

УДК 550.835.2

**ФОРМИРОВАНИЕ α -, β - И γ -ПОЛЕЙ ПРИЗЕМНОЙ АТМОСФЕРЫ
ПРИРОДНЫМИ АТМОСФЕРНЫМИ РАДИОНУКЛИДАМИ**

В.С. Яковлева¹, П.М. Нагорский², М.С. Черепнев¹

¹ Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
634050, г.Томск, пр. Ленина, 30

² Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, 634055,
г.Томск, Академический пр., 10/3

E-mail: vsyakovleva@tpu.ru

В работе изложены и проанализированы результаты численного исследования влияния на характеристики атмосферных полей α -, β - и γ -излучений, создаваемых содержащимися в приземной атмосфере радон, торон и их короткоживущими дочерними продуктами распада, турбулентности атмосферы, скорости и направления ветра, а также плотности потока радона и торона из грунта.

Ключевые слова: радон, торон, радионуклид, распад, ионизирующее излучение, атмосфера, моделирование

© Яковлева В.С., Нагорский П.М., Черепнев М.С., 2014

MSC 76R50

**GENERATION OF GROUND ATMOSPHERE α -, β - AND γ -FIELDS BY
NATURAL ATMOSPHERIC RADIONUCLIDES**

V.S. Yakovleva¹, P.M. Nagorskiy², M.S. Cherepnev¹

¹ National Research Tomsk Polytechnic University, 634050, Tomsk c., Lenin st., 30,
Russia

² Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems, SB RAS, 634055, Tomsk
c., Academicheskaya st., 10/3, Russia

E-mail: vsyakovleva@tpu.ru

The results of numerical investigation of influence of atmospheric turbulence, wind speed and direction as well as radon and thoron flux density from the soil on characteristics of atmospheric α -, β - and γ -radiation fields, which created by atmospheric radon, thoron and their short-lived decay products, are represented and analyzed in the work. It was showed that variation of radon and thoron flux densities from the earth surface changes yields and flux densities of α -, β - and γ -radiation in the ground atmosphere proportionally but does not change a form of their vertical profile.

Key words: radon, thoron, radionuclide, decay, ionizing radiation, atmosphere, simulation

© Yakovleva V.S., Nagorskiy P.M., Cherepnev M.S., 2014

Введение

Экспериментальные и теоретические исследования пространственной и временной динамики атмосферных полей ионизирующих γ -излучений проводятся не одно десятилетие, и их актуальность обусловлена многогранностью приложений в различных областях знаний [1]-[8]. Атмосферные поля ионизирующих излучений (ИИ) являются отражением, как текущего состояния атмосферы, так и состояния системы «литосфера-атмосфера-ионосфера-космос» в целом. Хотя радиационный фон приземной атмосферы складывается разными видами ионизирующего излучения (α -, β -, γ - и нейтронное излучения), однако, основное внимание сосредоточено только на γ -излучении, что связано с его большой проникающей способностью.

Согласно устоявшемуся мнению [1]-[4], [9] атмосферный радон (его изотопы и дочерние продукты распада) значимо влияет на атмосферные поля ИИ и представляет собой источник «вариативной» компоненты атмосферных полей излучений. При этом степень влияния радона на атмосферные поля никем детально не прорабатывался.

Поля разных видов ионизирующих излучений складываются из разных компонент, например, атмосферные, почвенные радионуклиды, космическая радиация. Например, поле β -излучения в приземной атмосфере складывается из β -излучений почвенных и атмосферных радионуклидов, в т.ч. β -излучающих продуктов распада радона и торона. Разделение данных о полях излучения по разным компонентам – глобальная задача. Динамика одной компоненты накладывается на динамику другой – в итоге мы получаем трудно расшифровываемую картину. Так, например, всем известная система АСКРО (или ЕГАСКРО) – где дополнительно к стандартному набору метеорологических величин добавлена дозовая характеристика поля ИИ – мощность амбиентного эквивалента дозы, мкЗв/ч, измеряемая при контроле радиационной обстановки. Повышение мощности дозы выше некоторого порогового значения сигнализирует лишь об ухудшении радиационной обстановки, но не дает возможности определить причину. Чем это вызвано, либо изменением состояния литосферы, атмосферы, либо деятельностью человека? Для выяснения этого необходимы комплексные исследования механизмов формирования атмосферных полей излучений, источников и степени их влияния.

Всем известно, что поля различных видов излучения могут нести разную по пространственной протяженности информацию. Например, поля γ -излучения более дистанционные и несут информацию об удаленном источнике. Поля β -излучения несут более локальную информацию, например, из области пространства в единицы, или первые десятки метров. Учитывая, что пробег α -частиц в воздухе находится в пределах от единиц до первого десятка сантиметров, поля α -излучений несут информацию о конкретной точке пространства. Однако, эти замечательные свойства ИИ до сих пор не используются в полной мере для получения информации о радиационной обстановке, а также о текущем состоянии окружающей среды и ее изменениях.

Другим направлением, в котором также необходимо понимание источников и механизмов формирования атмосферных полей ИИ, является радиационная биология и экология. В связи с возросшим в последние годы интересом к воздействию малых доз радиации [10] многими научными коллективами отмечается острая нехватка информации о фоновых уровнях естественной радиоактивности, а также отсутствие систематизированного мониторинга полей α - и β -излучений. Иногда, в научных целях, производят непродолжительные эксперименты по исследованию атмосферного радона (торона) по создаваемым потокам γ - или β -излучений. Однако, в этом случае

интерпретация результатов мониторинга затруднена отсутствием данных о вкладе радоновой и других компонент в суммарные атмосферные поля ионизирующих излучений. Так, например, в работах [1], [2], [6] были выявлены аномальные всплески в атмосферных β - и γ -полях длительностью от нескольких часов до полусуток, которые можно было отнести к сигналам об ухудшении радиационной обстановки. Одним из объяснений появления всплесков в атмосферном γ -фоне, предложенным в работе [2], являлось повышение плотности потока радона с поверхности земли, вызванное изменением метеоусловий, и приводящее к увеличению активности радона в приземной атмосфере. Хотя, экспериментальных доказательств этой гипотезы не было приведено.

Вопросы формирования атмосферных полей ИИ, обусловленных радиоактивным распадом радионуклидов, содержащихся в грунте, были детально рассмотрены в работе [11]. Целью настоящей работы являлось моделирование атмосферных полей α -, β - и γ -излучений, создаваемых при распаде радона, торона и короткоживущих дочерних продуктов их распада, находящихся в приземной атмосфере, а также численное исследование степени влияния на характеристики этих полей скорости выхода радона и торона из грунта, турбулентности атмосферы, скорости и направления ветра.

Моделирование выхода и плотности потока ионизирующего излучения

В качестве атмосферных радионуклидов выберем основные дозообразующие радионуклиды – изотопы радона и короткоживущие дочерние продукты их распада (ДПР), а из характеристик полей ионизирующих излучений рассмотрим выход ИИ и плотность потока ИИ, а также связь между ними.

Образование α -излучения происходит при распаде ядер ^{222}Rn , ^{220}Rn , ^{218}Po , ^{216}Po , ^{214}Po , ^{212}Bi и ^{212}Po , а β - и γ -излучения – при распаде ядер ^{214}Pb , ^{212}Pb , ^{214}Bi , ^{212}Bi и ^{208}Tl . Рассмотрим вертикальное распределение выхода ионизирующего излучения в направлении оси z . Функция выхода χ_j ионизирующего излучения j -го вида, образующегося при радиоактивном распаде радона и продуктов его распада в объеме атмосферного воздуха V за 1 с (на один распад ядра) может быть рассчитана из выражения

$$\chi_j(t, z) = V \cdot \sum_i (X_{ij} \cdot A_i(t, z)), \text{с}^{-1}\text{м}^{-3}, \quad (1)$$

где X_{ij} – выход частиц j -го вида на один распад ядра i -го радионуклида, с^{-1} ; $A_i(t, z)$ – функция вертикального распределения объемной активности (ОА) i -го радионуклида, Бк м^{-3} . Значения X_{ij} – константы и взяты из справочной литературы [12]-[14].

Данные о вертикальном профиле ОА изотопов радона и ДПР можно получить экспериментальным или расчетным способом с использованием модели [15] переноса радиоактивных газов и аэрозолей в атмосфере. Модель учитывает следующие процессы рождения, переноса и удаления радионуклидов в атмосфере:

- 1) выход радиоактивных газов из грунта в атмосферу;
- 2) радиоактивный распад;
- 3) молекулярную и турбулентную диффузию;
- 4) осаждение под действием силы тяжести;
- 5) вымывание радионуклидов из атмосферы осадками;
- 6) ветровой перенос.

Изменение во времени и по координате z объемной активности радона, торона и короткоживущих продуктов их распада в приземной атмосфере можно представить системой из 11 дифференциальных уравнений с постоянными коэффициентами

$$(D_{M_i} + D) \frac{d^2 A_i(z)}{dz^2} - v_W \frac{d}{dz} A_i(z) - \lambda_i A_i(z) = 0, i = 1, 6, \quad (2)$$

$$(D_{M_i} + D_T) \frac{d^2 A_i(z)}{dz^2} - v_d \frac{d}{dz} A_i(z) + \lambda_i A_{i-1}(z) - \lambda_i A_i(z) = 0, i = 2 - 5, 7 - 11.$$

Система уравнений (2) дополнена краевыми условиями

$$\begin{aligned} - (D_{M_i} + D_T) \frac{dA_i(z)}{dz} \Big|_{z=0} + v_W A_i(z) \Big|_{z=0} &= q_i, i = 1, 6, \\ (D_{M_i} + D_T) \frac{dA_i(z)}{dz} \Big|_{z=0} - v_d A_i(z) \Big|_{z=0} &= 0, i = 2 - 5, 7 - 11, \\ A_i(z) &\rightarrow 0, \quad z \rightarrow \infty. \end{aligned} \quad (3)$$

Здесь: $A_i(z)$ – функция объемной активности i -го радионуклида, Бк/м³; индексы $i = 1-5$ соответствуют радону ²²²Rn и продуктам его распада, соответственно ²¹⁸Po (RaA), ²¹⁴Pb (RaB), ²¹⁴Bi (RaC) и ²¹⁴Po (RaC'); индексы $i = 6-11$ соответствуют торону ²²⁰Rn и продуктам его распада, соответственно ²¹⁶Po (ThA), ²¹²Pb (ThB), ²¹²Bi (ThC), ²¹²Po (ThC') и ²⁰⁸Tl (ThC''); q_i – плотность потока радона ($i = 1$) и торона ($i = 6$) с поверхности грунта, Бк м² с⁻¹; D_M – коэффициент молекулярной диффузии, м²/с; D – коэффициент турбулентности атмосферы, м²/с; $v_d = v_W + v_F$; v_W – вертикальная составляющая скорости ветра, м/с; v_F – скорость осаждения под действием силы тяжести, м/с; $\lambda = \lambda_d + L$; λ_d – постоянная радиоактивного распада, с⁻¹; L – коэффициент вымывания аэрозолей осадками, с⁻¹. При отрицательных значениях v_W – скорость ветра направлена к поверхности земли, при положительных – совпадает с направлением оси z (вверх от поверхности земли).

При необходимости сравнения расчетных данных с экспериментальными данными о плотности потока ИИ, полученными различными детекторами ядерных излучений, удобно расчетные значения пересчитать на время одного измерения детектором. Таким образом, плотность потока $\chi_j(t_2 - t_1, z)$ ионизирующего излучения j -го вида в единице объема за промежуток времени $(t_2 - t_1)$ можно рассчитать по следующему соотношению

$$\chi_j(t_2 - t_1, z) = \sum_i (X_{ij} \cdot N_i(t_2 - t_1, z)), \quad (4)$$

где $N_i(t_2 - t_1, z)$ – функция количества распадов i -го радионуклида за период времени $(t_2 - t_1)$ в 1 м³, которая рассчитывается из выражения

$$N_i(t_2 - t_1, z) = \int_{t_1}^{t_2} A_i(t, z) dt. \quad (5)$$

Исследуем влияние плотности потоков радона (ППР) и торона (ППТ) с поверхности грунта на выход ионизирующего излучения в приземной атмосфере для широкого диапазона изменения значений ППР от 1 до 100 мБк/(м²с) и ППТ от 0,1 до 10 Бк/(м²с). Пары значений ППР и ППТ рассчитаны по диффузионной модели переноса

радона в грунте при условии одинакового содержания ^{238}U и ^{232}Th в поверхностном слое грунта, что часто наблюдается на практике [16]. Такой выбор был сделан для удобства анализа результатов.

Входные коэффициенты для решения системы уравнений (1-3) брали следующими: средневзвешенная скорость осаждения аэрозольных частиц под действием силы тяжести $v_F = 1,35 \cdot 10^{-5}$ м/с; коэффициент турбулентности атмосферы $D_T = 0,1$ м²/с; вертикальная составляющая скорости ветра v_W и коэффициент вымывания аэрозольных частиц из атмосферы осадками L равны нулю. Результаты моделирования для трех случаев:

- 1 – ППР=1 мБк/(м²с), ППТ=100 мБк/(м²с);
- 2 – ППР=10 мБк/(м²с), ППТ=1000 мБк/(м²с);
- 3– ППР=100 мБк/(м²с), ППТ=10⁴ мБк/(м²с).

представлены на рис. 1.

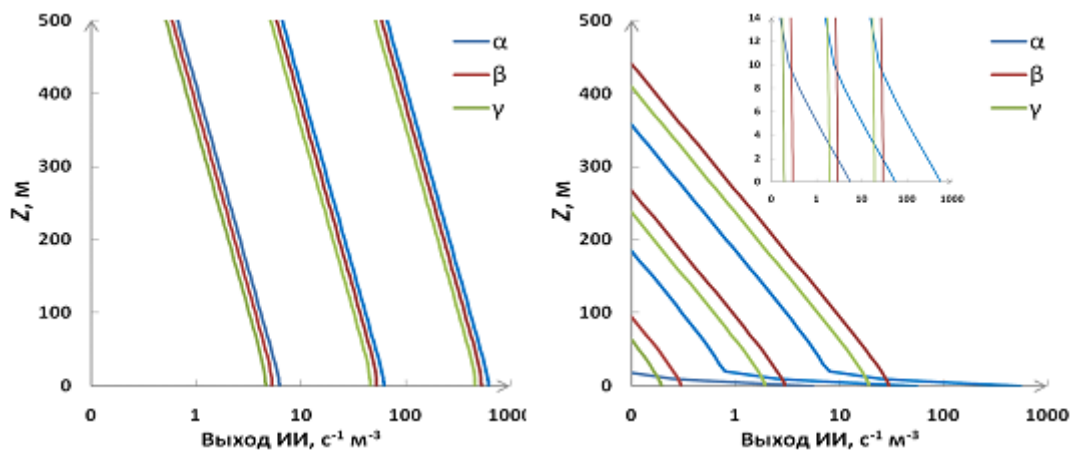


Рис. 1. Зависимость от высоты выхода излучения: а) радона и ДПР; б) торона и ДПР, при различных значениях плотности потока радона и торона

Видно, что выходы α -, β - и γ -излучений радоновой компоненты (рис. 1 а) практически одинаковые и пропорционально увеличиваются с ростом величины ППР. Это же наблюдается и для тороновой компоненты (рис. 1 б), однако, выход α -излучения у земной поверхности превышает выход β -излучения в ~ 20 раз, а γ -излучения в ~ 30 раз. На первых 10 м выход α -излучения резко снижается и практически сравнивается с χ_β и χ_γ . Это связано с различиями в ядерно-физических характеристиках радона и торона, а именно тем, что время жизни торона всего несколько минут, и он не успевает переноситься на большие расстояния от земли.

Если сравнить выходы α -излучения от радоновой и тороновой атмосферных компонент при условии одинакового содержания их материнских радионуклидов в грунте (^{238}U и ^{232}Th), то они сопоставимы только до высот в первые единицы метров. Выход β - и γ -излучений тороновой компоненты существенно меньший, чем для радона, и им можно пренебречь.

Исследование влияния турбулентности приземной атмосферы на выходы ИИ радоновой и тороновой компонент произведено для диапазона изменения коэффициента турбулентности от 0 до 10 м²/с. Остальные коэффициенты для расчетов ОА радионуклидов брали следующими: ППР=10 мБк/(м²с); ППТ=1 Бк/(м²с); D_M из [18]; $v_F = 1,35 \cdot 10^{-5}$ м/с; $v_W = 0$ м/с; $L = 0$ с⁻¹. Результаты расчетов приведены на рис. 2.

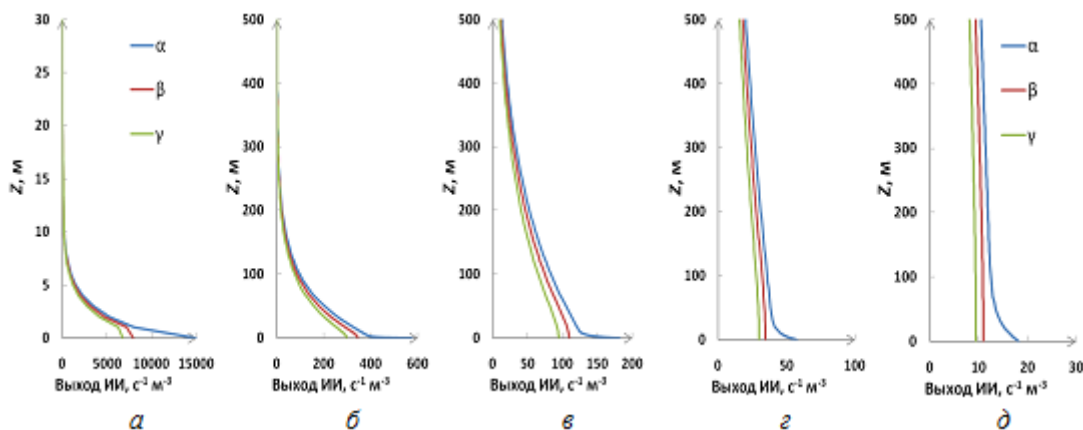


Рис. 2. Распределение по высоте суммарного выхода ИИ изотопов радона: а) $D_t=0$ m^2/c ; б) $D_t=0,01$ m^2/c ; в) $D_t=0,1$ m^2/c ; г) $D_t=1$ m^2/c ; д) $D_t=10$ m^2/c

Анализ результатов показал, что вертикальный профиль полей ИИ радона, торона и продуктов их распада по-разному изменяется с изменением текущего состояния атмосферы. На высоте 1 м наблюдается пропорциональное уменьшение выхода α -, β - и γ -излучений радона и его ДПР, например, с увеличением D_t в 10 раз выход ИИ уменьшается приблизительно в 3 раза. На высотах более 10 м пропорциональность между величиной D_t и выходом α -, β - и γ -излучений радона и его ДПР пропадает. Для торона и его ДПР с увеличением D_t происходит непропорционально быстрое снижение выхода всех видов излучения независимо от высоты. При этом выравнивается вертикальный профиль выхода ИИ.

Рассмотрим влияние скорости и направления ветра на выход ИИ. Направление скорости ветра при положительном значении совпадает с направлением оси z (направление снизу вверх), отрицательные значения показывают, что ветер направлен к земной поверхности (направление сверху вниз). Расчеты произведены для случая, когда коэффициент турбулентности атмосферы $D_t = 0,05$ $m^2 c^{-1}$, значения плотности потоков радона и торона ППР = 10 мБк/($m^2 c$), ППТ = 1 Бк/($m^2 c$), интервал значений для вертикальной составляющей скорости ветра рассмотрен от 0 м/с до 1 м/с. Результаты моделирования выхода излучения представлены на рис. 3.

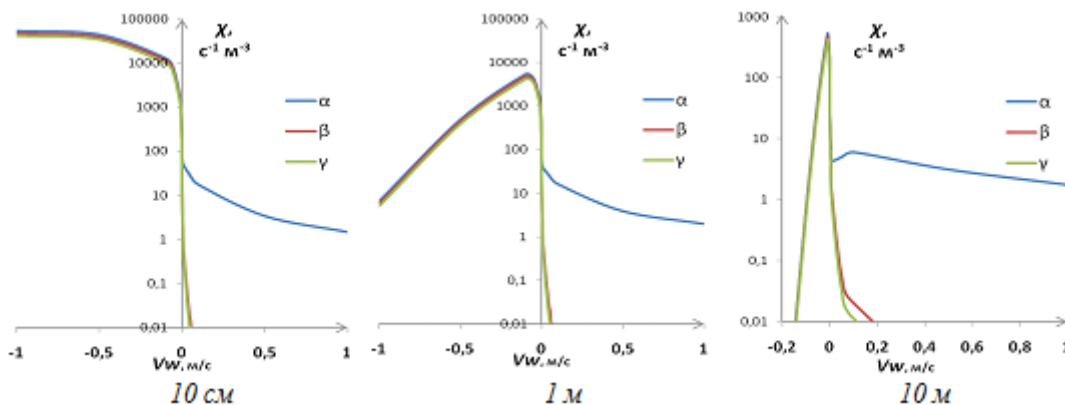


Рис. 3. Зависимости суммарного выхода ИИ от направления и скорости вертикальной составляющей ветра на разных высотах

Анализ численных расчетов показывает, что выход α -, β - и γ -излучений радона, торона и их ДПР у поверхности земли (около 10 см) с увеличением вертикальной составляющей скорости ветра в направлении сверху вниз увеличивается, в связи с прижиманием аэрозолей к поверхности земли, а при ветре дующем снизу вверх, наоборот, снижается.

Получено, что особенно сильные колебания выхода ИИ наблюдаются при смене направления вертикального ветра, причем при значениях, существенно ниже 0,1 м/с. На высотах более 1 м наблюдается иная зависимость выхода ИИ от высоты, т.е. при усилении ветра, направленного к земной поверхности, выход ИИ сначала резко увеличивается, а при дальнейшем увеличении – снижается, и приближается к значению, полученному при нулевой скорости ветра. Таким образом, выявлено, что с ростом высоты потоки α -излучения могут как возрастать, так и снижаться в зависимости от сочетанного влияния турбулентности и скорости (направления) вертикальной составляющей ветра.

Особый интерес представляет зависимость отношений потоков разных видов ИИ от метеорологических величин. Такие зависимости могут быть очень полезны при интерпретации результатов измерений характеристик полей ионизирующих излучений, а именно, основная польза заключается в возможности разделения результатов измерений по отдельным компонентам: атмосферные или почвенные радионуклиды; космическая радиация и пр.

Зависимости отношений выходов β - и α -излучений (β/α), γ - и α -излучений (γ/α), γ - и β -излучений (γ/β) от коэффициента турбулентной диффузии D_t приведены на рис. 4, а от скорости и направления вертикальной составляющей ветра – на рис. 5.

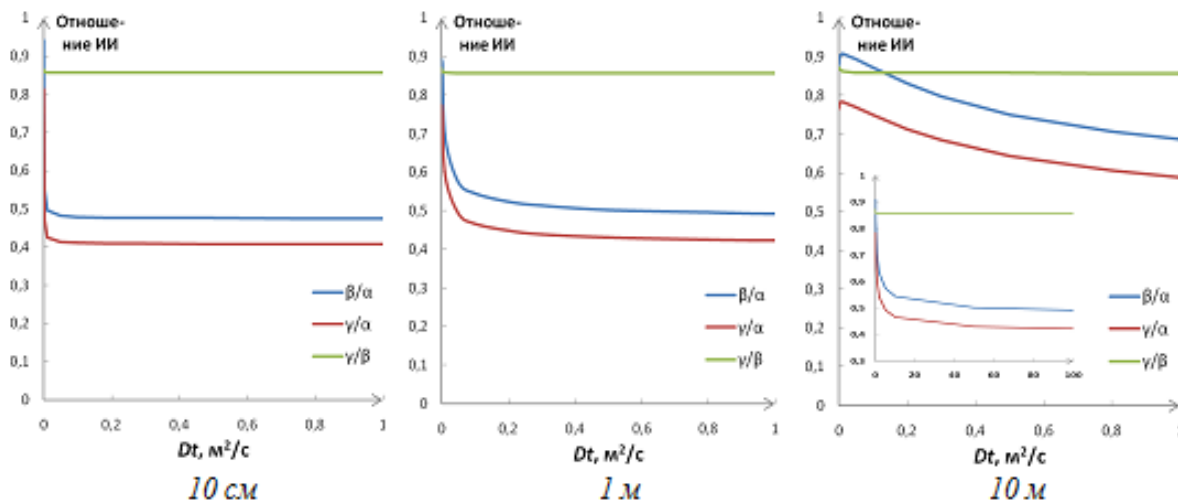


Рис. 4. Зависимости отношения выхода ИИ от D_t на разных высотах

Полученные результаты (рис. 4 и 5) показали, что отношения выходов ИИ являются практически константами в большом диапазоне изменения значений факторов, которые оказывают наибольшее влияние на величину и форму вертикального профиля плотности потоков ИИ: коэффициента турбулентной диффузии и скорости ветра. Анализ результатов численных экспериментов позволил выдвинуть идею о создании метода мониторинга атмосферного радона (определения ОА изотопов радона и ДПР) по измеренным значениям плотности потоков α - и β -излучений (соотношению β/α).

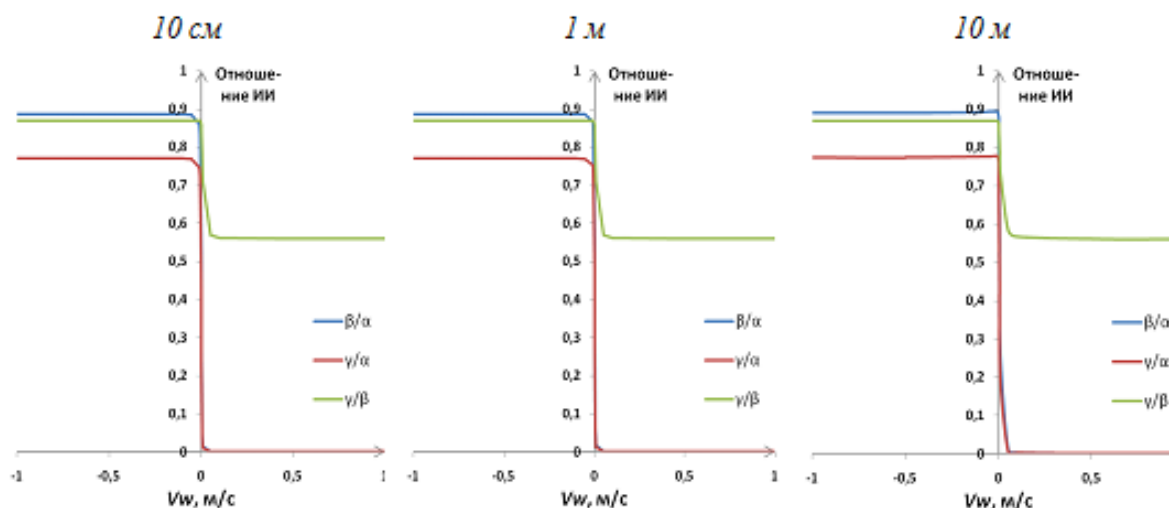


Рис. 5. Зависимости отношения выхода ИИ от скорости и направления вертикальной составляющей ветра v_w на разных высотах

Таким образом, появляется возможность замены дорогостоящего спектрометрического оборудования экономичными и простыми в эксплуатации детекторами (счетчиками).

В свою очередь, постоянство отношения γ/α в большом диапазоне изменения значений D_t и v_w , а также отношения γ/β может являться той искомой физической основой для разработки метода/методики определения вклада радоновой компоненты в суммарный атмосферный γ -фон.

Для этого необходим переход от единиц активности (или выхода ИИ) к единицам плотности потока. Принимая во внимание сильно различающиеся проникающие способности излучений разных видов, следует определить условия, при которых связь между выходом одного вида излучения с плотностью его потока будет линейной. Переход от величины выход ИИ ($\text{с}^{-1}\text{м}^{-3}$) к величине плотность потока ИИ ($\text{с}^{-1}\text{м}^{-2}$) представляет определенную сложность для излучений с большой длиной пробега в воздухе, к которым, в данной задаче, относятся β - и γ -излучения. Поэтому, плотности потоков β - и γ -излучений в приземной атмосфере, обусловленные распадом ДПР радона и торона, были рассчитаны с использованием метода Монте-Карло по программе PCLab [19]-[21]. В качестве входных данных использовали рассчитанные по модели (2,3) распределения объемных активностей радона, торона и короткоживущих продуктов их распада по высоте.

На рис. 6 представлены результаты моделирования зависимости отношения плотностей потоков γ - и β -излучений P_γ/P_β от коэффициента турбулентной диффузии D_t и высоты над земной поверхностью.

Сравнивая результаты численного моделирования отношения выходов и плотностей потоков ионизирующих γ - и β -излучений (рис. 4 и 6) видно, что полученные зависимости имеют определенные разлия. Линейность функции отношения плотности потоков γ - и β -излучений от D_t нарушается при значениях D_t менее 0,1 м/с. При этом величина P_γ/P_β зависит от высоты над земной поверхностью (высота установки детекторов), в отличие от величины отношения выходов γ - и β -излучений (рис. 4). Тем не менее, существует некоторый диапазон изменения D_t , в котором существует

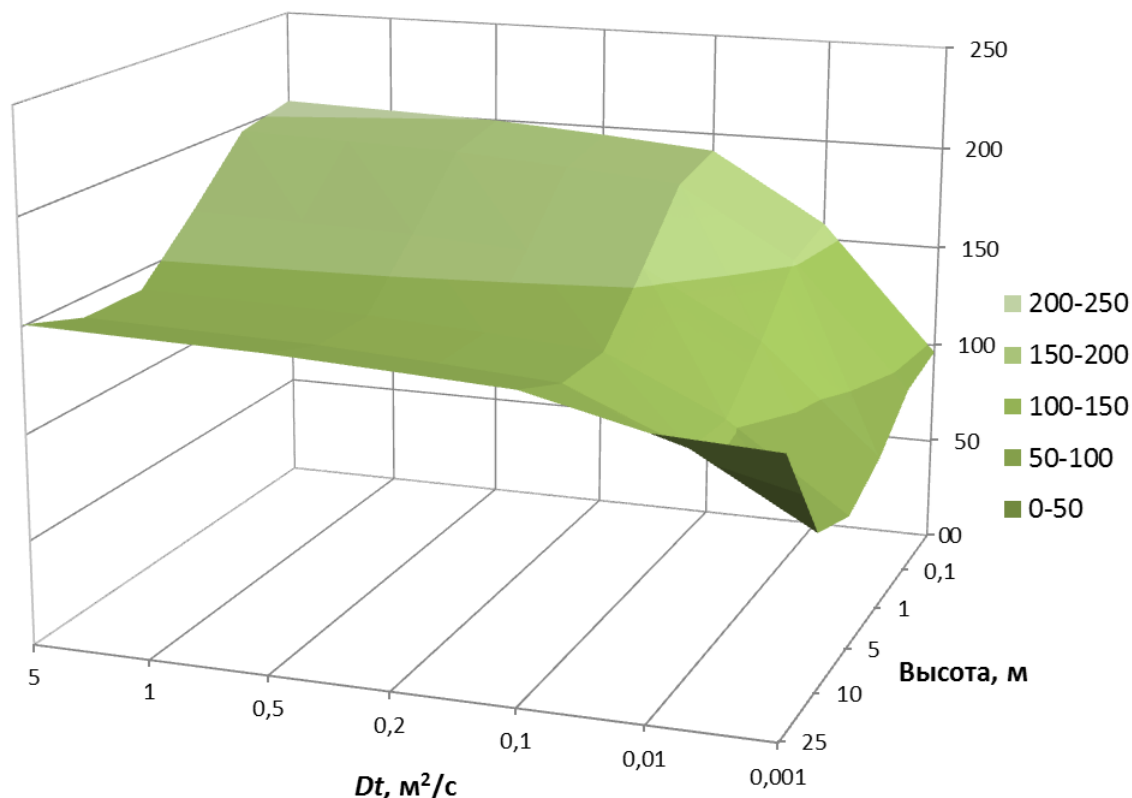


Рис. 6. Зависимость отношения плотности потоков γ - и β -излучений P_γ/P_β от D_t и высоты над земной поверхностью

линейная зависимость между величинами плотности потоков γ - и β -излучений, и которую можно использовать при разработке вышеупомянутого метода.

Результаты моделирования также показывают, что мониторинг вертикального профиля атмосферных потоков излучений разных видов (α -, β - и γ -) может помочь более детально разобраться в вопросах реакции атмосферных полей ИИ на изменение погодных условий и других внешних факторов, в т.ч. и опасных явлений. Чего не позволяет сделать стандартная система радиационного контроля окружающей среды, в которой мониторинг производят только по γ -излучению.

Заключение

Анализ результатов численных экспериментов показал, что изменение плотности потока радона и торона с поверхности земли пропорционально изменяет выход и плотности потоков α -, β - и γ -излучений в приземной атмосфере, не изменяя при этом форму их вертикальных профилей. Также получено, что даже небольшие колебания скорости вертикальной составляющей ветра существенным образом изменяют форму вертикального профиля выхода и плотности потока ИИ.

Выявлено, что увеличение турбулентности атмосферы приводит к выравниванию вертикального профиля потоков β - и γ -излучений, а ее снижение – к существенному росту плотности потоков α - и β -излучений у земной поверхности.

Полученные результаты могут быть использованы для разработки метода мониторинга атмосферного радона (определения ОА изотопов радона и дочерних продуктов их распада) по измеренным значениям плотности потоков ионизирующих излучений, а также для разработки алгоритма вычета радоновой компоненты из данных радиационного контроля атмосферного γ -фона.

Библиографический список

1. Соболев А.И., Тихомиров В.А., Вербова Л.Ф., Митронова Ю.Н., Жунов И.К. Актуальные проблемы анализа результатов радиационно-экологического мониторинга Москвы // *Фундаментальные исследования*. 2005. № 6. С. 74–75.
2. Силантьев К.А. Автоматизированные спектрометрические системы контроля радиационной обстановки. URL: <http://www.atom.nw.ru/atc/obninsk/spektrpost.html> (дата обращения: 07.05.2011).
3. Атмосфера. Справочник / под ред. Ю.С. Седунова Л.: Гидрометеиздат, 1991. 511 с.
4. Laakso L., Petaja T., Lehtinen K. E. J., Kulmala M., Paatero J., Horrak U., Tammet H., Joutsensaari J. Ion production rate in a boreal forest based on ion, particle and radiation measurements // *Atmos. Chem. Phys. Discuss.* 2004. V. 4. P. 3947–3973.
5. Hatakka J., Paatero J., Viisanen Y., Mattsson R. Variations of external radiation due to meteorological and hydrological factors in central Finland // *Radiochemistry*. 1998. V. 40. P. 534.
6. 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. С.
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. Яковлева В.С., Ипполитов И.И., Кабанов М.В., Нагорский П.М., Фирстов П.П., Каратаев В.Д., Вуколов А.В., Смирнов С.В., Паровик Р.И. Скоординированный многофакторный эксперимент по анализу процессов поступления почвенного радона в приземный слой атмосферы // *АНРИ*. 2009. № 4. С. 55–60.
9. Куповых Г.В., Морозов В.Н., Шварц Я.М. Теория электродного эффекта в атмосфере: Монография. Таганрог: ТРТУ, 1998. 124 с.
10. Program of 4th International Congress of Radiation Research, Warsaw, Poland, August 28 - September 1, 2011 (Дата обращения: 23.05.2013: URL: <http://www.icrr2011.org/strony/programme-overview-110>).
11. 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.
12. Программа ICRP38 // ORNL Center for Biokinetic and Dosimetric Research. 2009. URL: <http://ordose.ornl.gov> (дата обращения: 11.04.2009).
13. Gamma-Ray Spectrum Catalogue // Региональная объединенная компьютерная сеть образования, науки и культуры Санкт-Петербурга. 2009. URL: <http://www.atom.nw.ru/catalog/nuclides.htm> (дата обращения: 11.04.2009).
14. BetaSpecALL FINAL3.xls // the RAdiation Dose Assessment Resource. 2009. URL: <http://www.doseinfo-radar.com> (дата обращения: 18.04.2009).
15. Яковлева В.С., Вуколов А.В., Нагорский П.М., Гвай И.А., Нейман Д.А. Исследование сдвига радиоактивного равновесия между изотопами радона и продуктами их распада // *АНРИ*. 2011. №3 (66). С. 43–51.

16. Каратаев В.Д., Яковлева В.С., Эргашев Д.Э. Исследование радиоактивности объектов окружающей среды на территории Томской области // Известия вузов. Физика. 2000. Т. 43. № 4. С. 105–109.
17. Яковлева В.С. Методы определения объемной активности изотопов радона и продуктов распада в воздухе: Учебное пособие. Томск: ТПУ, 2010. 119 с.
18. Horvath H. Aerosol – an introduction // Journal of Environmental Radioactivity. 2000. № 51. P. 5-25.
19. Беспалов В.И. Пакет программ ЕРНСА для статистического моделирования поля излучения фотонов и заряженных частиц // Известия вузов. Физика. 2000. Т. 43 № 4. С. 159–165.
20. Беспалов В.И. Взаимодействие ионизирующих излучений с веществом: учебное пособие. 4-е изд., исправ. Томск: ТПУ, 2008. 369 с.
21. Компьютерная лаборатория (КЛ/PCLab). Свидетельство об официальной регистрации программы ЭВМ № 2007615275 от 28.12.2007. Автор: Беспалов В.И.

Поступила в редакцию / Original article submitted: 15.03.2014