

УДК 551.510:539.165/166

МОДЕЛИРОВАНИЕ АТМОСФЕРНЫХ ПОЛЕЙ γ - И β - ИЗЛУЧЕНИЙ, ФОРМИРУЮЩИХСЯ ПОЧВЕННЫМИ РАДИОНУКЛИДАМИ*

В.С. Яковлева, В.Д. Каратаев, В.В. Зукау

Томский политехнический университет, 634050, г. Томск, ул. Ленина, 36

E-mail: jak@interact.phtd.tpu.ru, vsyakovleva@tpu.ru

Представлены результаты моделирования характеристик атмосферных полей γ - и β -излучений, обусловленных радиоактивным распадом почвенных радионуклидов. Моделирование проведено с использованием метода Монте-Карло. Учтено вторичное излучение и каскадный характер взаимодействия излучения с воздухом. Детально обсуждаются особенности в вертикальных распределениях поглощенных доз и плотностей потоков γ - и β - излучений в приземной атмосфере.

Ключевые слова: ионизирующее излучение, атмосфера, грунт, радионуклид, метод Монте-Карло

© Яковлева В.С., Каратаев В.Д., Зукау В.В., 2011

MSC 81V35

SIMULATION OF ATMOSPHERIC GAMMA- AND BETA-RADIATIONS FIELDS FORMED BY SOIL RADIONUCLIDES

V.S. Yakovleva, V.D. Karataev, V.V. Zukau

Tomsk Polytechnic University, 634050, c. Tomsk, Lenina st., 36, Russia

E-mail: jak@interact.phtd.tpu.ru, vsyakovleva@tpu.ru

The results of simulation of characteristics of atmospheric γ - and β -radiation fields due to radioactive decay of soil radionuclides are represented. Monte-Carlo method was used for simulation. Secondary radiation and cascade nature of radiation interaction with air were taking into account. Features in vertical profiles of γ - and β - radiation absorbed doses and flux densities in ground atmosphere are discussed in detail.

Key words: ionizing radiation, atmosphere, soil, radionuclide, Monte-Carlo method

© Yakovleva V.S., Karataev V.D., Zukau V.V. , 2011

*Работа выполнена при поддержке гранта АВЦП «РНПВШ» № 2.1.1/544.

Введение

Контроль уровней γ -фона в приземной атмосфере производят в рамках Закона «О радиационной безопасности населения». Этот вид контроля с 1995 г. осуществляется в рамках единой государственной автоматизированной системы контроля радиационной обстановки и преследует основную цель – выявление техногенных радиоактивных загрязнений атмосферы. Однако радиационный фон приземной атмосферы складывается не только гамма, но и другими видами ионизирующего излучения (ИИ), контролю которых, в настоящее время, не уделяется должного внимания.

Атмосферные поля ИИ представляют особый интерес в таких областях, как радиоэкология и радиобиология – для оценок малых (фоновых) доз облучения населения и окружающей среды, а также физика атмосферы – для оценок плотности ионизации приземной атмосферы. Расшифровка результатов наблюдений за радиационным фоном приземной атмосферы [1-3] является сложной задачей, которую трудно решить без привлечения моделирования переноса ИИ, создаваемого почвенными и атмосферными радионуклидами.

В настоящей работе детально рассмотрены перенос γ - и β -излучений почвенных радионуклидов в системе «грунт–атмосфера» и пространственная динамика характеристик создаваемых этим излучением атмосферных полей.

Моделирование γ - и β -фона приземной атмосферы за счет почвенных радионуклидов

Моделирование вертикальных распределений в приземной атмосфере характеристик полей ИИ, создаваемых почвенными радионуклидами (табл. 1), произведено с помощью метода Монте-Карло с использованием разработанной в ТПУ программы PCLab [4, 5]. При моделировании произведен учет вторичного излучения и каскадный характер взаимодействия излучения с воздухом, а также учет векового радиоактивного равновесия между родоначальниками рядов и дочерними продуктами их распада. В качестве характеристик полей ИИ рассмотрены поглощенные дозы и плотности потоков γ - и β -излучений.

На рис. 1 представлена геометрия расчетов. Источник (грунт) и поглощающую среду (воздух) задавали в цилиндрической геометрии.

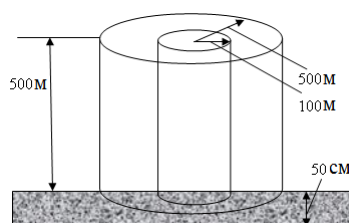


Рис. 1. Геометрия расчетов

Диаметр наружного цилиндра выбран 1 км с учетом проникающей способности фотонов в воздухе. Для избавления от влияния краевых эффектов на конечный результат, расчеты поглощенной дозы и плотности потока ИИ произведены для внутреннего цилиндра диаметром 200 м. Глубина слоя грунта для расчетов выбрана с

учетом результатов моделирования вкладов разных слоев грунта в суммарную дозу в атмосфере (рассмотрено ниже). Все расчеты произведены до высоты 500 м.

С помощью программы PCLab рассчитывали вертикальные распределения характеристик полей ИИ для каждого из радионуклидов (табл. 1). Для удобства быстрого пересчета на реальную удельную активность радионуклидов в грунте, все результаты получены в расчете на единичную активность радионуклидов (1 Бк/кг) и объединены по 5-ти группам (табл. 1).

Таблица 1

Радионуклиды, использованные в моделировании		
Группа 1	Ряд ^{232}Th	^{232}Th , ^{228}Ra , ^{228}Ac , ^{228}Th , ^{224}Ra , ^{220}Rn , ^{216}Po , ^{212}Pb , ^{212}Bi , ^{208}Tl
Группа 2	Ряд ^{238}U	^{238}U , ^{234}Th , ^{234m}Pa , ^{234}Pa , ^{234}U , ^{230}Th , ^{226}Ra , ^{222}Rn , ^{218}Po , ^{214}Pb , ^{214}Bi , ^{214}Po , ^{210}Pb , ^{210}Bi , ^{210}Po
Группа 3	Ряд ^{235}U	^{235}U , ^{231}Th , ^{231}Pa , ^{227}Ac , ^{223}Fr , ^{227}Th , ^{223}Ra , ^{219}Rn , ^{215}Po , ^{211}Pb , ^{211}Bi , ^{207}Tl , ^{211}Po
Группа 4		^{40}K
Группа 5		^{137}Cs

Для расчетов был взят грунт, состав и параметры которого приведены в табл. 2 [4].

Таблица 2

Состав грунта для моделирования			
Элемент	Атомный номер Z	Атомная масса A	Весовая доля %
O	8	16	43,2
Si	14	28,09	20,2
Al	13	27	14,4
C	6	12	10,6
Fe	26	55,85	9,2
H	1	1,008	1,5
Ti	22	47,9	0,7
Mg	12	24,31	0,2

Состав атмосферы для моделирования брали следующий, указанный в табл. 3 [6].

Таблица 3

Состав атмосферы для моделирования			
Элемент	Z	A	W, весовая доля элементов вещества
H	1	1,00	$8,0 \cdot 10^{-7}$
N	7	14,00	0,755
O	8	16,00	0,232
Ne	10	20,18	$1,40 \cdot 10^{-5}$
Ar	18	39,95	$1,92 \cdot 10^{-2}$
Kr	36	83,80	$3,00 \cdot 10^{-6}$
Xe	54	131,29	$4,00 \cdot 10^{-7}$
Rn	86	222,02	$4,50 \cdot 10^{-19}$
Плотность воздуха $1,29 \cdot 10^{-3}$ г/см ³			

Расчеты мощности поглощенной дозы D_γ и плотности потока P_γ γ -излучения производили в диапазоне энергий $\gamma = 0$ –2600 кэВ. Поскольку регистрация атмосферного γ -фона производится, в основном, приборами, основанными на газоразрядных счетчиках, которые имеют нижний порог регистрации γ -излучения – 50 кэВ, расчеты производили так же и при условии $E_\gamma > 50$ кэВ. Нижний порог регистрации газоразрядными счетчиками жесткого β -излучения составляет 500 кэВ, поэтому расчеты производили также для $E_\beta > 500$ кэВ. Активность ^{235}U изотопа урана определяли по известному соотношению $A_{^{235}\text{U}} = A_{^{238}\text{U}}/21$.

На рис. 2 представлены результаты расчетов характеристик атмосферных полей γ - и β -излучений на единичную активность почвенных радионуклидов.

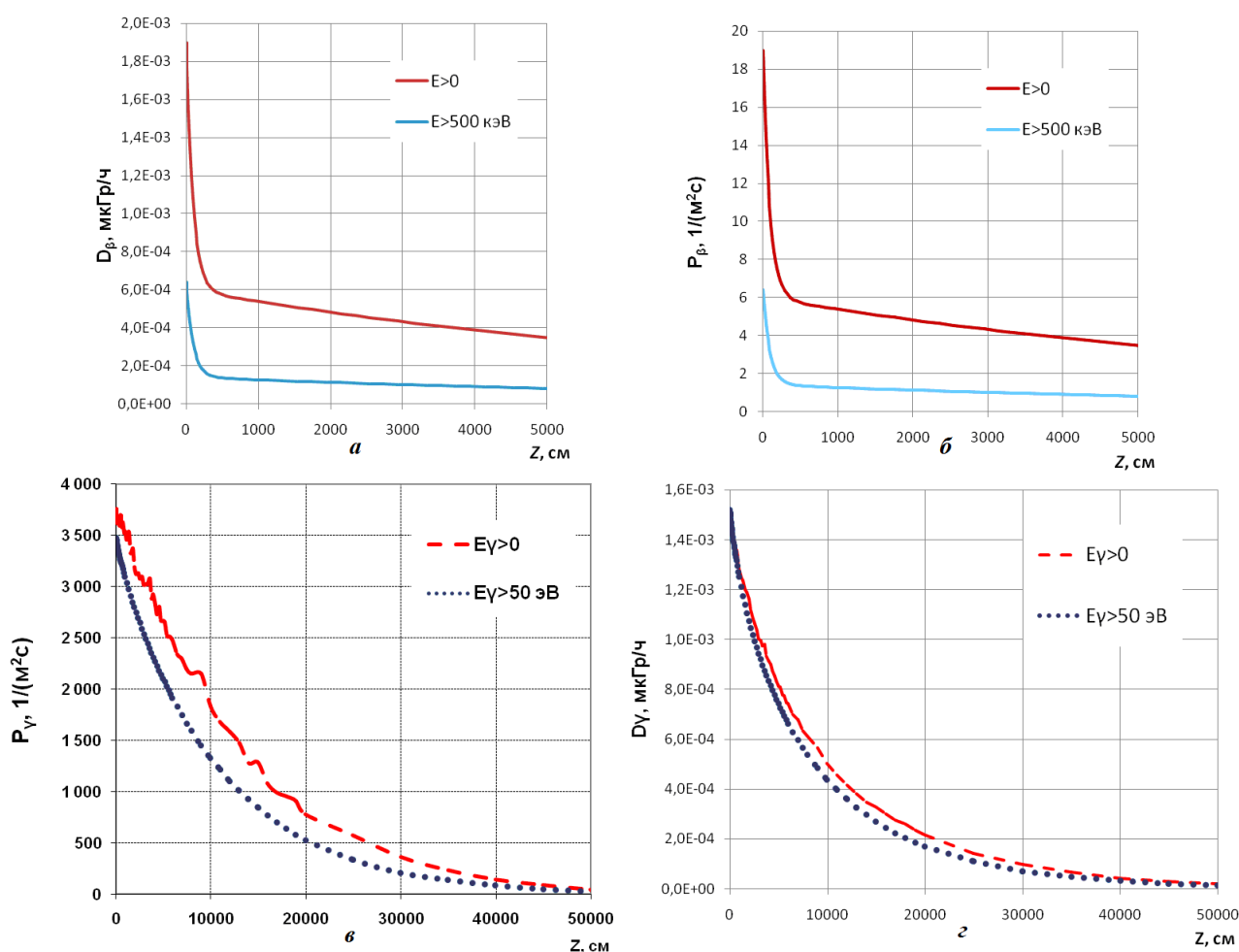


Рис. 2. Изменение с высотой: а) D_β ; б) P_β ; в) P_γ ; г) D_γ ; рассчитанных на единичную удельную активность почвенных радионуклидов

Здесь можно сделать вывод о том, что измеренные детекторами ионизирующих излучений характеристики существенно отличаются от истинных значений, особенно в случае β -излучения, причем эти различия зависят от высоты установки детектора. Зависимость величин D_β и P_γ от высоты подчиняется экспоненциальному закону.

Следует также отметить, что доза и плотность потока β -излучения в атмосфере складываются из двух компонент: 1) β -излучение почвенных радионуклидов, образо-

ванное непосредственно в грунте; 2) вторичное β -излучение, образованное в воздухе при взаимодействии почвенного γ -излучения с атмосферой (рис. 3).

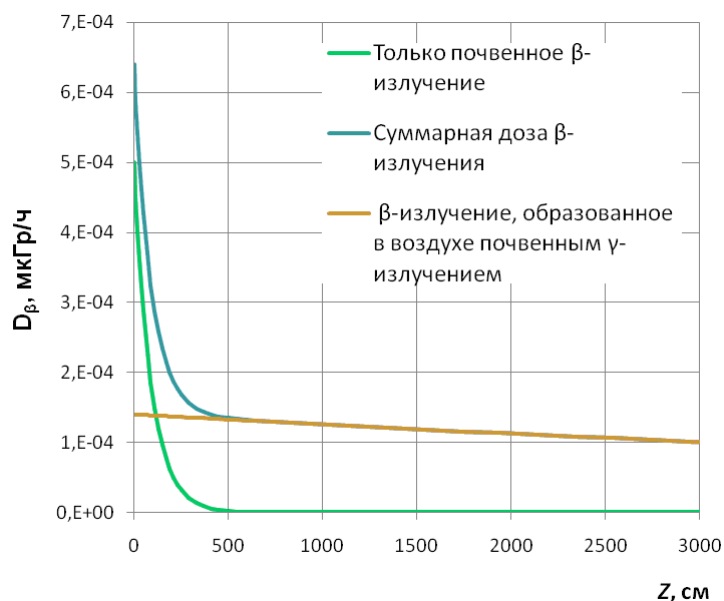


Рис. 3. Разделение поглощенной дозы D_{β} β -излучения на компоненты

Поглощенная доза β -излучения, образованного в грунте, быстро снижается с высотой и на высотах 4-5 м практически равна нулю. Поэтому, зависимость величин D_{β} и P_{β} от высоты более сложная, чем для γ -излучения, и ее можно представить в виде суммы двух экспонент.

Спектрометрический анализ радионуклидного состава грунта

Расчеты вертикальных распределений плотностей потоков и поглощенных доз β - и γ -излучений, формирующихся почвенными радионуклидами, производили на основе экспериментальных данных об удельной активности (УА) почвенных радионуклидов для территории г. Томска и Томской обсерватории радиоактивности и ионизирующего излучения (ТОРИИ). На территории г. Томска значения удельной активности ^{226}Ra , ^{232}Th , ^{40}K и ^{137}Cs в приповерхностных грунтах составляют 25; 26; 345 и 10 Бк/кг, соответственно [7].

На экспериментальной площадке ТОРИИ было выбрано 2 точки, в которых были детально исследованы 2 глубинных профиля А и Б для установления пространственного распределения радионуклидов. В каждом профиле пробоотбор производили до глубины 1 м по 5-ти см слоям, по стандартной методике. Затем, производили подготовку проб и спектрометрический анализ с помощью полупроводникового гамма-спектрометра на основе германиевого детектора типа ДГДК-100В. В состав спектрометра, кроме детектора, входят электронный тракт, состоящий из набора стандартных блоков усилителей и источников питания системы «ВЕКТОР», низкофоновая камера и вычислительный комплекс, сопряженный с платой АЦП-4К-LT на основе РС.

Результаты спектрометрического анализа проб представлены на рис. 4 (а – профиль А и б – профиль Б). Наблюдается сильная пространственная неоднородность распределения УА радионуклидов. Особенно большие вариации УА наблюдаются на глубинах ниже 20 см для всех природных радионуклидов. На глубине 20–90 см наблюдается повышенное содержание радионуклидов (^{40}K , ^{226}Ra , ^{232}Th) в 1,2–1,5 раза. ^{137}Cs на глубинах до 95 см распределен неравномерно. Это свидетельствует о том, что верхний слой грунта до одного метра насыпной. В целинном грунте весь цезий сконцентрирован в поверхностном слое до 0,5 м, что обусловлено его глобальными выпадениями на поверхность земли из атмосферы.

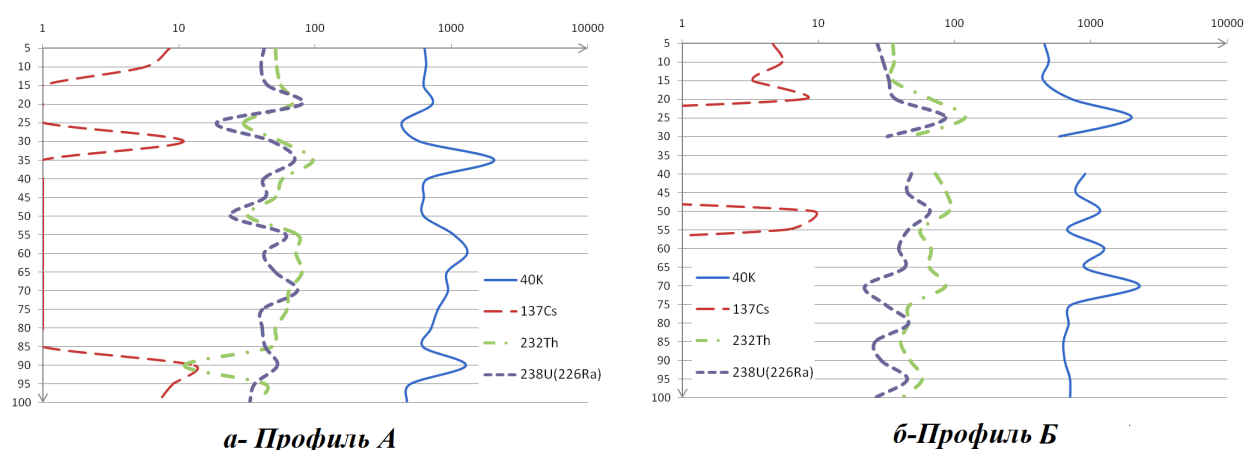


Рис. 4. Вертикальные профили УА почвенных радионуклидов. Ось абсцисс – УА, Бк/кг; ось ординат – глубина, см

Влияние неоднородного распределения радионуклидов по глубине на атмосферный γ -фон

Для того, чтобы определить степень влияния неоднородного распределения радионуклидов по глубине на вертикальный профиль поглощенных доз γ -излучения в приземной атмосфере, были произведены расчеты вкладов каждого 10-ти см слоя грунта в суммарную дозу на разных высотах до 30 м с использованием программы PCLab. Расчеты произведены для ^{40}K . Результаты представлены на рис. 5.

Получено, что вклад верхнего 10-ти см слоя составляет 62–83% в зависимости от высоты над земной поверхностью. Следующий слой 10–20 см вносит вклад от 13 до 26%. В итоге, первые 20 см грунта формируют $\approx 90\%$ γ -излучения в воздухе. Таким образом, неоднородность распределения концентрации радионуклидов по глубине ниже 20 см не существенно отразится на оценки вертикальных профилей доз или плотностей потоков γ -излучения.

Из-за низкой проникающей способности β -излучение почвенных радионуклидов преодолевает только первые единицы см в грунте, поэтому проблема неоднородного распределения радионуклидов по глубине в данном случае не актуальна.

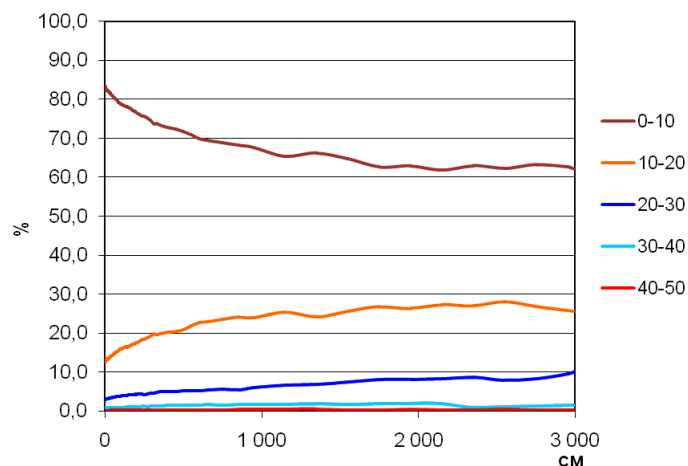


Рис. 5. Зависимость вклада разных слоев грунта в поглощенную дозу в воздухе от высоты над земной поверхностью

Вертикальные профили характеристик полей γ -излучения в приземной атмосфере

Изменения поглощенных доз и плотностей потоков β - и γ -излучения с высотой, рассчитанных на реальную удельную активность почвенных радионуклидов для 2-х участков на площадке ТОРИИ и для средних по г. Томску значений УА радионуклидов, показаны на рис 6. Здесь расчеты произведены с учетом пороговой энергии.

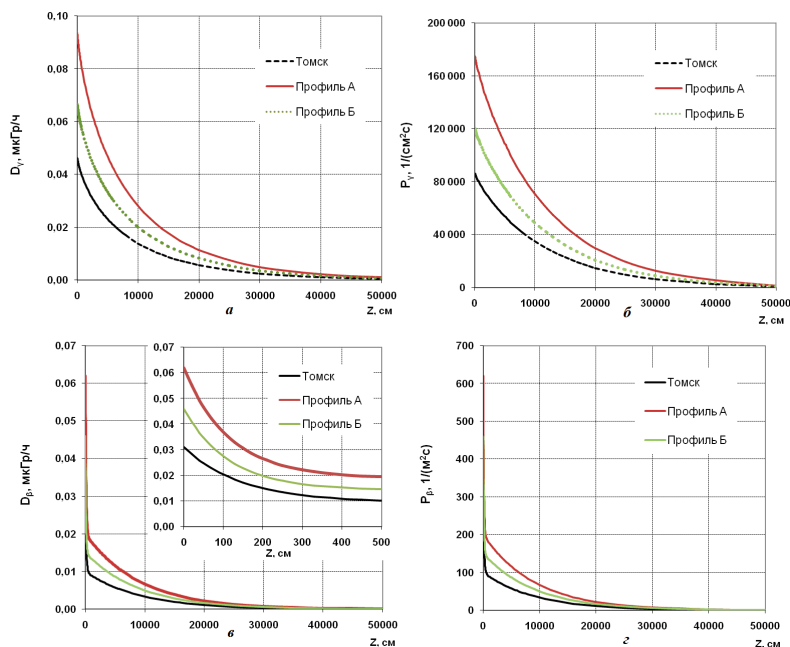


Рис. 6. Изменение с высотой: а) D_γ ; б) P_γ ; в) D_β ; г) P_β , рассчитанных на реальную УА почвенных радионуклидов

Получено, что поглощенная доза γ -излучения у земной поверхности на высотах до 1 м превышает дозу β -излучения почти в 2 раза, а на высотах от 4 до 130 м –

приблизительно в 4 раза. При этом различие в потоках β - и γ -излучений составляет сотни раз. На высотах от 0 до 5 м отношение P_γ/P_β увеличивается с 300 до 800 раз.

Выявлена пропорциональность между дозой в мкГр/ч и плотностью потока в $1/(м^2с)$ для β -излучения, что позволяет делать простой переход от одной характеристики излучения к другой. Коэффициент пропорциональности равен $\approx 1000, ,$.

Для того, чтобы определить, какие почвенные радионуклиды вносят наибольший вклад в суммарные характеристики атмосферных β - и γ -полей, были произведены расчеты для единичной удельной активности радионуклидов и реальной, в качестве которой взяты средние для территории г. Томска значения. Результаты расчетов приведены на рис. 7 и рис. 8.

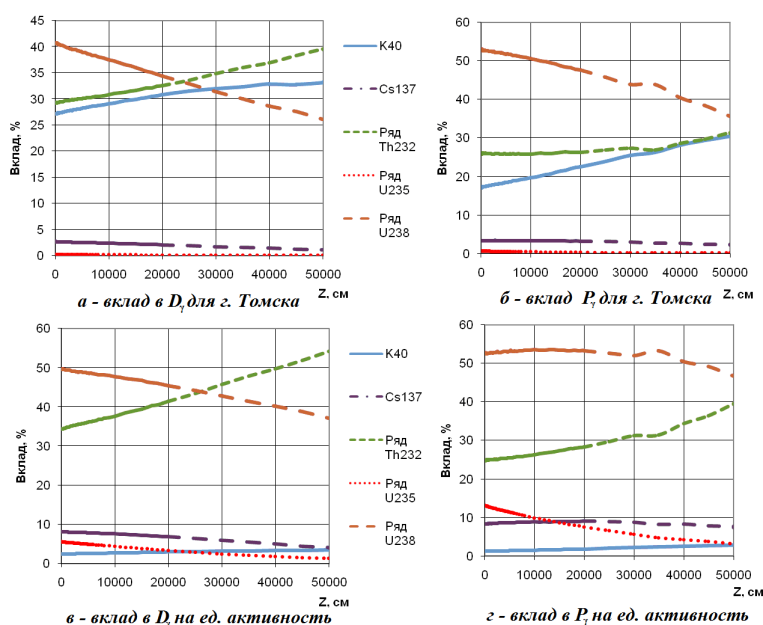


Рис. 7. Зависимость от высоты вкладов почвенных радионуклидов в D_γ и P_γ : а) и б) в расчете на реальную активность; в) и г) на единичную активность

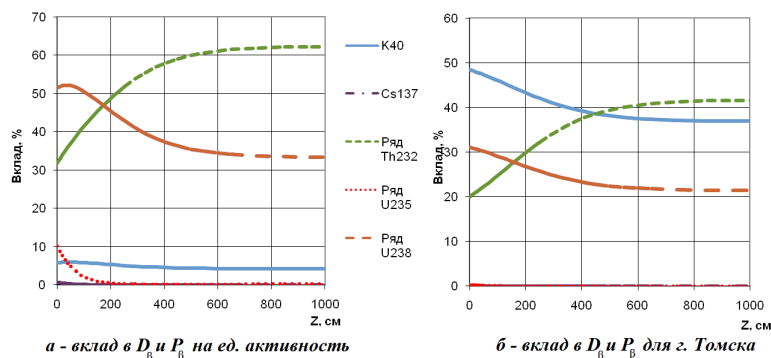


Рис. 8. Зависимость от высоты вкладов почвенных радионуклидов в D_β и P_β : а) в расчете на единичную активность; б) на реальную активность

Вклады различных почвенных радионуклидов в суммарные характеристики атмосферных полей ИИ существенно различаются и изменяются с высотой. В расчетах

на единичную активность, максимальный вклад вносят радионуклиды уранового и ториевого рядов, родоначальниками которых являются ^{238}U и ^{232}Th .

Видно также, что соотношение вкладов разных радионуклидов определяется их удельной активностью. Например, при расчетах на реальную активность, получено, что калий вносит практически одинаковый с ториевым рядом вклад в суммарный γ -фон. При этом вклад калия в β -фон существенно больший, чем от уранового и ториевого рядов.

Вклады калия и ториевого ряда в γ -фон увеличиваются с ростом высоты (рис. 7(а и б)), а вклад уранового ряда – снижается. На высотах 200–300 м, вклады ^{40}K и рядов ^{238}U , ^{232}Th в $D\gamma$ сравниваются, а для $P\gamma$ это возможно только на больших высотах $\approx 0,5$.

При анализе рис. 7 и рис. 8 отмечается еще одна интересная особенность – почвенные радионуклиды существенно различным образом влияют на дозу и плотность потока γ -излучения, но одинаково – на дозу и плотность потока β -излучения. Это объясняется различиями в спектральных характеристиках γ - и β -излучений радионуклидов, а именно, тем, что спектр энергий β -излучения является непрерывным, а γ -излучения – дискретным. Выявленная особенность вскрывает потенциальные проблемы с калибровкой детекторов гамма-излучений, работающих в счетном режиме, в дозовую величину.

Заключение

Анализ результатов моделирования вертикальных распределений характеристик атмосферных полей ионизирующих излучений, обусловленных радиоактивным распадом почвенных радионуклидов, позволил сделать следующие выводы:

- 1) Для оценок поглощенной дозы γ -излучения в атмосфере за счет почвенных радионуклидов достаточно знать радионуклидный состав верхнего 20-ти см слоя грунта, и удельную активность радионуклидов, поскольку именно этот слой формирует $\approx 90\%$ γ -излучения от высоты над земной поверхностью описывается экспоненциальным законом, в отличие от β -излучения, для которого подобную зависимость можно представить в виде суммы двух экспонент. При этом, коэффициент при экспоненте и ее показатель будут зависеть как от радионуклидного состава, так и от соотношения удельных активностей почвенных радионуклидов, и их необходимо подбирать для каждой конкретной территории.
- 2) Выявлена пропорциональность между дозой и плотностью потока для β -излучения, что позволяет делать простой пересчет одной характеристики в другую.
- 4) Для получения истинных значений характеристик полей γ - и β -излучений необходимо производить корректировку результатов измерений с учетом энергетического порога детектора и высоты его установки.

Литература

1. СОБОЛЕВ А.И. и др. Актуальные проблемы анализа результатов радиационно – экологического мониторинга Москвы / А.И. Соболев, В.А. Тихомиров, Л.Ф. Вербова, Ю.Н. Митронова, И.К. Жунов // Фундаментальные исследования. – 2005. – № 6. – С. 74–75.

2. НАГОРСКИЙ П.М. и др. Влияние направления воздушного потока на динамику атмосферных полей гамма- и бета-излучений / П.М. Нагорский, И.И. Ипполитов, С.В. Смирнов, В.С. Яковлева, В.Д. Каратаев, А.В. Вуколов, Я.В. Лужанчук, А.В. Манаков // Изв. вузов. Физика. – 2010. – Т. 53. – № 11/2. – С. 51–54.
3. СИЛАНТЬЕВ К.А. Автоматизированные спектрометрические системы контроля радиационной обстановки. <http://www.atom.nw.ru/atc/obninsk/spektropost.html> (дата обращения: 07.05.2011).
4. БЕСПАЛОВ В.И. Пакет программ ЕРНСА для статистического моделирования поля излучения фотонов и заряженных частиц // Изв. вузов. Физика. – 2000. – Т. 43. – № 4. – С. 159–165.
5. БЕСПАЛОВ В.И. Взаимодействие ионизирующих излучений с веществом – Томск: Изд-во ТПУ, 2007. – 369 с.
6. АТМОСФЕРА. Справочник / под ред. Ю.С. Седунова – Л.: Гидрометеиздат, 1991. – 511 с.
7. КАРАТАЕВ В.Д., ЯКОВЛЕВА В.С., ЭРГАШЕВ Д.Э. Исследование радиоактивности объектов окружающей среды на территории Томской области // Изв. вузов. Физика. – 2000. – Т. 43. – № 4. – С. 105–109.

Поступила в редакцию / Original article submitted: 25.01.11

В окончательном варианте / Revision submitted: 17.05.11