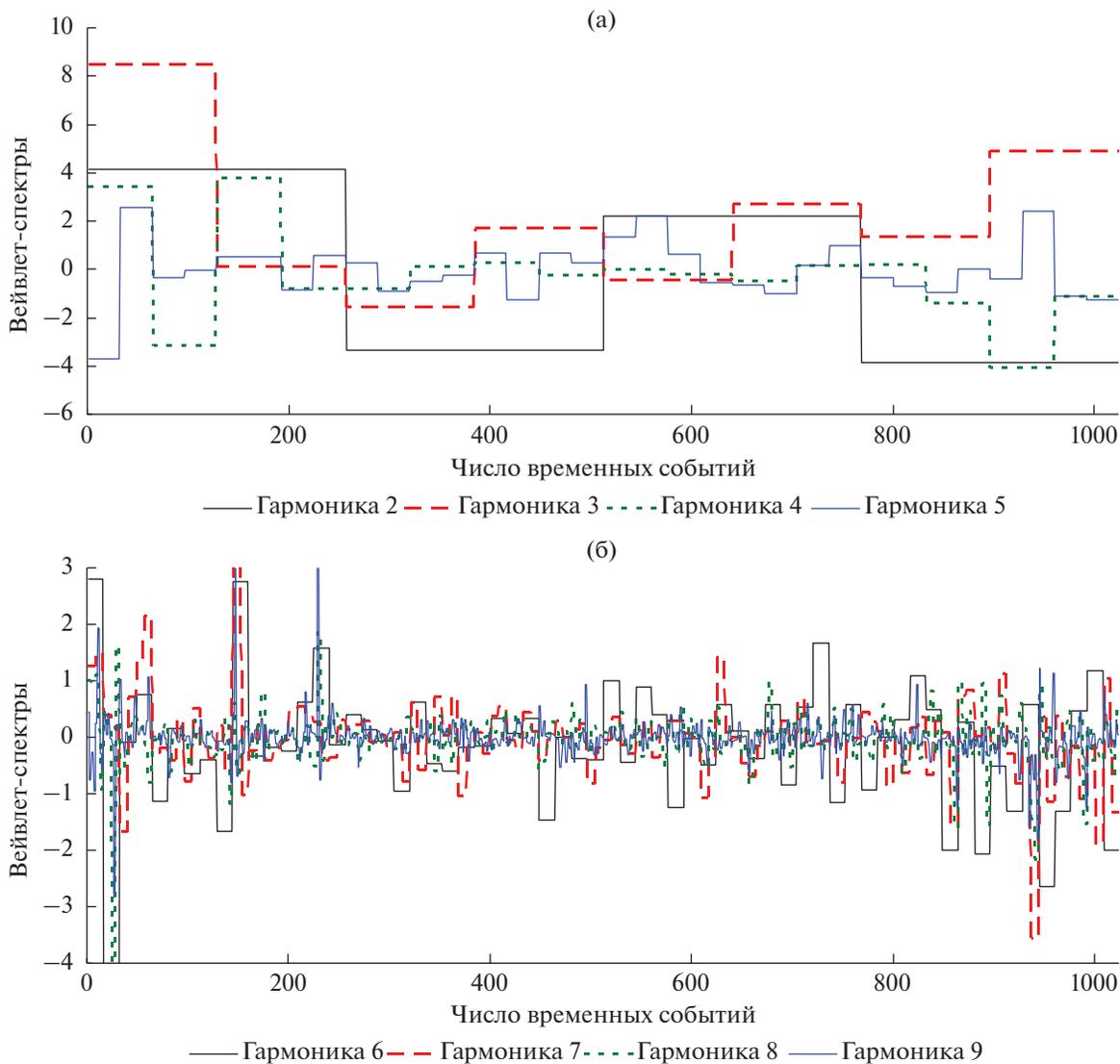


Рис. 3. Вычисленные вейвлет-спектры для измеренного временного бета-фона: (а) низких частот; (б) высоких частот.

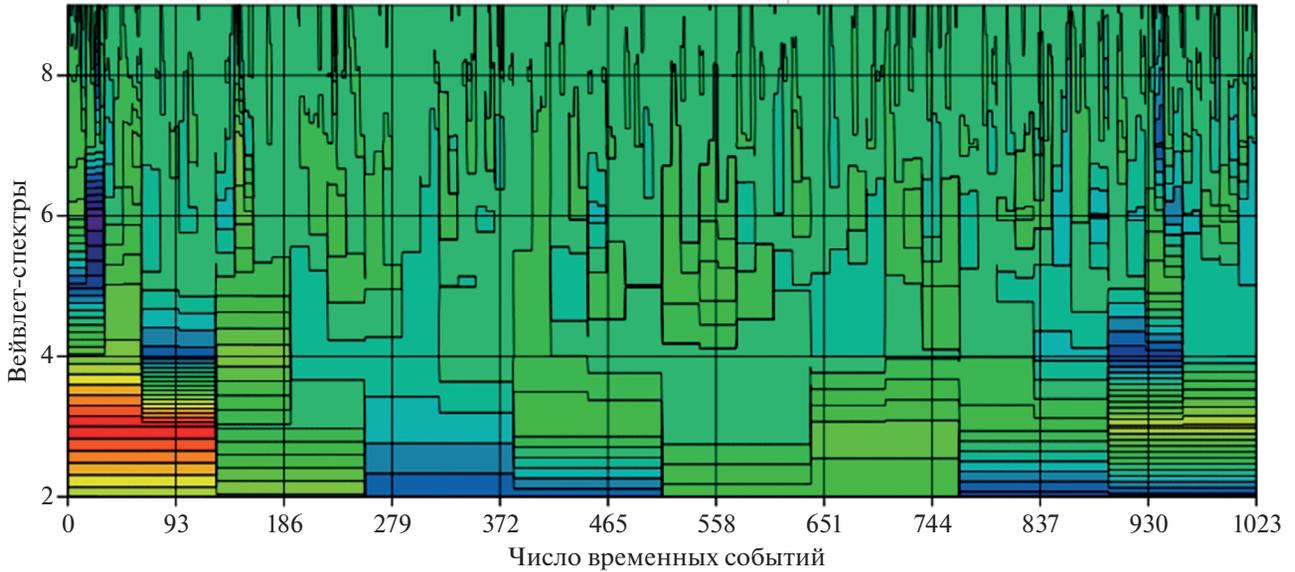


Рис. 4. Полный вейвлет-спектр для измеренного временного бета-фона.

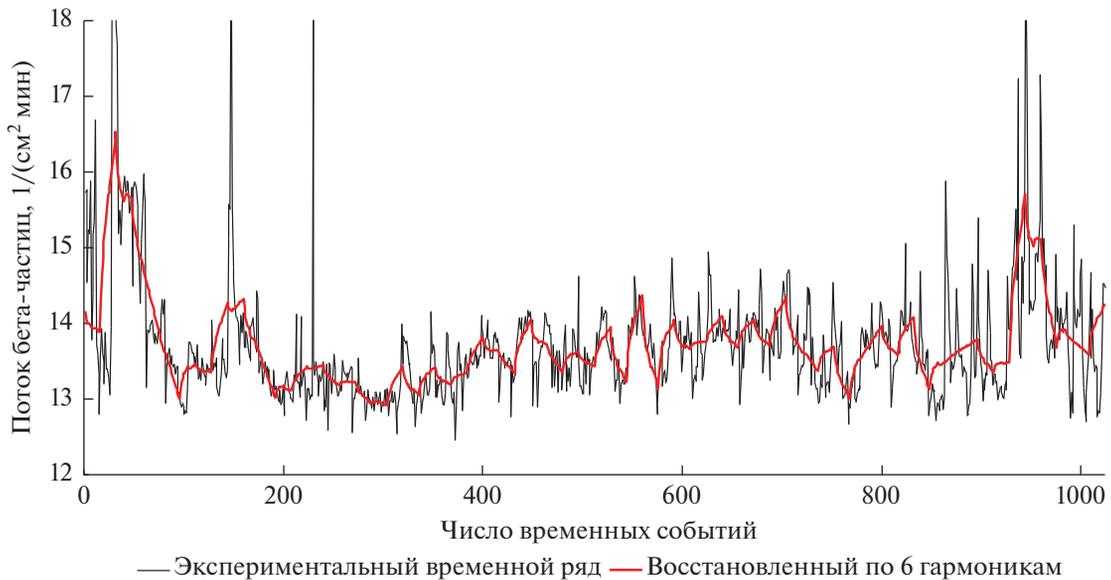


Рис. 5. Экспериментальный и теоретический временные ряды бета-фона для 6-ти гармоник.

$$W_S(a, b) = S(t)\psi_{ab}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{\infty} S(t)\psi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt, \quad (2)$$

и для обратного

$$S(t) = \frac{1}{C_\psi} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} W_S(a, b)\psi_{ab}(t) \frac{dadb}{a^2}, \quad (3)$$

где C_ψ – нормирующий коэффициент

$$C_\psi = \int_{-\infty}^{\infty} |\psi(\omega)|^2 |\omega|^{-1} d\omega < \infty. \quad (4)$$

Из (2) следует, что вейвлет-спектр $W_S(a, b)$ (масштабно-временной спектр) в отличие от фурье-спектра является функцией двух аргументов: первый аргумент a (временной масштаб) аналогичен периоду осцилляций, то есть обратен частоте, а второй b – аналогичен смещению сигнала по оси времени. Следует отметить, что $W_S(b, a_0)$ характеризует временную зависимость (при $a = a_0$), тогда как зависимости $W_S(a, b_0)$ можно поставить в соответствие частотную зависимость (при $b = b_0$).

В результате выполненных расчетов вейвлет-преобразования получены вейвлет-спектры (рис. 3) в зависимости от числа учитываемых гармоник.

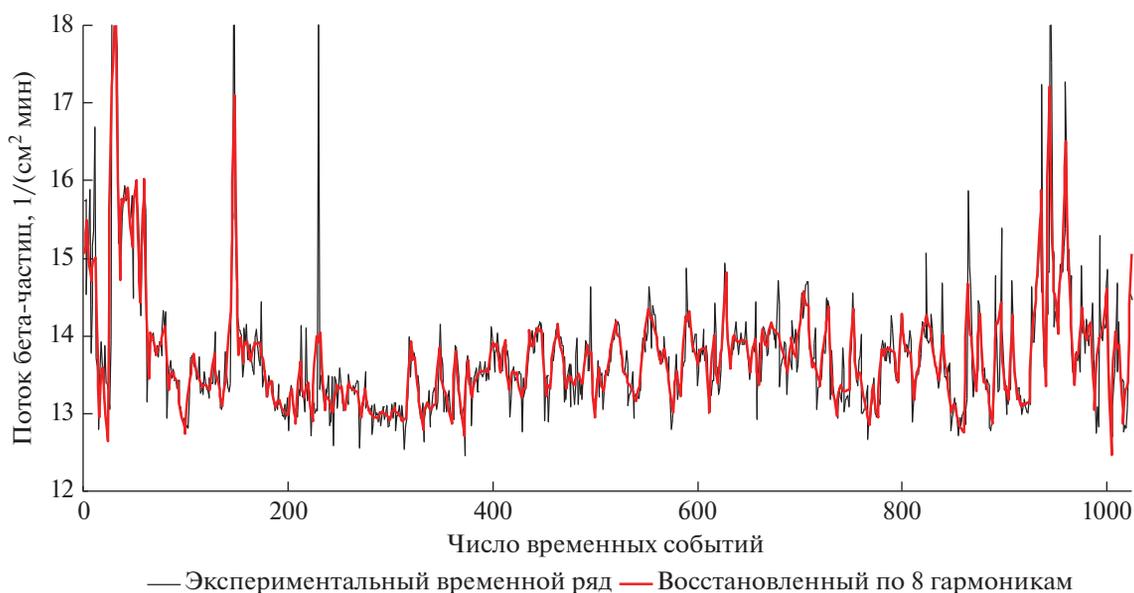


Рис. 6. Экспериментальный и теоретический временные ряды бета-фона для 8-и гармоник.

На рис. 4 представлен полный вейвлет-спектр для измеренного временного бета-фона. С помощью вычисленных вейвлет-спектров можно восстановить временную вариацию бета-фона по (3) с использованием нужного набора вейвлет-спектров для выявления интересующего временного события. На рис. 5–6 показано восстановление временной вариации при использовании 6 и 8 вейвлет-спектров, соответственно.

Из полученных результатов видно, что временные вариации природной бета-активности довольно точно воспроизводятся с помощью вейвлет-анализа, учитывающего от 6 и более гармоник. С увеличением числа гармоник точность совпадения теории с экспериментом возрастает, что позволяет полученную временную сцену распространить на будущие временные отрезки с целью, например, оценить интегральную дозу, получаемую отдельными когортами населения (персонал, населения).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в настоящей работе выполнены долговременные прецизионные измерения временных вариаций эманаций бета-частиц из литосферы Земли. Обращено особое внимание на возможность использования полученных результатов для оценки дозиметрического вклада в общее облучение, получаемое персоналом и населением в результате облучения естественными бета-радионуклидами. Разработана методика восстановления вейвлет-спектров путем оптимизации значений вейвлет-коэффициентов, получаемых из стандартного вейвлет-анализа. Показано, что точность получаемых вейвлет-спектров существенно зави-

сит от числа учитываемых вейвлет-гармоник с оптимизацией вейвлет-коэффициентов более шести. Такая точность воспроизведения экспериментальных данных позволяет распространить реально измеренные вариации эманации бета-частиц на любые интервалы времени с целью прогноза доз получаемых от распада радона и его ДПР и оценки рисков онкозаболеваемости как персонала, так и населения в целом.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполняется при поддержке государственного грантового финансирования фундаментальных научных исследований (проекты № ИРН АР09058404, АР09258978, АР05131884).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ/REFERENCES

1. *Lecomte J.F., Solomon S., Takala J., et al.* // Ann. ICRP. 2014. V. 43. No. 3. P. 5–73.
2. *Ярмошенко И.В., Курдин И.А., Жуковский М.В., Астраханцева С.Ю.* // Медицинская радиология и радиационная безопасность. 2003. Т. 48. № 5. С. 33–43.
3. *Dyachkov V.V., Zaripova Yu.A., Yushkov A.V., Shakirov A.L., Bigeldiyeva M.T., Dyussebayeva K.S., Abramov K.E.* // Phys. Sci. Technol. 2017. V. 4. No. 1. P. 20–26.
4. *Дьячков В.В., Бияшева З.М., Исмагулова Д.А., Нукетай А.Б., Зарипова Ю.А., Шакиров А.Л., Юшков А.В.* // Вестник. Сер. физ. Т. 70. № 3. С. 23–28.
5. Защита от радона-222 в жилых зданиях и на рабочих местах. Публикация 65 МКРЗ. Пер с англ. 1995. Москва: Энергоатомиздат.

6. Риск заболевания раком легких в связи с облучением дочерними продуктами распада радона внутри помещений: Публикация 50 МКРЗ. Пер с англ. 1992. Москва: Энергоатомиздат.
7. 2012 IARC Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans // IARC. 2012. Vol. 100D: Radiation.
8. The World Health Organization (WHO). WHO Handbook on Indoor Radon. 2009. http://whqlibdoc.who.int/publications/2009/9789241547673_eng.pdf.
9. Tirmarche M., Harrison J.D., Laurier D., et al. // Ann. ICRP. 2010. V. 40. No. 1. P. 1–64.
10. Rolle R. // Am. Ind. Hyg. Assoc. J. 1969. V. 30. No. 2. P. 153–160.
11. Thomas J.W. // Health Phys. 1972. V. 23. No. 6. P. 783–789.
12. Markov K.P., Ryabov N.V., Stas K.N. // Sov. J. At. Energy. 1962. V. 12. P. 333–337.
13. Yushkov A.V., Dyachkov V.V., Zaripova Yu.A. // Bull. Russ. Acad. Sci.: Phys. 2020. V. 84. No. 10. P. 1183–1186.
14. Amgarou K., Font L., Baixeras C. // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A. 2003. V. 506. Nos. 1–2. P. 186–198.
15. Misdaq M.A., Ouguidi J. // J. Radioanal. Nucl. Chem. 2010. V. 287. P. 135–150.
16. Dyachkov V.V., Zaripova Yu.A., Yushkov A.V., Shakirov A.L., Bigeldiyeva M.T., Dyussebayeva K.S., Abramov K.E. // Phys. Sci. Technol. 2019. V. 6. No. 1. P. 11–17.
17. Zaripova Yu.A., Dyachkov V.V., Yushkov A.V. // Phys. At. Nucl. 2019. V. 82. No. 12. P. 1597–1601.
18. Dyachkov V.V., Zaripova Yu.A., Yushkov A.V., Shakirov A.L., Biyasheva Z.M., Bigeldiyeva M.T., Dyussebayeva K.S., Abramov K.E. // Phys. At. Nucl. 2018. V. 81. No. 10. P. 1509–1514.
19. Барановская Н.В., Игнатова Т.Н., Рихванов Л.П. // Вестник Томского государственного университета. 2010. No. 339. С. 182–188.
20. Яковлев А.Н. Введение в вейвлет-преобразования. 2003. Новосибирск: Изд-во НГТУ.

Methods for Measuring Daughter Products of Radon Decay in the Surface Atmospheric Layer of the Earth

V. V. Dyachkov^{1, 2, *}, Yu. A. Zaripova^{1, 2}, A. V. Yushkov^{1, 2}, A. L. Shakirov^{1, 2},
M. T. Bigeldiyeva¹, A. A. Medeubayeva², and A. E. Stvayeva²

¹National Nanotechnology Laboratory of Open Type, Almaty, 050040 Republic of Kazakhstan

²Al-Farabi KazNU, Almaty, 050040 Republic of Kazakhstan

*e-mail: slava_kpss@mail.ru

Received October 31, 2020; revised November 9, 2020; accepted November 10, 2020

At present, an actual problem is the study of temporal variations of various nuclear radiation from the lithosphere in foothill and desert landscapes. This refers to the fluxes of neutrons, gamma quanta, beta particles and emanations of heavy chemical elements. The problem of studying such distributions in the surface atmospheric layer of the Earth remains relevant, due to the fact that they are concentrated in the human environment and have a direct impact on the health of the population. This work is devoted to the study of beta-spectra of the natural radiation background in the surface atmospheric layer of the Earth. The origin of the measured beta spectra is associated with the daughter products of the decay of radon isotopes Rn-219, Rn-220, Rn-222 in three natural radioactive series. The spectra were measured from October 2018 to October 2019 in the foothills of the Zailiysky Alatau Tien Shan in Almaty. The frequency of measurements averaged about 10 measurements per day with an exposure of at least 2000 s. A database of daily, seasonal and annual variations in beta spectra has been accumulated. For the analysis of the data obtained, a special software “Analyzer of the Beta Spectra Array” was developed, which made it possible to process the standard output files of the “Sputnik” spectrometric installation and to integrate each spectrum in a given time interval. Time variation over the measured period was described using a standard mathematical computer package for wavelet analysis. The wavelet spectra obtained as a result of integration are used to identify daily, seasonal, and annual effects in variations of beta emanations. Along with this, similar mathematical processing was carried out to predict the impact of external factors in temporal variations of beta particles.

Keywords: daughter products of radon decay, beta spectra, natural radionuclides, wavelet analysis, variations in natural background radiation