

УДК 551.521.6

ОЦЕНКА ВКЛАДА КОСМИЧЕСКОЙ КОМПОНЕНТЫ В СУММАРНЫЙ β - И γ - ФОН ПРИЗЕМНОЙ АТМОСФЕРЫ

А. С. Зелинский, В. С. Яковлева

Томский политехнический университет, 634050, Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30
E-mail: vsyakovleva@tpu.ru

Представлены результаты моделирования в среде Geant4 характеристик атмосферных полей γ - и β -излучений, формирующихся при прохождении первичных космических лучей через атмосферы Земли. Оценки плотности потоков γ - и β -излучений с энергиями 50 кэВ–3 МэВ, формирующихся галактическим космическим излучением в приземной атмосфере составили около 33 и 1.5 м⁻²с⁻¹, соответственно, что существенно ниже потоков, которые формируются почвенными и атмосферными радионуклидами. Получено, что вклад космической компоненты в суммарный γ - и β -фон приземной атмосферы на высотах около 50 м от земной поверхности составляет всего лишь около 0.06% и 1.14%, соответственно. В работе также был исследован барометрический эффект в различных диапазонах энергий фотонов и электронов.

Ключевые слова: моделирование, космическое излучение, ионизирующее излучение, приземная атмосфера, давление, барометрический эффект, Geant4

© Зелинский А. С., Яковлева В. С., 2017

MSC 78A10

THE ESTIMATION OF COSMIC RAY COMPONENT CONTRIBUTION INTO THE TOTAL β - AND γ -BACKGROUND OF ATMOSPHERE

A. S. Zelinskii, V. S. Yakovleva

National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia
E-mail: vsyakovleva@tpu.ru

Simulation results of characteristics of atmospheric γ - and β -radiation fields, which are produced by primary cosmic rays when overcoming an Earth's atmospheres, with using Geant4 are presented. Estimates of γ - and β -radiation flux density with energies of 50 keV–3 MeV formed in ground atmosphere by cosmic radiation are 33 and 1.5 m⁻² s⁻¹, approximately, that is significantly lower than that formed by soil and atmospheric radionuclides. It was received that the contribution of cosmic component into the total γ - and β -background of the ground atmosphere at the heights of about 50 m from the land surface is only about 0.06 % and 1.14 %, respectively. The barometric effect within various ranges of energies of photons and electrons was also investigated in the work.

Key words: simulation, cosmic radiation, ionizing radiation, ground atmosphere, pressure, barometric effect, Geant4

© Zelinskii A. S., Yakovleva V. S., 2017

Введение

Изучение динамики радиационного фона приземной атмосферы проводят практически во всех странах в рамках государственных программ и научных исследований [1–4]. Атмосферные поля ионизирующих излучений (ИИ) являются отражением, как текущего состояния атмосферы, так и состояния системы «литосфера-атмосфера-ионосфера-космос» в целом. Суммарный атмосферный радиационный фон складывается из разных компонент: атмосферные и почвенные радионуклиды, космическая радиация. Оценка вклада этих компонент в суммарный радиационный фон является глобальной задачей.

Частицы, испускаемые Солнцем называют солнечными космическими лучами (СКЛ). Возрастание солнечного космического излучения в виде нерегулярных всплесков в результате вспышек на Солнце сопровождается образованием интенсивных потоков протонов (примерно 90%). Частота появления СКЛ, вызванных такими событиями, коррелирует с уровнем солнечной активности: в годы максимума солнечной активности регистрируется примерно 10 событий в год, а в годы минимума до одного или более. Верхний предел энергии СКЛ не установлен, однако имеются данные о регистрации СКЛ с энергией несколько десятков ГэВ. Заряженные частицы первичного космического излучения (ПКИ) галактического и солнечного происхождения, энергия которых составляет от единиц кэВ до сотен ГэВ, прежде чем попасть на поверхность Земли распространяются через магнитосферу Земли, проходят большой слой атмосферы, взаимодействуя с ядрами которой генерируют вторичное космическое излучение (ВКИ) различных типов частиц и различных вариаций межпланетного, магнитосферного и атмосферного происхождений.

Вопросы формирования атмосферных полей ИИ, обусловленных радиоактивным распадом радионуклидов, содержащихся в грунте и приземной атмосфере, были детально рассмотрены в работах [4–7]. Численные исследования переноса первичного космического излучения через атмосферу Земли для β - и γ -компонент в приземной атмосфере произведены в работе [8]. Однако, в научной литературе отсутствуют оценки плотности потоков фотонов и электронов ВКИ в диапазонах низких энергий (0.05–3.5 МэВ) на высотах до 50 м (на глубине атмосферы порядка 1030 г/см²) от земной поверхности. Эти данные очень важны для оценок вкладов различных компонент, как в суммарные поля ИИ, так и в показания приборов мониторинга наземного радиационного фона, которые по общепринятым нормам располагают на уровне 1 м от земной поверхности.

Целью настоящей работы являлось моделирование прохождения ПКИ через атмосферу Земли с учетом сезона года, с последующими оценками вклада космической компоненты в суммарный γ - и β -фон приземной атмосферы, а также оценками величины барометрического эффекта.

Моделирование ПКИ и ВКИ

Моделирование прохождения элементарных частиц через атмосферу Земли производили с использованием метода Монте-Карло в среде Geant4 [9]. Для создания модели атмосферы была выбрана кубическая геометрия. Схема численного эксперимента представлена на рис. 1. Нижний приземный слой атмосферы задавали толщиной 200 м, толщина каждого из последующих слоев составляла 100 м.

Плотность атмосферы в нижнем слое задавали согласно характерному для определенного сезона года и для 60° с.ш. значению. Выбор широты обусловлен необходимостью дальнейшего сопоставления расчетных и экспериментальных данных, полученных в Томской обсерватории радиоактивности и ионизирующих излучений (ТОРИИ) [10], которая размещена на $56^\circ 29'$. В итоге для летнего и зимнего сезонов года плотность приземной атмосферы брали равной 1.23 и 1.36 г/см³, соответственно. В длинах пробега частиц эти значения соответствуют 24.6 и 27 г/см². Плотность последующих слоев изменяли по градиенту с убыванием от нижнего к верхнему.

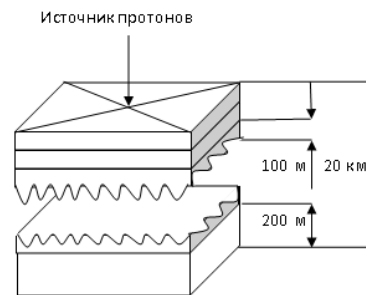


Рис. 1. Геометрия численного эксперимента

Модельный источник частиц задавался на границе атмосферного столба воздуха в виде точечного источника протонов со спектром, соответствующим стандарту [11]. Данный стандарт учитывает количество солнечных пятен (среднемесячных чисел Вольфа) и годовые циклы, поэтому, для оценки барометрического эффекта независимо от спектра ПКИ использовали только один модельный источник с параметрами, рассчитанными на декабрь 2016. В этом случае рассчитанная средняя энергия спектра протонов изменяется в диапазоне 2.6 – 4.5 ГэВ, а плотность потока протонов изменяется в диапазоне 1393 – 3580 частиц $\text{с}^{-1} \text{м}^{-2}$.

Общая длина пути, преодолеваемого ПКИ и ВКИ до уровня моря, была рассчитана согласно рекомендациям [12], и составила для летнего и зимнего сезонов 1031.41 и 1033.35 г/см², соответственно, что не значительно отличается от оценки 1030 г/см², полученной в работе [13]. Для оценки барометрического эффекта использовали рассчитанную разницу давлений в зимний и летний сезоны года, которая составила 2.8 мбар.

Результаты и их обсуждение

Полученные спектры ВКИ на высоте 50 м от земной поверхности для двух сезонов года приведены на рис. 2 а и б.

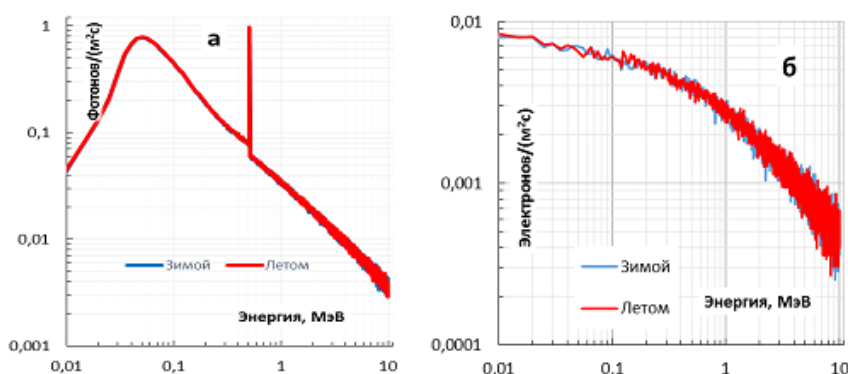


Рис. 2. Рассчитанные спектры фотонов и электронов

На рис. 2а представлен спектр гамма-излучения в летний сезон (красным цветом) и зимний сезон (синим цветом). На рис. 2б представлен спектр бета-излучения.

Плотность потока ВКИ, состоящего из электронов и фотонов, летом значительно выше, чем зимой. Анализ данных численных экспериментов показал, что при возрастании энергии ВКИ от 0.1 МэВ и выше плотность потока излучения падает, а пики плотности потока фотонного излучения приходятся на 0.05 и 0.5 МэВ, и составляют 0.8 и 1 фотон/(м²с), соответственно. Полученные пики космического излучения повторяют пики, полученные экспериментальным способом в работе [2].

Рассчитанные плотности потоков β - и γ -излучений, а также барометрические коэффициенты, в зависимости от средней энергии ПКЛ и сезона года, приведены в таблице.

Таблица

Плотность потока β и γ -излучений и барометрические коэффициенты в зависимости от средней энергии ПКЛ и сезона года

Энергия излучения, МэВ	Плотность потока, частиц/(м ² с)				Барометрические коэффициенты для лета и зимы, %/мБар		
	Летом		Зимой		Электроны	Фотоны	Электроны и фотоны
	Электроны	Фотоны	Электроны	Фотоны			
0.02-0.1	0.106	9.178	0.106	9.094	-0.19	-0.33	-0.33
0.1-0.2	0.114	5.900	0.112	5.855	-0.53	-0.27	-0.27
0.2-1	0.608	12.583	0.603	12.471	-0.29	-0.32	-0.32
0.05-3	1.558	33.074	1.543	32.784	-0.35	-0.32	-0.32
0.15-3	1.437	23.106	1.423	22.902	-0.34	-0.32	-0.32
0.5-3	1.107	13.770	1.094	13.651	-0.42	-0.31	-0.32
1-3	0.772	8.109	0.764	8.038	-0.39	-0.31	-0.32
1-10	1.850	17.308	1.837	17.138	-0.27	-0.35	-0.34
3-10	1.079	9.202	1.073	9.102	-0.19	-0.39	-0.37
>3	3.068	20.808	3.032	20.541	-0.43	-0.46	-0.46
>10	1.989	11.608	1.959	11.440	-0.56	-0.52	-0.52
0-3ГэВ	4.708	56.889	4.656	56.305	-0.40	-0.37	-0.37

Также для наглядности барометрический эффект для гамма-излучения с энергиями до 1 ГэВ показан на рис. 3.

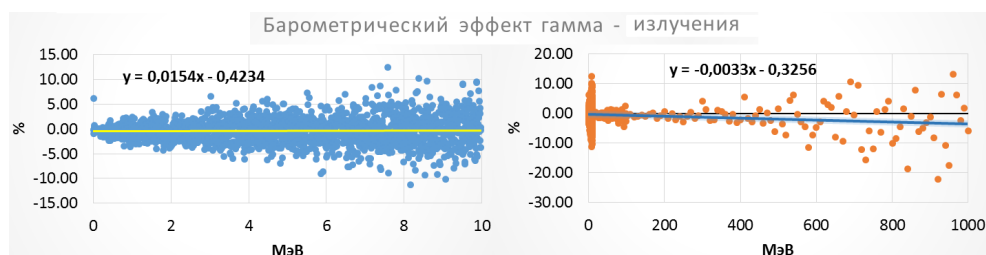


Рис. 3. Барометрический эффект для гамма-излучения с энергиями до 1 ГэВ

Как видно из таблицы с ростом давления и сменой летнего сезона на зимний наблюдается снижение плотности потока β - и γ -излучений. Для γ -излучения с энергией до 10 МэВ барометрический эффект находится в диапазоне от |0.3| до |0.4| %/мБар. Для β - частиц с энергией до 10 МэВ барометрический эффект находится в диапазоне от |0.2| до |0.5| %/мБар. Начиная с энергии 1 МэВ суммарный барометрический эффект растет с ростом энергии фотонов и электронов. Данное свойство было обнаружено ранее для нейтронной компоненты космических лучей в работе [14].

Результаты численных экспериментов показали хорошую сходимость с экспериментальными данными [3] для области высоких энергий >10 МэВ, и разошлись в области низких энергий, что может объясняться влиянием условий измерения. Вернемся к вопросу формирования полей ионизирующих излучений приземной атмосферы и произведем оценку вкладов различных компонент (почвенные и атмосферные радионуклиды, космическое излучение), как суммарный γ - и β -фон приземной атмосферы, так и в показания приборов, используемых для контроля радиационной обстановки (КРО). Практически все детекторы γ -излучений (газоразрядные, сцинтилляционные), предназначенные для КРО, имеют рабочий диапазон 50 кэВ–3 МэВ. Газоразрядные счетчики регистрируют β -излучение в диапазоне 500 кэВ–3 МэВ, а сцинтилляционные — 155 кэВ–3.5 МэВ. Полученные оценки плотности потоков γ - и β -излучений с энергиями 50 кэВ–3 МэВ, формирующихся галактическим космическим излучением в приземной атмосфере, составили около 33 и $1.5 \text{ м}^{-2}\text{с}^{-1}$, соответственно (табл.). Плотности потоков γ - и β -излучений, которые формируются почвенными и атмосферными радионуклидами, составили, по результатам расчетов [4, 6] около $54070 \text{ м}^{-2}\text{с}^{-1}$ и $130 \text{ м}^{-2}\text{с}^{-1}$, соответственно. В итоге получаем, что вклад космической компоненты в суммарный γ - и β -фон приземной атмосферы на высотах около 50 м от земной поверхности составляет, в среднем, около 0.06% и 1.14%, соответственно.

В итоге, можно сделать вывод, что вклад ВКИ в суммарный γ - и β -фон приземной атмосферы ничтожен, и им можно пренебречь при анализе данных радиационного мониторинга.

Заключение

1. Полученные расчетные данные хорошо согласуются с данными экспериментов других авторов.

2. Сезонные изменения давления влияют на плотность потока β и γ -излучений во всех диапазонах энергий. Такие изменения, по расчетам, могут достигать для суммарного потока до $|0.52\%/м\text{Бар}|$. Начиная с энергии 1 МэВ суммарный барометрический эффект растет с ростом энергии фотонов и электронов.

3. Оценки плотности потоков β и γ -излучений с энергиями 50 кэВ–3 МэВ, формирующихся галактическим космическим излучением в приземной атмосфере составили около 33 и $1.5 \text{ м}^{-2}\text{с}^{-1}$, соответственно. Вклад космической компоненты в суммарный β и γ -фон приземной атмосферы на высотах около 50 м от земной поверхности составляет около 0.06% и 1.14%, соответственно.

Список литературы

- [1] Адегбулугбе С. К., *Исследование динамики радиационного фона приземной атмосферы*, магистерская дис., Томск, 2017, 98 с. [Adegbulugbe S. K., *Issledovanie dinamiki radiatsionnogo fona prizemnoy atmosfery*, masterskaya dis., Tomsk, 2017, 98 pp.]
- [2] Mitchell A.L., Kouzes R.T., Borgardt J.D., *Skyshine Contribution to Gamma Ray Background Between 0 and 4 MeV*, Washington, 2009, 27 http://www.pnl.gov/main/publications/external/technical_reports/PNNL-18666.pdf pp.
- [3] Балабин Ю.В., Германенко А.В., Гвоздевский Б.Б., Вашенюк Э.В., “Особенности вариации гамма-излучения во время осадков”, *Physics of Auroral phenomena*, 35th annual seminar, KSC RAS, Apatity, 2012, 143–146. [Balabin Yu.V., Germanenko A.V., Gvozdevskiy

- B.B., Vashenyuk E.V., "Osobennosti variatsii gamma-izlucheniya vo vremya osadkov", *Physics of Auroral phenomena*, 35th annual seminar, KSC RAS, Apatity, 2012, 143–146].
- [4] Яковлева В.С., Нагорский П.М., Черепнев М.С., "Формирование α -, β - и γ -полей приземной атмосферы природными атмосферными радионуклидами", *Вестник КРАУНЦ. Физ.-мат. науки*, 2014, № 1(8), 86-96. [Yakovleva V.S., Nagorskiy P.M., Cherepnev M.S., "Formirovanie α -, β - i γ -poley prizemnoy atmosfery prirodnyimi atmosferynymi radionuklidami", *Vestnik KRAUNTs. Fiz.-mat. nauki*, 2014, № 1(8), 86-96].
- [5] Яковлева В.С., Нагорский П.М., Яковлев Г.А., "Метод мониторинга плотности невозмущенного потока радона с поверхности грунта", *Вестник КРАУНЦ. Физ.-мат. науки*, 2016, № 1(12), 85–93. [Yakovleva V.S., Nagorskiy P.M., Yakovlev G.A., "Metod monitoringa plotnosti nevozmushchennogo potoka radona s poverkhnosti grunta", *Vestnik KRAUNTs. Fiz.-mat. nauki*, 2016, № 1(12), 85–93].
- [6] Яковлева В.С., Каратаев В.Д., Зукау В.В., "Моделирование атмосферных полей γ - и β -излучений, формирующихся почвенными радионуклидами", *Вестник КРАУНЦ. Физико-математические науки*, 2011, № 1(2), 64–73. [Yakovleva V.S., Karataev V.D., Zukau V.V., "Modelirovanie atmosferynykh poley γ - i β -izlucheniya, formiruuyushchikhsya pochvennymi radionuklidami", *Vestnik KRAUNTs. Fiziko-matematicheskie nauki*, 2011, № 1(2), 64–73].
- [7] Яковлева В.С., Нагорский П.М., Зукау В.В., Лужанчук Я.В., "Модель вертикального распределения плотности плазмы приземной атмосферы", *Известия вузов. Физика*, **53**:11/2 (2010), 86–88. [Yakovleva V.S., Nagorskiy P.M., Zukau V.V., Luzhanchuk Ya.V., "Model' vertikal'nogo raspredeleniya plotnosti plazmy prizemnoy atmosfery", *Izvestiya vuzov. Fizika*, **53**:11/2 (2010), 86–88].
- [8] Маурчев Е.А., Балабин Ю.В., Вашенюк Э.В., Гвоздевский Б.Б., "Моделирование прохождения галактических космических лучей через атмосферу", *Наука и образование – 2012*, междунар. науч.-техн. конф. (Мурманск, 2 - 6 апреля 2012 г.), 92-96. [Maurchev E.A., Balabin Yu.V., Vashenyuk E.V., Gvozdevskiy B. B., "Modelirovanie prokhozhdeniya galakticheskikh kosmicheskikh luchey cherez atmosferu", *Nauka i obrazovanie – 2012*, mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. (Murmansk, 2 - 6 aprelya 2012 g.), 92-96].
- [9] *Geant4* <http://geant4.cern.ch>.
- [10] *ТОРИИ* <http://portal.tpu.ru/portal/page/portal/torii/achievement>. [*TORII* <http://portal.tpu.ru/portal/page/portal/torii/achievement>].
- [11] *ГОСТ 25645.150-90 Модель изменения потоков частиц*, ГОСУДАРСТВЕННЫЙ СТАНДАРТ СОЮЗА ССР ЛУЧИ КОСМИЧЕСКИЕ ГАЛАКТИЧЕСКИЕ, Издательство стандартов, М., 1991, 11 с. [*GOST 25645.150-90 Model' izmeneniya potokov chastits*, GOSUDARSTVENNYY STANDART SOYUZA SSR LUCHI KOSMICHESKIE GALAKTICHESKIE, Izdatel'stvo standartov, M., 1991, 11 pp.]
- [12] *ГОСТ 24631-81 ГОСУДАРСТВЕННЫЙ СТАНДАРТ СОЮЗА ССР АТМОСФЕРЫ СПРАВОЧНЫЕ ПАРАМЕТРЫ*, Издательство стандартов, М., 1982, 33 с. [*GOST 24631-81 GOSUDARSTVENNYY STANDART SOYUZA SSR ATMOSFERY SPRAVOCHNYE PARAMETRY*, Izdatel'stvo standartov, M., 1982, 33 pp.]
- [13] *Ядерная физика в Интернете* <http://nuclphys.sinp.msu.ru/p/pp268-285.pdf>. [*Yadernaya fizika v Internete* <http://nuclphys.sinp.msu.ru/p/pp268-285.pdf>].
- [14] Янчуковский В.Ф., *Геофизические эффекты космических лучей и экспериментальные методы их исследования*, автореф. дис. д-ра физ.-мат. наук, Новосибирск, 2008, 38 с. [Yanchukovskiy V.F., *Geofizicheskie efekty kosmicheskikh luchey i eksperimental'nye metody ikh issledovaniya*, avtoref. dis. d-ra fiz.-mat. nauk, Novosibirsk, 2008, 38 pp.]
- [15] Нагорский П.М., Ипполитов И.И., Смирнов С.В., Яковлева В.С., Каратаев В.Д., Вуколов А.В., Зукау В.В., "Особенности мониторинга радиоактивности в системе «литосфера-атмосфера» по β - и γ -излучениям", *Известия ВУЗов. Физика*, 2010, № 11. [Nagorskiy P.M., Ippolitov I.I., Smirnov S.V., Yakovleva V.S., Karataev V.D., Vukolov A.V., Zukau V.V., "Osobennosti monitoringa radioaktivnosti v sisteme «litosfera-atmosfera» po β - i γ -izlucheniya", *Izvestiya VUZov. Fizika*, 2010, № 11].

Список литературы (ГОСТ)

- [1] Адегбулугбе С.К. Исследование динамики радиационного фона приземной атмосферы: магистерская дис. Томск, 2017. 98с.
- [2] Mitchell A.L., Kouzes R.T., Borgardt J.D. Skyshine Contribution to Gamma Ray Background Between 0 and 4 MeV: Washington, 2009. 27 p. URL: http://www.pnl.gov/main/publications/external/technical_reports/PNNL-18666.pdf (Дата обращения: 26.12.17).
- [3] Балабин Ю.В, Германенко А.В, Гвоздевский Б.Б, Вашенюк Э.В, Особенности вариации гамма-излучения во время осадков // Physics of Auroral phenomena, 35th annual seminar, 2012, KSC RAS, Apatity, P. 143 – 146.
- [4] Яковлева В.С., Нагорский П.М., Черепнев М.С. Формирование α -, β - и γ -полей приземной атмосферы природными атмосферными радионуклидами // Вестник КРАУНЦ. Физ.-мат. науки. 2014. № 1(8). С. 86-96.
- [5] Яковлева В.С., Нагорский П.М, Яковлев. Г.А., Метод мониторинга плотности невозмущенного потока радона с поверхности грунта // Вестник КРАУНЦ. Физ.-мат. науки. 2016. № 1(12). С. 85-93.
- [6] Яковлева В.С., Каратаев В.Д., Зукау В.В. Моделирование атмосферных полей γ - и β -излучений, формирующихся почвенными радионуклидами // Вестник КРАУНЦ. Физико-математические науки. 2011. №1 (2). С. 64–73.
- [7] Яковлева В.С., Нагорский П.М., Зукау В.В., Лужанчук Я.В. Модель вертикального распределения плотности плазмы приземной атмосферы // Известия вузов. Физика. 2010. Т. 53. № 11/2. С. 86–88.
- [8] Маурчев Е.А., Балабин Ю. В., Вашенюк Э. В., Гвоздевский Б. Б., Моделирование прохождения галактических космических лучей через атмосферу // Наука и образование – 2012, материалы междунар. науч.-техн. конф., Мурманск, 2 - 6 апреля 2012 г., С. 92-96.
- [9] Geant4. URL: <http://geant4.cern.ch> (Дата обращения: 26.12.17).
- [10] ТОРИИ. URL: <http://portal.tpu.ru/portal/page/portal/torii/achievement> (Дата обращения: 26.12.17).
- [11] ГОСТ 25645.150-90 Модель изменения потоков частиц ГОСУДАРСТВЕННЫЙ СТАНДАРТ СОЮЗА ССР ЛУЧИ КОСМИЧЕСКИЕ ГАЛАКТИЧЕСКИЕ. М.: Издательство стандартов, 1991. 11 с.
- [12] ГОСТ 24631-81 ГОСУДАРСТВЕННЫЙ СТАНДАРТ СОЮЗА ССР АТМОСФЕРЫ СПРАВОЧНЫЕ ПАРАМЕТРЫ. М.: Издательство стандартов, 1982. 33 с.
- [13] Ядерная физика в Интернете. URL: <http://nuclphys.sinp.msu.ru/p/pp268-285.pdf> (Дата обращения: 13.03.17).
- [14] Янчуковский В. Ф. Геофизические эффекты космических лучей и экспериментальные методы их исследования: автореф. дис. д-ра физ.-мат. наук. Новосибирск, 2008. 38 с.
- [15] Нагорский П.М., Ипполитов И.И., Смирнов С.В., Яковлева В.С., Каратаев В.Д., Вуколов А.В., Зукау В.В. Особенности мониторинга радиоактивности в системе «литосфера-атмосфера» по β - и γ -излучениям // Известия ВУЗов. Физика. 2010. № 11.

Для цитирования: Зелинский А. С., Яковлева В. С. Оценка вклада космической компоненты в суммарный β - и γ - фон приземной атмосферы // *Вестник КРАУНЦ. Физ.-мат. науки.* 2017. № 4(20). С. 28-34. DOI: 10.18454/2079-6641-2017-20-4-28-34

For citation: Zelinskii A. S., Yakovleva V. S. The estimation of cosmic ray component contribution into the total β - and γ - background of atmosphere, *Vestnik KRAUNC. Fiz.-mat. nauki.* 2017, **20**: 4, 28-34. DOI: 10.18454/2079-6641-2017-20-4-28-34