

УДК 551.510.522:532:526

## ИОНИЗАЦИЯ ПРИЗЕМНОЙ АТМОСФЕРЫ ИЗЛУЧЕНИЕМ ПОЧВЕННЫХ РАДИОНУКЛИДОВ

В.В. Зукау\*, В.С. Яковлева\*, В.Д. Каратаев\*, П.М. Нагорский\*\*

\*Томский политехнический университет

\*\*Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, г. Томск

E-mail: vsyakovleva@tpu.ru

Представлены результаты моделирования вертикального профиля плотности ионизации приземного слоя атмосферы, обусловленного радиоактивным распадом почвенных радионуклидов. Моделирование плотности ионизации в атмосферном воздухе ионизирующим излучением проведено методом Монте-Карло. При моделировании учтено вторичное излучение и каскадный характер взаимодействия излучения с воздухом. Для проведения расчетов создана библиотека из 40 основных радионуклидов, повсеместно присутствующих в почвах и грунтах. Моделирование произведено в условиях векового радиоактивного равновесия между родоначальниками семейств и дочерними продуктами их распада.

### Ключевые слова:

Радионуклид, грунт, моделирование, излучение, ионизация, атмосфера, уран, торий, калий, цезий.

### Key words:

Radionuclide, soil, simulation, radiation, ionization, atmosphere, uranium, thorium, potassium, cesium.

Почва — наиболее значимый источник полей ионизирующих излучений, создающий дозовую нагрузку на все объекты, расположенные на поверхности земли, в том числе и на атмосферный воздух. Почва служит основным «депо» долгоживущих радионуклидов естественного и техногенного происхождения. [1]. Естественные радиоактивные элементы находятся в рассеянном состоянии во всех объектах биосферы. Основными из этих элементов являются  $^{235}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{226}\text{Ra}$  ( $^{238}\text{U}$ ) и дочерние продукты их распада, а также  $^{40}\text{K}$ ,  $^{87}\text{Rb}$ . Кроме того, в окружающей среде накапливаются достаточно долгоживущие радионуклиды  $^{14}\text{C}$  и  $^3\text{H}$ , появившиеся в ядерных реакциях атмосферных газов с космическими лучами и вступающие в элементный обмен в биосфере. Из техногенных радионуклидов следует отметить накопление в почве долгоживущего осколочного гамма-радионуклида  $^{137}\text{Cs}$ , образующегося в ядерных реакциях деления сверхтяжелых химических элементов. Для почв на территории г. Томска массовые содержания радионуклидов  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{40}\text{K}$  и  $^{137}\text{Cs}$  в приповерхностных грунтах и в почве колеблются в пределах 1...3; 4...8; 0,5...2 и  $10^{-10}$ ... $10^{-8}$  г/т, соответственно [2].

Одним из наиболее важных свойств атмосферы является её электропроводность, которая для приземной атмосферы, толщиной в несколько десятков метров, на ~80 % обеспечивается мгновенным значением концентраций ионов в воздухе, образованных полями ионизирующих излучений, генерируемых при распаде радиоактивных элементов, находящихся в почве и атмосфере [3]. В отсутствие сильных электрических полей образование и рекомбинация ионов обоих знаков создает равновесную концентрацию ионов. Известно, что в ионизацию приземной атмосферы вносят определенные вклады ионизирующие излучения, возникающие при распаде атмосферных радиоактивных газов и аэрозолей, почвенных радионуклидов, а также потоки излучений космического происхождения [3, 4]. Важно отметить, что вклад каждой из пере-

численных компонент детально не прорабатывался. Это связано с недостаточной изученностью функций распределения некоторых источников ионизации приземной атмосферы. В численных моделях электродного слоя [4] и глобальной электрической цепи [5] функция ионизации приземной атмосферы  $q(z)$  задается либо в виде постоянной величины  $q \sim 10^7$ ,  $\text{м}^{-3} \cdot \text{с}^{-1}$ , либо соотношением [6, 7]:

$$q(z) = 7 \cdot 10^6 + Q_0 e^{-2,362z},$$

$z$  — высота над земной поверхностью,  $Q_0$  — «фоновая» объемная активность радона.

Первое слагаемое определяет величину плотности ионизации атмосферы излучением почвенных радионуклидов. Вместе с тем, вклад слагаемых в суммарную плотность ионизации атмосферы не постоянен, может меняться во времени и пространстве, напрямую определяется плотностью атмосферного воздуха, связанной с такими климатическими параметрами атмосферы, как температура, влажность и давление. Считается, что потоки космических излучений (наиболее изученная компонента) и излучение почвенных радионуклидов представляют собой слабо вариативную по времени компоненту плотности ионизации атмосферы, а радон и продукты его распада — компоненту с высокой вариативностью.

Основной задачей настоящей работы является моделирование вертикального профиля плотности ионизации атмосферы от распада почвенных радионуклидов, а также оценка вариативности почвенной компоненты в зависимости от изменения влажности почв (выпадения осадков) при постоянной плотности атмосферного воздуха.

### Моделирование плотности ионизации приземной атмосферы

Моделирование вертикального распределения плотности ионизации атмосферы от ионизирующего излучения, возникающего при распаде почвенных радионуклидов, проведено с помощью ме-

тода Монте–Карло с использованием разработанной в ТПУ программы PCLab [8, 9]. Эта программа позволяет моделировать процессы переноса электронов, позитронов, фотонов в веществе и вычислять дифференциальные и интегральные характеристики поля ионизирующего излучения. При моделировании произведен учет вторичного излучения и каскадный характер взаимодействия излучения с воздухом. Для проведения расчетов, на основе данных МКРЗ 38 [10] и каталогов радионуклидов [11, 12], создана библиотека из 40 основных радионуклидов, повсеместно присутствующих в грунтах (табл. 1), с указанием их характеристик (постоянная радиоактивного распада, энергии испускаемых фотонов гамма-излучения, квантовый выход и пр.). Модельные оценки произведены с учетом векового радиоактивного равновесия между родоначальниками рядов и дочерними продуктами их распада.

**Таблица 1.** Радионуклиды, использованные в моделировании

Ряд $^{232}\text{Th}$	$^{232}\text{Th}$ , $^{228}\text{Ra}$ , $^{228}\text{Ac}$ , $^{228}\text{Th}$ , $^{224}\text{Ra}$ , $^{220}\text{Rn}$ , $^{216}\text{Po}$ , $^{212}\text{Pb}$ , $^{212}\text{Bi}$ , $^{208}\text{Tl}$
Ряд $^{235}\text{U}$	$^{235}\text{U}$ , $^{231}\text{Th}$ , $^{231}\text{Pa}$ , $^{227}\text{Ac}$ , $^{223}\text{Fr}$ , $^{227}\text{Th}$ , $^{223}\text{Ra}$ , $^{219}\text{Rn}$ , $^{215}\text{Po}$ , $^{211}\text{Pb}$ , $^{211}\text{Bi}$ , $^{207}\text{Tl}$ , $^{211}\text{Po}$
Ряд $^{238}\text{U}$	$^{238}\text{U}$ , $^{234}\text{Th}$ , $^{234\text{m}}\text{Pa}$ , $^{234}\text{Pa}$ , $^{234}\text{U}$ , $^{230}\text{Th}$ , $^{226}\text{Ra}$ , $^{222}\text{Rn}$ , $^{218}\text{Po}$ , $^{214}\text{Pb}$ , $^{214}\text{Bi}$ , $^{214}\text{Po}$ , $^{210}\text{Pb}$ , $^{210}\text{Bi}$ , $^{210}\text{Po}$
Остальные	$^{40}\text{K}$ , $^{137}\text{Cs}$

Источник (грунт) и поглощающую среду (воздух) задавали в цилиндрической геометрии. Для расчетов был взят грунт, состав и параметры которого приведены в табл. 2. Глубина слоя грунта, выбранная для расчетов, составляла 50 см. Большие глубины не рассматривали, поскольку, согласно оценкам [13], основной вклад в дозу, а, следовательно, и в ионизацию приземного воздуха, вносят почвенные радионуклиды приповерхностного слоя, толщиной 5 см.

Все расчеты произведены до высоты 25 м, поскольку в дальнейшем планируется произвести сопоставление модельных оценок с экспериментальными данными по электрической проводимости и полям гамма-излучений, получаемыми в ходе согласованного многофакторного эксперимента ИМКЭС-ТПУ на серии высот до 25 м [14].

**Таблица 2.** Состав грунта [8]

Элемент	Атомный номер, Z	Атомная масса, A	Весовая доля, %
O	8	16	43,2
Si	14	28	20,2
Al	13	27	14,4
C	6	12	10,6
Fe	26	56	9,2
H	1	1	1,5
Ti	22	48	0,7
Mg	12	24	0,2

С помощью программы PCLab рассчитаны вертикальные распределения плотности ионизации

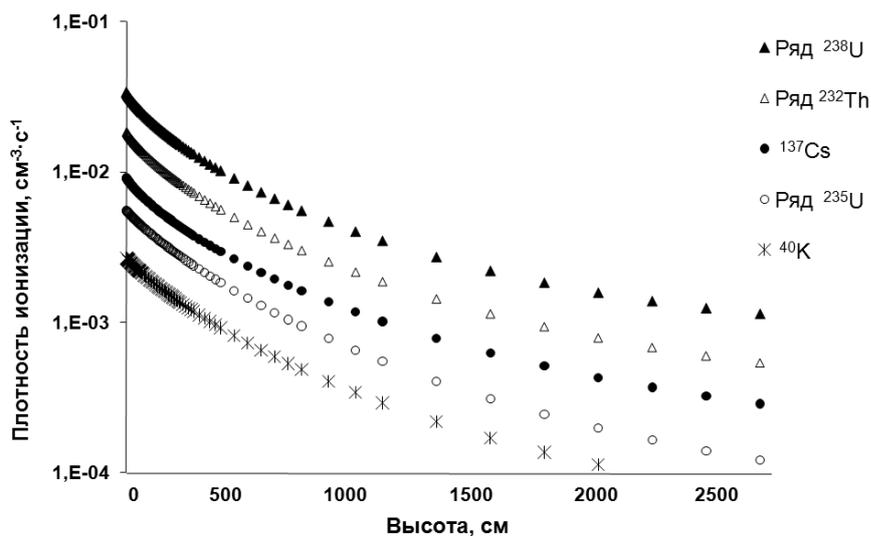
приземной атмосферы для каждого из радионуклидов, табл. 1. С целью оценок вкладов в плотность ионизации атмосферного воздуха от реальной концентрации радионуклидов в почве, все результаты получены в расчете на единичную активность радионуклидов (1 Бк/кг). Вертикальные профили плотности ионизации приземной атмосферы от разных радионуклидов единичной активности представлены на рис. 1, а.

Наибольший вклад в суммарную ионизацию вносит излучение радионуклидов природных семейств  $^{238}\text{U}$  и  $^{232}\text{Th}$ , а минимальное – излучение  $^{40}\text{K}$ . Пересчет на реальную активность почвенных радионуклидов произведен с учетом экспериментальных данных по обследованию территории г. Томска, детально описанных в [1, 2, 15]. Средние для территории г. Томска значения удельной активности  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{40}\text{K}$  и  $^{137}\text{Cs}$  в приповерхностных грунтах и в почве составили 25; 26; 345 и 10 Бк/кг, соответственно [2]. Удельная активность  $^{235}\text{U}$  определена из известного и практически неизменного соотношения изотопов  $^{238}\text{U}/^{235}\text{U}=137,88$ . Таким образом, удельная активность  $^{235}\text{U}$  в 21 раз меньше активности  $^{238}\text{U}$ , и, в среднем для территории г. Томска в почве, составляет 1,2 Бк/кг. Результаты расчетов представлены на рис. 1, б. Изменение по высоте относительных вкладов каждого радионуклида (семейства) в суммарную ионизацию проиллюстрировано на рис. 1, в. Заметное различие относительных вкладов в плотность ионизации атмосферы в зависимости от высоты над земной поверхностью наблюдается только для  $^{40}\text{K}$  и  $^{238}\text{U}$ . Причем с увеличением высоты вклад от  $^{40}\text{K}$  снижается, а от  $^{238}\text{U}$  – увеличивается. Такое поведение объясняется разными энергиями испускаемых фотонов  $\gamma$ -излучения.

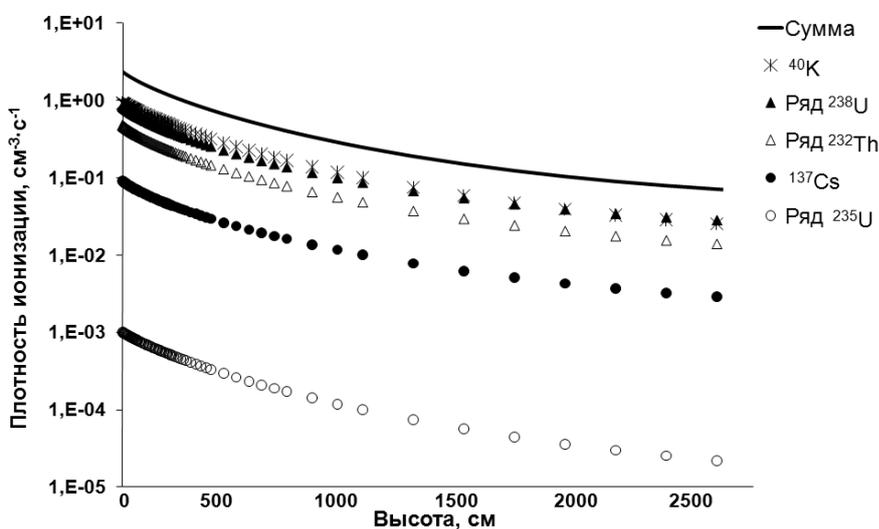
Вертикальные профили плотности ионизации приземной атмосферы, рассчитанные для указанных активностей почвенных радионуклидов, представлены на рис. 2. С учетом реальных активностей, максимальный и приблизительно равный вклад в суммарную ионизацию атмосферы вносят радионуклиды  $^{40}\text{K}$  и  $^{238}\text{U}$  в равновесии с дочерними продуктами распада. Суммарная плотность ионизации у земной поверхности составляет 2,4 пары ионов в 1 с в 1 см<sup>3</sup>, на высоте 1 м – 1,5 пары ионов, а на высоте 25 м плотность ионизации снижается практически на 2 порядка.

Поскольку плотность грунтов и почв на разных участках территории может изменяться в широких пределах, от 0,5 до 2 г/см<sup>3</sup>, то важно знать влияние плотности грунта на плотность ионизации вблизи земной поверхности.

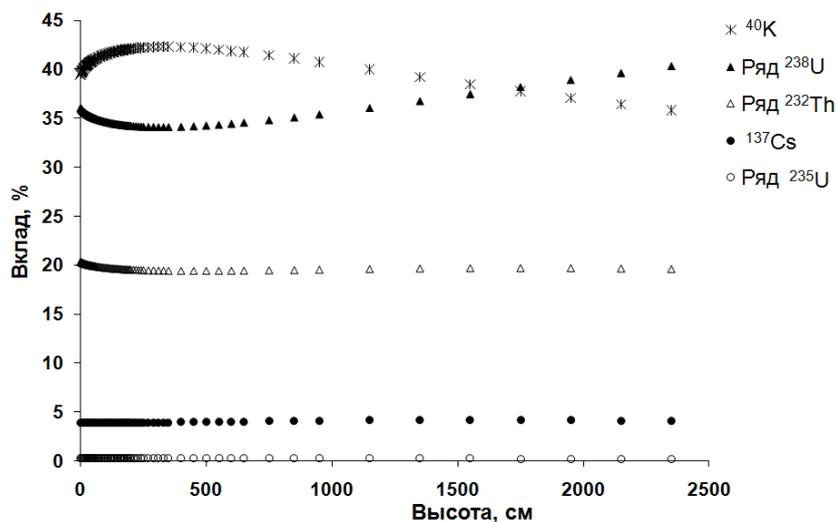
Для различных значений плотности грунта распределение плотности ионизации, образованных излучением  $^{137}\text{Cs}$  по высоте, иллюстрируется рис. 3, а. С увеличением плотности грунта распределение плотности ионизации вблизи земной поверхности изменяется незначительно. Однако с ростом высоты изменения возрастают до 10 % для  $^{40}\text{K}$  и до 50 % для  $^{137}\text{Cs}$ .



а



б



в

Рис. 1. Зависимость плотности ионизации атмосферы от высоты излучением почвенных радионуклидов в расчете на удельную активность: а) единичную; б) реальную; в) относительный вклад

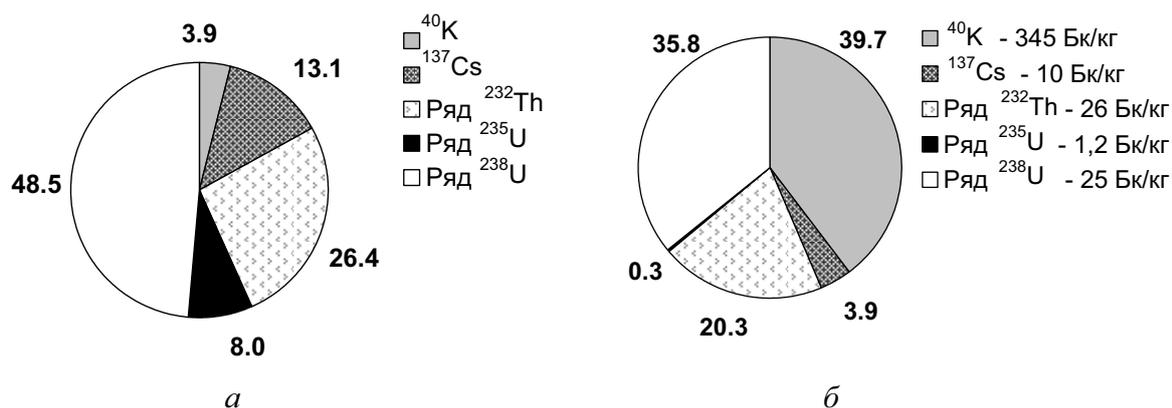


Рис. 2. Вклад почвенных радионуклидов в суммарную плотность ионизации приземной атмосферы на высоте 1 м в расчете на удельную активность: а) единичную; б) реальную

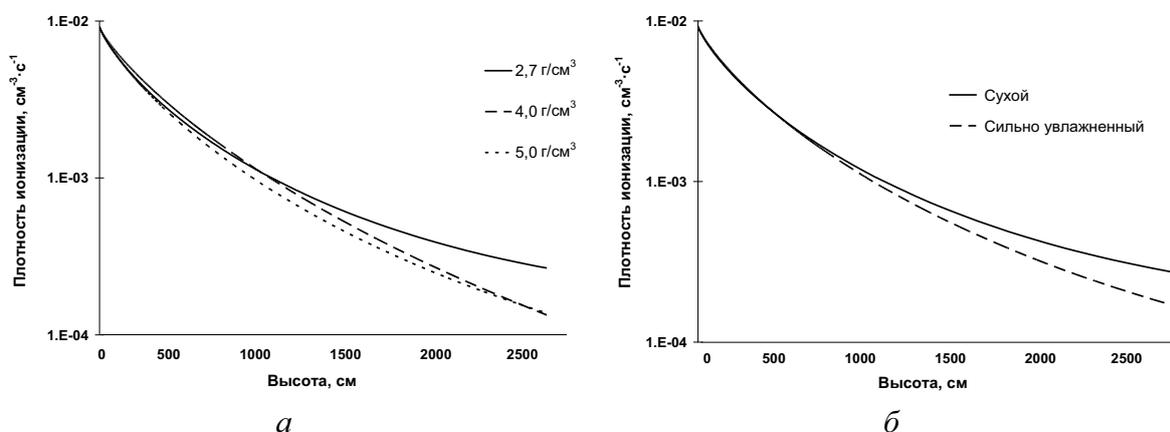


Рис. 3. Зависимость плотности ионизации атмосферы излучением  $^{137}\text{Cs}$  от высоты для: а) различных значений плотности грунта; б) сухого и сильно увлажненного грунта

Большое влияние на уровень ионизирующего излучения и ионизацию приземной атмосферы оказывает влажность грунта. Как показали экспериментальные данные по мониторингу  $\gamma$ - и  $\beta$ -полей на экспериментальной площадке ИМКЭС-ТПУ [14, 16], после дождя изменяется электропроводность атмосферы, которая зависит от плотности ионизации. В этой связи были произведены расчеты зависимости плотности ионизации от влажности грунта с пористостью 40 %. Результаты для  $^{137}\text{Cs}$  представлены на рис. 3, б.

Из оценок следует, что ионизация от влажного грунта, поры которого полностью заполнены водой, меньше, чем от сухого. С ростом высоты эта разница увеличивается и на высоте 25 м достигает 50 %. Такое поведение объясняется экранирующими свойствами воды в приповерхностном грунте.

С целью дальнейшего совершенствования моделей электродного слоя и глобальной электрической цепи была предложена функция, описывающая ионизацию приземной атмосферы  $q(z)$  излучением почвенных радионуклидов, состоящая из 5-ти слагаемых, определяемых удельными активностями  $^{226}\text{Ra}$  ( $^{238}\text{U}$ ),  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{40}\text{K}$  и  $^{137}\text{Cs}$ .

Вертикальные распределения плотности ионизации атмосферы за счет почвенных радионуклидов были аппроксимированы функцией

$$q(z) = B\varepsilon^{Cz+Dz^E},$$

где  $B$  – переменный коэффициент, зависящий от типа  $i$ -го радионуклида и его удельной активности  $A_i$ , Бк/кг (табл. 3);  $C$ ,  $D$  и  $E$  – постоянные коэффициенты, зависящие от типа  $i$ -го радионуклида (табл. 3).

Таблица 3. Коэффициенты функции  $q_i(z)$  для разных радионуклидов

Коэффициенты	$^{40}\text{K}$	$^{137}\text{Cs}$	Ряд $^{232}\text{Th}$	Ряд $^{235}\text{U}$	Ряд $^{238}\text{U}$
$B$	$2,47 \cdot 10^{-3} \cdot A_{^{40}\text{K}}$	$8,42 \cdot 10^{-3} \cdot A_{^{137}\text{Cs}}$	$1,69 \cdot 10^{-2} \cdot A_{^{232}\text{Th}}$	$5,12 \cdot 10^{-3} \cdot A_{^{235}\text{U}}$	$3,12 \cdot 10^{-2} \cdot A_{^{238}\text{U}}$
$C$	$-6,34 \cdot 10^{-3}$	$-1,08 \cdot 10^{-1}$	$-8,81 \cdot 10^{-2}$	$-6,44 \cdot 10^{-3}$	$-0,155$
$D$	$9,91 \cdot 10^{-4}$	0,10	$7,91 \cdot 10^{-2}$	$9,99 \cdot 10^{-4}$	0,145
$E$	1,20	1,01	1,01	1,20	1,01

Анализ коэффициентов функций  $q_i(z)$  табл. 3 показал, что суммарная функция плотности ионизации приземной атмосферы излучением почвенных радионуклидов определяется соотношением удельных активностей указанных радионуклидов. Анализ результатов моделирования также позволил определить, что вид функции  $q(z)$  будет зависеть от типа грунта, т. е. его физических параметров (состав, плотность, пористость) и степени влажности.

#### Заключение

Анализ результатов расчетов с использованием метода Монте-Карло показал, что плотность ионизации приземной атмосферы излучением почвенных радионуклидов не является постоянной величиной, сильно зависит от высоты, а также таких факторов, как плотность, пористость, влажность

грунта и соотношение удельных активностей радионуклидов  $^{235}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{226}\text{Ra}$  ( $^{238}\text{U}$ ),  $^{40}\text{K}$  и  $^{137}\text{Cs}$  в приповерхностном слое грунта.

В распределении плотности ионизации атмосферы по высоте от отдельных радионуклидов постоянный коэффициент при экспоненте определяется удельной активностью радионуклидов, а коэффициенты в показателе экспоненты – физическими параметрами грунта.

Использование традиционного представления об ионизации приземной атмосферы излучениями почвенных радионуклидов в численных моделях электродного слоя может привести к завышению результата до двух порядков по величине на высотах до 25 м.

*Работа выполнена при поддержке проектов ФЦП № 02.740.11.0738 и СО РАН № 7.63.1.1.*

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. 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.
2. Вертман Е.Г., Каратаев В.Д., Левицкий В.М., Эргашев Д.Э. Определение концентраций неравновесных изотопов урана в природных объектах ядерно-физическими методами // Аппаратура и новости радиационных измерений. – 2002. – № 3. – С. 34–43.
3. Смирнов В.В. Ионизация в тропосфере. – СПб.: Гидрометеоиздат, 1992. – 310 с.
4. Куповых Г.В., Морозов В.Н., Шварц Я.М. Теория электродного эффекта в атмосфере. – Таганрог: ТРТИ, 1998. – 124 с.
5. Атмосфера. Справочник / под ред. Ю.С. Седунова. – Л.: Гидрометеоиздат, 1991. – 511 с.
6. Hess V.P., O'Donnel G.A. On the rate of ion formation at ground level and at one meter above ground // Journal of geophysical research. – 1951. – V. 56. – P. 557–562.
7. Hess V.P., Kisselbach, V.J., Miranda H.A. Determination of the alphas emission of materials constituting the earth's surface // Journal of geophysical research. – 1956. – V. 61. – P. 265–271.
8. 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.
9. Беспалов В.И. Взаимодействие ионизирующих излучений с веществом. – Томск: Изд-во ТПУ, 2007. – 369 с.
10. Программа ICRP38 // ORNL Center for Biokinetic and Dosimetric Research. 2009. URL: <http://ordose.ornl.gov> (дата обращения: 11.04.2009).
11. Gamma-Ray Spectrum Catalogue // Региональная объединенная компьютерная сеть образования, науки и культуры Санкт-Петербурга. 2009. URL: <http://www.atom.nw.ru/catalog/nucleides.htm> (дата обращения: 11.04.2009).
12. BetaSpecALL FINAL3.xls // the RADIATION Dose Assessment Resource. 2009. URL: <http://www.doseinfo-radar.com> (дата обращения: 18.04.2009).
13. Беспалов В.И., Кольчужкин А.М., Кондратьева А.Г., Сирица О.Б. Дистанционная спектрометрия гамма-излучения // Научная сессия МИФИ-2003. Сб. научных трудов. – 2003. – Ч. 2. – С. 73–74.
14. Яковлева В.С., Каратаев В.Д., Вуколов А.В., Ипполитов И.И., Кабанов М.В., Нагорский П.М., Смирнов С.В., Фирстов П.П., Паровик Р.И. Методология многофакторного эксперимента по процессам переноса радона в системе «литосфера – атмосфера» // Аппаратура и новости радиационных измерений. – 2009. – № 4. – С. 55–60.
15. Эргашев Д.Э. Метод определения естественного и техногенного урана в объектах окружающей среды: дис. ... канд. физ.-мат. наук. – Томск: ТПУ, 2004. – 221 с.
16. Яковлева В.С., Плужникова Д.А., Нагорский П.М., Каратаев В.Д. Модель плотности ионизации атмосферы за счет радона, торона и продуктов их распада // Аэрозоли Сибири: Матер. XVI рабочей группы. – Томск, 24–27 ноября 2009. – Томск: ИОА СО РАН, 2009. – С. 40.

*Поступила 17.05.2010 г.*