

ВКЛАД ФОТОННОЙ КОМПОНЕНТЫ В ИОНИЗАЦИЮ АТМОСФЕРЫ РАДИОНУКЛИДАМИ ЗЕМНОЙ КОРЫ И РАДИОАКТИВНЫМИ ЭМАНАЦИЯМИ

© 2023 г. С. В. Анисимов¹, С. В. Галиченко¹ *, Е. В. Климанова¹,
А. А. Прохорчук¹, К. В. Афиногенов¹

¹Геофизическая обсерватория “Борок” филиал Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН,
п. Борок, Ярославская обл., Россия

*E-mail: svga@borok.yar.ru

Поступила в редакцию 12.12.2022 г.

После доработки 12.04.2023 г.

Принята к публикации 11.05.2023 г.

В работе исследуется вклад γ -излучения естественных радионуклидов, входящих в состав земной коры, радиоактивных эманаций и их продуктов распада в грунте в интенсивность образования ионных пар в атмосфере на фоне ионизации атмосферы радиоактивными газами, поступающими в атмосферу из грунта, и распространяющимися совместно со своими короткоживущими дочерними продуктами. Оценка плотности потока радона в атмосферу выполнена тремя методами: методом резервуара, интегрированием высотных профилей объемной активности радона, на основе γ -спектрометрических наблюдений и диффузионной модели. Вычисление распределения дозы γ -излучения от почвенных радионуклидов в грунте и атмосфере реализовано на основе программного инструментария Geant4. Моделирование распространения изотопов радона и продуктов их распада в атмосфере выполняется на основе вихреразрешающей модели, оснащенной блоком кинематической симуляции подсеточного переноса пассивного скаляра. Показано, что в зависимости от удельной активности радионуклидов в грунте, параметров грунта и турбулентного режима атмосферы суммарный вклад земного γ -излучения в интенсивность образования ионных пар в атмосферном пограничном слое составляет приблизительно от 1 до 20% и возрастает при уменьшении проницаемости верхнего слоя грунта для радиоактивных эманаций.

Ключевые слова: ионизация атмосферы, гамма-излучение, гамма-спектрометр, радон, торон, Geant4, вихреразрешающее моделирование.

DOI: 10.31857/S0002333723060029, **EDN:** WMDEUS

ВВЕДЕНИЕ

Ионизация атмосферы – процесс образования ионов из газовых молекул вследствие их взаимодействия с энергичными частицами космических лучей, α - и β -частицами, возникающими в результате распада радиоактивных ядер, а также фотонной компонентой – γ -квантами, испускаемыми при стабилизации возбужденных состояний ядер радионуклидов. В нижней атмосфере, над сушей, существенный вклад в суммарную интенсивность образования ионных пар вносят радионуклиды земной коры как за счет непосредственной эмиссии энергичных электронов и γ -квантов, так и за счет эманирования радиоактивных изотопов инертного газа радона [Смирнов, 1992; Зукау и др., 2010; Анисимов и др., 2017].

Образующиеся в земной коре в результате последовательности радиоактивных распадов урана

^{238}U и тория ^{232}Th изотопы радона ^{222}Rn и ^{220}Rn (периоды полураспада 3.82 суток и 55.6 с соответственно) эманруют в трещины и поры грунта, после чего, в основном за счет диффузии, проникают в атмосферу, где совместно со своими радиоактивными дочерними продуктами участвуют в ее ионизации [Porstendörfer, 1994; Dueñas et al., 1997; Laakso et al., 2004; Hassan et al., 2009; Zhang et al., 2011]. Рассматриваемая на больших временных интервалах плотность потока изотопов радона в атмосферу определяется концентрацией эманлирующих радионуклидов в земной коре и литологическим составом пород [Pearson, Jones, 1965; Sun et al., 2004; Kardos et al., 2015]. Вследствие высокой растворимости радона в воде плотность его потока в атмосферу также зависит от влагосодержания почвы, которое, в свою очередь, определяется ее типом, пористостью, интенсивностью

осадков и испарения [Sun et al., 2004; Hosoda et al., 2009; Яковлева, 2010; Яковлев и др., 2020; Яковлев, Яковлева, 2020].

Высотное распределение в атмосфере фоновой интенсивности и энергетический спектр γ -излучения, продуцируемого элементами радиоактивных рядов широко распространенных в земной коре ^{235}U , ^{238}U , ^{232}Th , а также ^{40}K зависят от концентрации радионуклидов и коэффициента поглощения γ -излучения в грунте. Вариации фоновой интенсивности γ -излучения в атмосфере связывают с влиянием тектонической активности и метеорологических явлений на содержание γ -активных элементов в нижней атмосфере, почве и на ее проницаемость для радона и γ -квантов [Grasty, 1997; Greenfield et al., 2002; Inomata et al., 2007; Burnett et al., 2010; 2017; 2018; Melintescu, 2018; Tchorz-Trzeciakiewicz, Solecki, 2018; Яковлев, Яковлева, 2020; Tchorz-Trzeciakiewicz, Rysiukiewicz, 2021; Yakovleva et al., 2021; Rizzo et al., 2022]. Таким образом, ионизация атмосферы радионуклидами земной коры с участием радиоактивных эманаций и γ -излучения представляют собой аспекты единого процесса.

Цель настоящей работы состоит в оценке характерных значений и диапазона варибельности вклада земного γ -излучения в интенсивность образования ионных пар в воздухе, обусловленную распадами радионуклидов земной коры и радиоактивных эманаций в зависимости от их концентрации, параметров составляющей грунт породы, влагосодержания грунта и параметров, характеризующих турбулентный режим нижней атмосферы.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Натурные наблюдения проводились на полигоне ГО “Борок” ИФЗ РАН [58°04' N; 38°14' E]. Для измерения энергетического распределения и идентификации γ -излучающих радионуклидов в условиях естественного залегания применялся спектрометр гамма-излучения МКСП-01 “РАДЭК” (ООО “Научно-технический центр “РАДЭК”, Россия). В спектрометре установлен детектор БДЕГ-150 NaI(Tl). БДЕГ-150 представляет собой детектор сцинтилляционного типа, чувствительным элементом которого является кристалл NaI(Tl) с площадью 825 см². Диапазон регистрируемых энергий γ -излучения от 0.1 до 3 МэВ.

В качестве сенсора объемной активности (ОА) радона применялся датчик AlphaGuard PQ2000, измеряющим элементом которого является ионизационная камера с высоковольтным источником питания. Исследуемый воздух поступает в

камеру или в свободном диффузионном режиме, или с помощью принудительной прокачки воздуха. Датчик регистрирует 50 отсчетов в минуту при объемной активности ^{222}Rn равной 1 кБк/м³. При измерениях в зимние месяцы была организована система подведения воздуха с улицы, а сам прибор находился в обогреваемом помещении.

Также в качестве сенсора ОА радона использовались датчики Radon Scout PMT, построенные на базе ячейки Лукаса с принудительной прокачкой исследуемого воздуха. Регистрация распадов ^{222}Rn происходит с помощью фотоэлектронного умножителя и цифровой системы управления и накопления данных. Датчик регистрирует 30 отсчетов в минуту при ОА ^{222}Rn равной 1 кБк/м³. Чувствительность датчика составляет не менее 1 СРМ (counts per minute – отсчетов в минуту) при 20 Бк/м³. Фиксация данных с обоих датчиков происходит с разрешением 1 измерение за 10 мин.

Оценка плотности потока радона в атмосферу проводилась тремя методами. Метод аккумулятора [Wilkening et al., 1972; Dueñas et al., 1997; Griffiths et al., 2010; Rizzo et al., 2022], основанный на измерении скорости накопления радона в резервуаре, установленном на поверхность грунта, применялся в 2017 и 2018 гг. Наблюдения ОА радона проводились как в резервуаре, так и снаружи. Для уменьшения утечки, связанной с вентилированием верхнего слоя почвы резервуар устанавливался с заглублением от 10 до 60 см в слой грунта. Внутри резервуара приборы устанавливались на подставку, на высоте 30 см от поверхности земли. Снаружи приборы устанавливались в метеорологическую будку на высоте 30 см над поверхностью земли. Для работы был выбран ряд дней, удовлетворяющих условиям хорошей погоды (отсутствие осадков, ясная или малооблачная погода, скорость горизонтального ветра не более 5 м/с). Наблюдения в 2017 г. проводились с 17 по 30 мая. Период наблюдений в 2018 г. составил 34 дня в августе и сентябре.

Второй метод оценки плотности потока радона заключается в интегрировании высотных профилей ОА радона в атмосфере. Высотные профили измерялись с помощью привязного аэростата, поднимающего инструментальную платформу, на которой размещены датчик ОА радона Radon Scout PMT, метеорологический модуль, GPS/ГЛОНАСС приемник, автономная система сбора информации с возможностью связи по WiFi и аккумуляторный блок питания [Анисимов и др., 2017a]. Метеорологический модуль регистрирует температуру и относительную влажность воздуха, барометрический альтиметр регистрирует высоту

подъема платформы с точностью до 10 см. Метеорологический модуль содержит акселерометр-гироскоп и цифровой MEMS компас, которые дополняют набор телеметрических данных платформы. Автоматизированная автономная система сбора данных выполнена на основе одноплатного микроЭВМ RaspberryPI и работает под управлением Debian GNU/Linux. Системное время микроЭВМ синхронизируется по GPS/ГЛОНАСС сигналу, и весь сбор данных осуществляется в соответствии с этим временем. Также происходит регистрация координат и высоты над уровнем моря, получаемых с GPS/ГЛОНАСС приемника. Для оценки средней плотности потока радона F использовалось приближенное одномерное уравнение баланса

$$F = \int_0^h A(z) dz, \quad (1)$$

в котором $A(z)$ — измеренная ОА радона. Для минимизации погрешности измерения проводились утром, когда высота слоя конвективного перемешивания h не значительно отличалась от высоты подъема аэростатной платформы.

Третий метод относится к косвенным и предусматривает измерение энергетического спектра исходящего с поверхности земли γ -излучения, по результатам которого с помощью заранее выполненной калибровки выполняется оценка удельной активности ^{238}U и ^{232}Th в грунте. Затем, в предположении векового равновесия в радиоактивных рядах урана и тория, а также малости скорости вертикальной адвекции изотопов радона в поровом пространстве грунта ($|u_d| \leq 10^{-4}$ см/с) для оценки плотности потока изотопов радона с поверхности используется уравнение [Яковлева, 2010; Griffiths et al., 2010; Ongori et al., 2015]:

$$F = C_{\text{Ra}} \rho (1 - \eta) E \sqrt{\lambda D_{\text{eff}}}, \quad (2)$$

где: C_{Ra} — удельная активность (в Бк/кг) соответствующего изотопа радия (^{226}Ra или ^{224}Ra) в грунте с плотностью породы ρ и пористостью η (доля объема грунта, занятая воздухом или водой); E — безразмерный коэффициент эманирования радона (торона); λ — постоянная распада радона (торона); D_{eff} — эффективный коэффициент диффузии радона в грунте. Оценка эффективного коэффициента диффузии в зависимости от влагосодержания грунта и коэффициента эманирования выполнена на основе экспериментальных результатов, полученных в работах [Singh et al., 1993; Sun et al., 2004; Prasad et al., 2012; Ryzhakova, 2014; Ye et al., 2017]. Регистрируемый энергетический спектр γ -излучения содержит фоновую компоненту вторичных галактических космических лу-

чей (ГКЛ), оценка вклада которой позволяет выполнить коррекцию определений удельной активности радионуклидов, содержащихся в грунте, на основе результатов спектрометрических измерений. Для оценки вклада ГКЛ в диапазоне энергий 1460 ± 60 кэВ (пик ^{40}K) и 2550 ± 60 кэВ (пики ^{214}Bi в цепочке распадов ^{238}U и ^{208}Tl в цепочке распадов ^{232}Th) использовался свинцовый экран в форме диска радиусом 0.36 м и толщиной 1 см, который устанавливался над детектором для ослабления γ -излучения, приходящего из телесного угла, определяемого высотой установки экрана. Сравнительный статистический анализ разности количества зарегистрированных в единицу времени γ -квантов за 15 ч измерений в нормальном режиме и 11 ч измерений в условиях частичного экранирования детектора показал, что вклад космического фона на уровне земли в указанных энергетических диапазонах составляет $(1.8 \pm 12.7)\%$ для линии 1460 кэВ и $(3.3 \pm 16.5)\%$ для линии 2550 кэВ от измеренной величины с учетом среднеквадратичного отклонения.

Вычисление распределения дозы ионизирующего γ -излучения от почвенных радионуклидов в грунте и атмосфере реализовано на основе программного инструментария Geant4 [Allison et al., 2016; Yakovleva et al., 2022], обеспечивающего настройку трекинга, геометрии, физической модели и обработку взаимодействий частиц и излучения с мишенями. При моделировании учитываются вторичные частицы и кванты электромагнитного поля, в том числе тормозного излучения, и каскадный характер взаимодействия излучения с материалом почвы и воздухом. Земля и атмосфера в модели представляются прямоугольными параллелепипедами, соприкасающимися по одной грани. Горизонтальная и вертикальная протяженность этих параллелепипедов достаточна для полного поглощения самых энергичных из рассматриваемых гамма-квантов. Источником излучения служит 1 м^3 грунта. Верхняя горизонтальная грань источника находится в плоскости границы “земля-атмосфера”. Для проведения расчетов выбраны радионуклиды цепочки распада урана-238 и тория-232, всего 23 изотопа. Спектры гамма-излучения каждого изотопа были в специальном формате заданы на входе приложения. Направление вылета гамма-кванта задается изотропным, место излучения гамма-кванта равномерно распределено по ограниченному в объеме источнику. Материал грунта в приложении обозначался как объект с заданной плотностью, свойства которого определялись массовыми долями входящих в него сложных веществ. Все используемые сложные вещества находились в базе данных материалов Geant4. Используемые составы почв описыва-

лись непосредственно в коде приложения. Плотность атмосферы была задана постоянной. Модель физики в Geant4 может быть собрана из классов, входящих в состав Geant4, обозначающих отдельные физические процессы и эффекты. Модели физики в инструментарии также поставляются наборами таких классов. В настоящей работе использовался самый подробный для физики электромагнитного взаимодействия класс “G4EmStandardPhysics_option4”, в котором определены: множественное рассеивание электронов (модель Гудсмита–Соундерсона), производство электрон-позитронных пар (модель Бете–Хейтлера [Bernard, 2018]), комптоновское рассеивание (модель университета Монаша), фотоэффект и рэлеевское рассеивание (данные и модели Ливерморской национальной лаборатории), флюоресценция, ядерное торможение, тормозное излучение (модель Зельтцера и Бергера), ионная ионизация. Класс тщательно обрабатывает пересечение частицами границ моделей объектов: слоя почвы и атмосферы. Требуемая точность вычисления сечений обеспечивается заданием количества расчетных точек, распределенных линейно по логарифмической шкале энергии, приходящихся на один порядок. В Geant4 определены более 100 типов частиц, участвующих в моделируемых физических процессах. Во избежание “инфракрасной катастрофы” при численном моделировании для всех частиц, или для отдельных типов частиц, или для всех частиц в отдельной области задается нижний предел энергии для производства вторичных частиц. Этот предел энергии вычисляется на основе заданной минимальной длины пути в заданном материале для вторичной частицы, которая была оставлена в значении по умолчанию для вышеупомянутого физического набора. В результате работы приложения формируется вертикальный профиль поглощенной дозы ионизирующего излучения для заданного состава грунта. Постоянные распада урана-238, тория-232 и их массовые концентрации в почве являются коэффициентами линейной комбинации при суммировании дозы ионизирующего излучения от активности почвенных радионуклидов с учетом радиоактивного равновесия между исходными и дочерними продуктами радиоактивных рядов. Вычисление высотного распределения интенсивности образования ионных пар в атмосфере определяется на основе удельной на единицу объема суммарной мощности поглощенной дозы γ -излучения, исходя из средней энергии на образование одной ионной пары 32.5 эВ [Binks, 1954].

Моделирование распространения изотопов радона и продуктов их распада в атмосфере выполняется на основе вихререзающей модели PALM v. 6.0 [Maronga et al., 2020], оснащенной блоком кинематической симуляции подсеточного переноса пассивного скаляра [Anisimov et al., 2020]. Поскольку основными параметрами, определяющими высотный профиль интенсивности образования ионных пар в атмосфере за счет последовательности распадов радиоактивных газов и дочерних продуктов, являются плотности потоков радона и торона, а также плотности вертикальных турбулентных потоков явного и скрытого тепла с земной поверхности, характеризующие тип температурной стратификации, турбулентный режим и высоту атмосферного пограничного слоя, при моделировании учитывался типичный диапазон изменчивости указанных переменных. Плотности потоков радона и торона в атмосферу определяются уравнением (2), соотношение плотностей турбулентных потоков явного и скрытого тепла (коэффициент Боуэна) зависит от типа земной поверхности.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты оценки плотности потока радона в атмосферу, полученные методом аккумулятора, показаны на рис. 1, и дают приблизительный диапазон значений от 20 до 40 мБк м⁻² с⁻¹. Поскольку измерения при различной величине заглубления боковых стенок резервуара проводились в нескольких местах и в разные дни, исходя из полученных данных, можно сделать вывод, что пространственная изменчивость плотности потока радона на горизонтальных масштабах ~10 м сопоставима по величине с изменчивостью во времени на интервалах времени в несколько суток. На рис. 2 показан усредненный суточный ход объемной активности радона вне резервуара. В условиях дневной конвекции высотное распределение изотопа ²²²Rn близко к однородному [Williams et al., 2011], поэтому используя полученную методом аккумулятора оценку плотности потока радона в атмосферу и среднее значение ОА радона 10 Бк/м³, можно с помощью (1) получить оценку высоты слоя конвективного перемешивания $h \sim 1\text{--}2$ км. Такая оценка является завышенной и может быть улучшена при учете неоднородности высотного профиля пассивного скаляра [Waggy et al., 2013].

Оценка средней по некоторой пространственной области плотности потока радона в атмосферу, основанная на интегрировании высотных профилей ОА радона (рис. 3), которые были получены

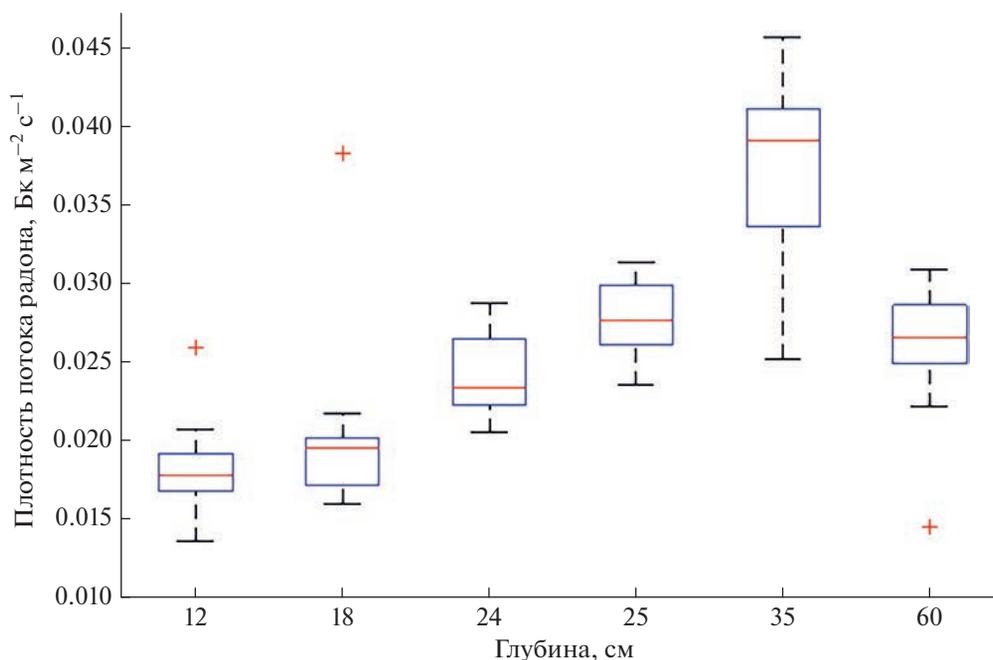


Рис. 1. Результаты оценки плотности потока ^{222}Rn методом аккумулятора на различной глубине. Измерения проводились на полигоне ГО “Борок” ИФЗ РАН в августе и сентябре (всего 34 дня) 2018 г.

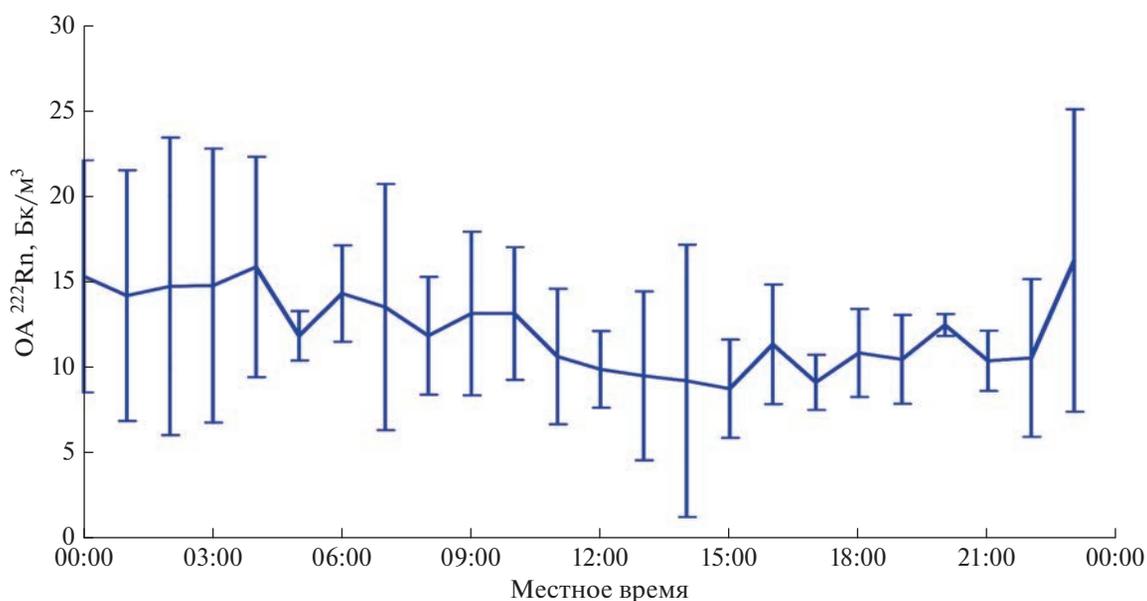


Рис. 2. Суточный ход ОА ^{222}Rn вблизи земной поверхности по результатам натуральных наблюдений на полигоне ГО “Борок” ИФЗ РАН 17–22 мая 2017 г.

датчиком на платформе привязного аэростата с 16.08 по 21.09.2017 г. (всего 13 профилей), оказалась ниже значений, полученных методом аккумулятора, и составила 7.16 ± 3.23 мБк м⁻² с⁻¹. Возможными причинами меньших значений оце-

ненной таким образом плотности потока могут быть как фактическое отсутствие выхода радона с поверхности окрестных водоемов и заболоченных территорий, в том числе Рыбинского водохранилища, так и вертикальный перенос радона

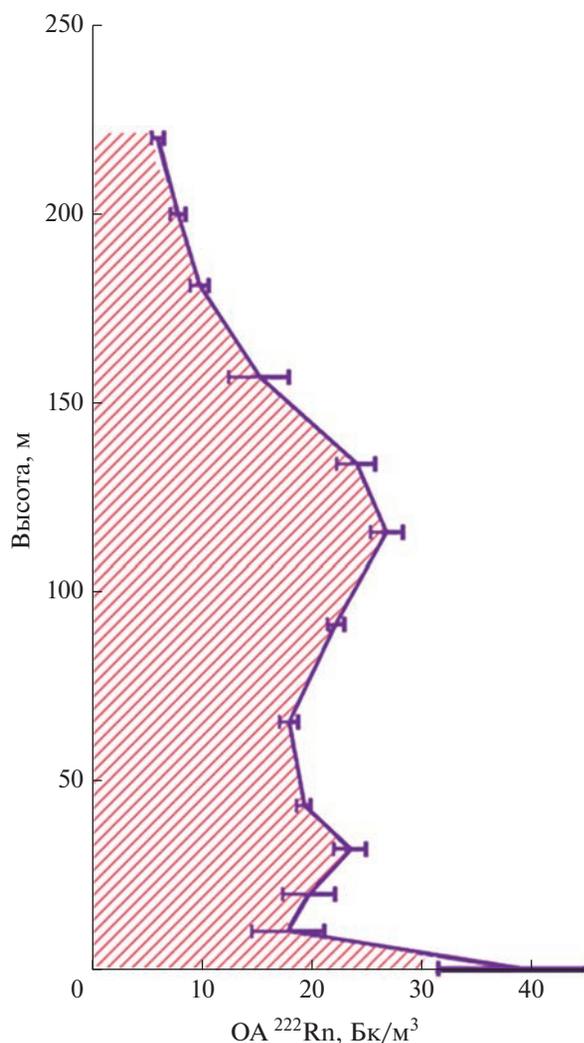


Рис. 3. Высотный профиль $OA^{222}Rn$, полученный в результате усреднения измерений датчиком на платформе привязного аэростата. Измерения проводились на полигоне ГО “Борок” ИФЗ РАН в августе и сентябре (всего 13 профилей) 2018 г.

выше максимальной точки измеренного высотного профиля, приводящий к эффекту вентилирования приземной атмосферы во время утреннего развития конвекции.

В результате измерений энергетических спектров γ -излучения естественных радиоактивных элементов ^{238}U , ^{232}Th , ^{40}K и их дочерних продуктов с помощью спектрометра МКСП-01 “РАДЭК” получены оценки концентрации и удельной активности начальных радионуклидов в грунте, приведенные в табл. 1. Пример среднего за 12 часов зарегистрированного спектра γ -излучения показан на рис. 4. Для оценки диапазона плотностей потоков радона и торона в атмосферу на основе средних значений удельной активности урана-

238 и тория-232 из табл. 1 будем использовать следующие характерные значения параметров, входящих в (2): $\rho = 2.6 \times 10^3 \text{ кг/м}^3$, $\eta = 0.4$, $E = 0.2$, $10^{-6} \text{ м}^2/\text{с} \leq D_{eff} \leq 4 \times 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ [Hosoda et al., 2009; Яковлева, 2010]. Тогда получим для $F(^{222}Rn) = 6.7 \pm \pm 3.8 \text{ мБк м}^{-2} \text{ с}^{-1}$ и $F(^{220}Rn) = 1.07 \pm 0.57 \text{ Бк м}^{-2} \text{ с}^{-1}$. Спектрометрическая оценка плотности потока радона $F(^{222}Rn)$ согласуется с оценкой, полученной с использованием аэростатных наблюдений и меньше оценки, полученной методом аккумулятора. Следует отметить, что измерения методом аккумулятора и γ -спектрометрические наблюдения проводились на различных участках, поэтому некоторое расхождение оценок может быть следствием как неоднородности концентрации ^{226}Ra в грунте, так и методологических погрешностей, а также ряда допущений, используемых при выводе (2) и неопределенности в значениях используемых параметров, особенно имеющих широкий разброс коэффициентов эманирования и диффузии радона в грунте.

На рис. 5 показаны диапазоны изменения плотностей потока радона и торона, рассчитанные с помощью (2) для нескольких значений пористости η и коэффициента насыщенности пор водой w , который связан с влагосодержанием грунта C_w (отношения массы воды к массе сухого грунта) следующим выражением:

$$C_w = \frac{\rho_w}{\rho} \frac{\eta w}{1 - \eta}, \quad (3)$$

где ρ_w – плотность воды. Полученные оценки согласуются с результатами работ [Dueñas et al., 1997; Sun et al., 2004; Hosoda et al., 2009; Prasad et al., 2012] и могут служить входными параметрами для расчета высотных профилей интенсивности образования ионных пар в атмосфере вследствие ее ионизации энергичными α - и β -частицами в последовательности распадов, начинающихся с радона и торона и оканчивающихся изотопами свинца ^{210}Pb и ^{212}Pb . Период полураспада изотопа ^{212}Pb составляет 10.64 ч, и вклад ^{212}Pb в образование ионных пар в атмосфере можно не учитывать [Guedalia et al., 1973; Porstendörfer, 1994], тем более это справедливо для ^{210}Pb с периодом полураспада 22.3 года.

Рассмотрим особенности сезонного хода приземной ОА радона в зависимости от суммарного числа дней в месяце с осадками, косвенно характеризующим влагосодержание почвы, на примере результатов 2020 г., полученных следующим образом. С учетом инструментальных ограничений прибора AlphaGUARD PQ2000, не позволяющих проводить регистрацию при влажности $>95\%$ и температуре ниже -10°C , для каждого ме-

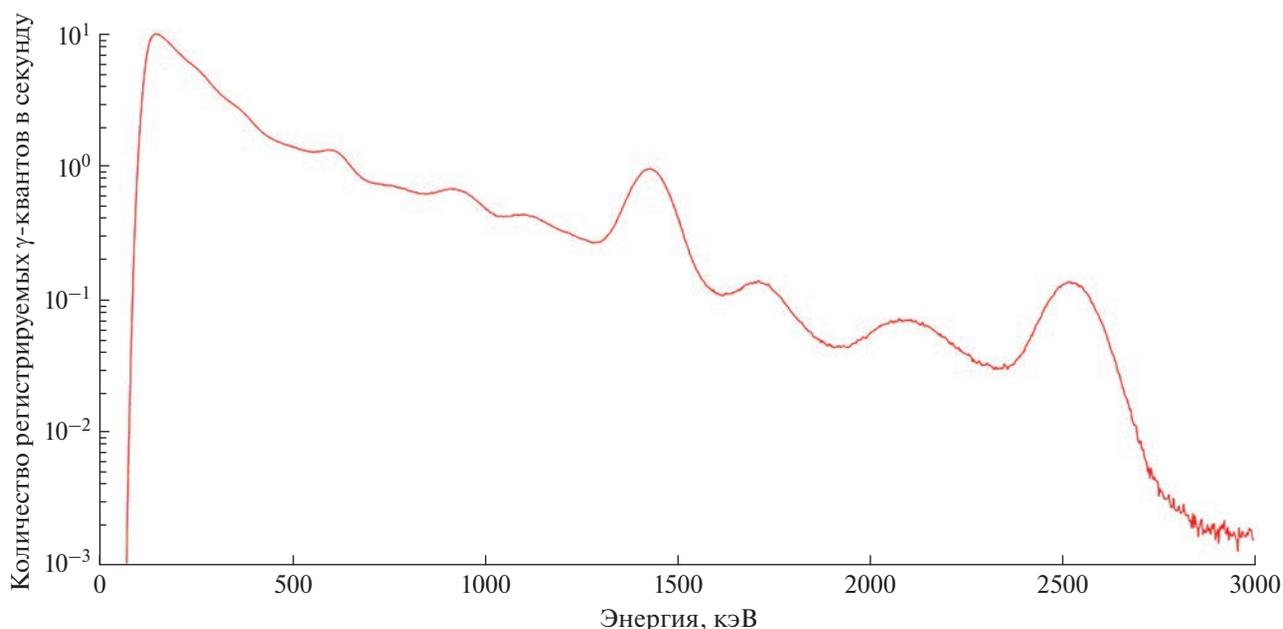
Таблица 1. Результаты оценки концентрации, удельной активности радионуклидов в грунте на основе γ -спектрометрических измерений

Начальный радионуклид	Средняя концентрация, удельная активность	Среднеквадратичное отклонение
^{40}K	1.94 мг/кг, 514.5 Бк/кг	0.34 мг/кг, 90.0 Бк/кг
^{238}U	0.722 мг/кг, 9.03 Бк/кг	0.204 мг/кг, 2.55 Бк/кг
^{232}Th	4.65 мг/кгб 18.91 Бк/кг	1.12 мг/кг, 4.58 Бк/кг

сяца набирались максимально длинные ряды данных наблюдений и строилась диаграмма “ящик с усами”, показанная на рис. 6, вместе с количеством дней, в которые наблюдалось выпадение различных осадков (включая длительную морось и мокрый снег). Можно заметить, что вместе с увеличением количества дней с осадками происходит снижение ОА радона, при этом уменьшаются как среднее за месяц значение, так и отметки верхних процентилей. Снижение ОА радона во время осадков связано как с вымыванием радона из атмосферы, так и с замедлением его выхода из грунта, проницаемость которого уменьшается в связи с увлажнением. Вместе с

тем во время осадков отмечается увеличение мощности поглощенной дозы фонового γ -излучения [Greenfield et al., 2002; Inomata et al., 2007; Yakovleva et al., 2021]. В работе [Grasty, 1997] указанный эффект связывается с аккумуляцией радиоактивных эманаций в приповерхностном слое грунта, приводящей к временному нарушению радиоактивного равновесия, в результате чего увеличивается суммарная γ -активность дочерних продуктов распада радона и торона, в основном ^{214}Bi и ^{208}Tl .

Для оценки вклада γ -излучения в суммарную ионизацию атмосферы радионуклидами земной коры и радиоактивными газами ^{220}Rn и ^{222}Rn в за-

**Рис. 4.** Энергетический спектр фонового γ -излучения, зарегистрированный 28.10.2022 г., накопление 46000 отсчетов, усреднение 12.78 ч.

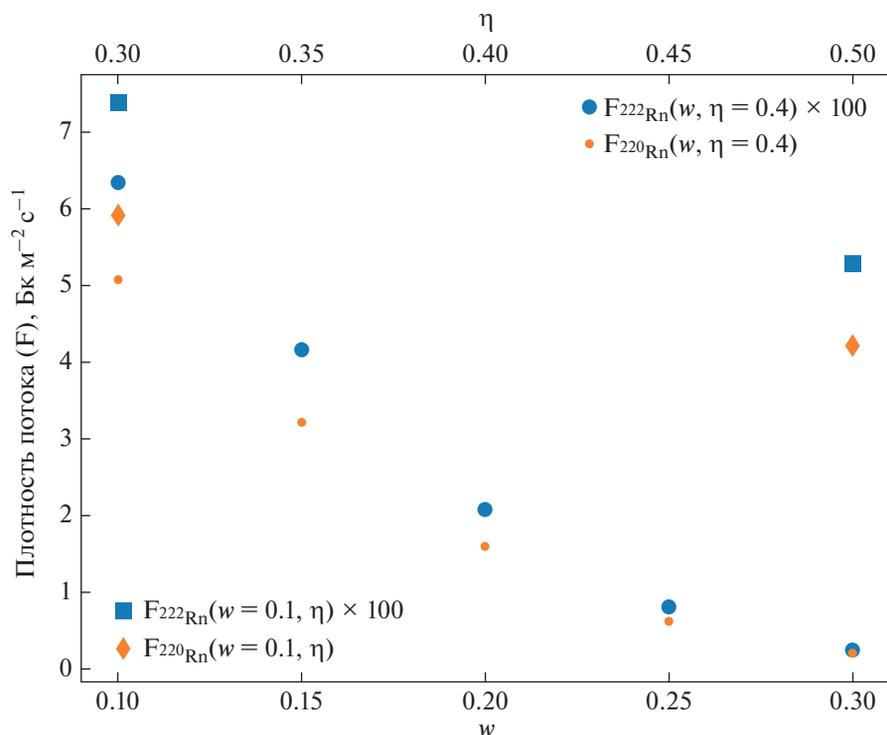


Рис. 5. Рассчитанные по уравнению (2) плотности потоков ^{222}Rn и ^{220}Rn на основе данных, взятых из национального атласа почв Российской Федерации (электронная версия: <https://soil-db.ru/soilatlas>) и из работы [Яковлев, 2010].

висимости от параметров грунта (табл. 2) и турбулентного режима атмосферы, характеризуемого плотностью вертикального турбулентного потока явного тепла с поверхности H_s и коэффициентом Боуэна B (табл. 3), выполнены расчеты высотного распределения интенсивности образования ион-

ных пар γ -излучением семейств однородно распределенных в грунте ^{40}K , ^{238}U , ^{232}Th в предположении радиоактивного равновесия дочерних продуктов с предшественниками. Удельные активности исходных радионуклидов приняты равным средним значениям из табл. 1. На основе

Таблица 2. Состав, влагосодержание, пористость и плотность почв

Код	Тип почвы	Массовые доли в сухой вывеске, %			Содержание воды, доли от массы сухой вывески, %	η, %	Плотность сухой вывески, кг/м ³
		SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃			
g1	Подбуры тундровые	89	3	8	10	40	1710
g2	Подбуры сухоторфяные	66	22	12	—	—	1931
g3	Подзолистые	79	5	16	—	—	1851
g4	Подзолы	74	16	10	—	—	1849
g5	Подзолистые	79	5	16	15	—	1851
g6	—	—	—	—	20	—	—
g7	—	—	—	—	25	—	—
g8	—	—	—	—	30	—	—
g9	—	—	—	—	10	30	2160
g10	—	—	—	—	—	50	1543

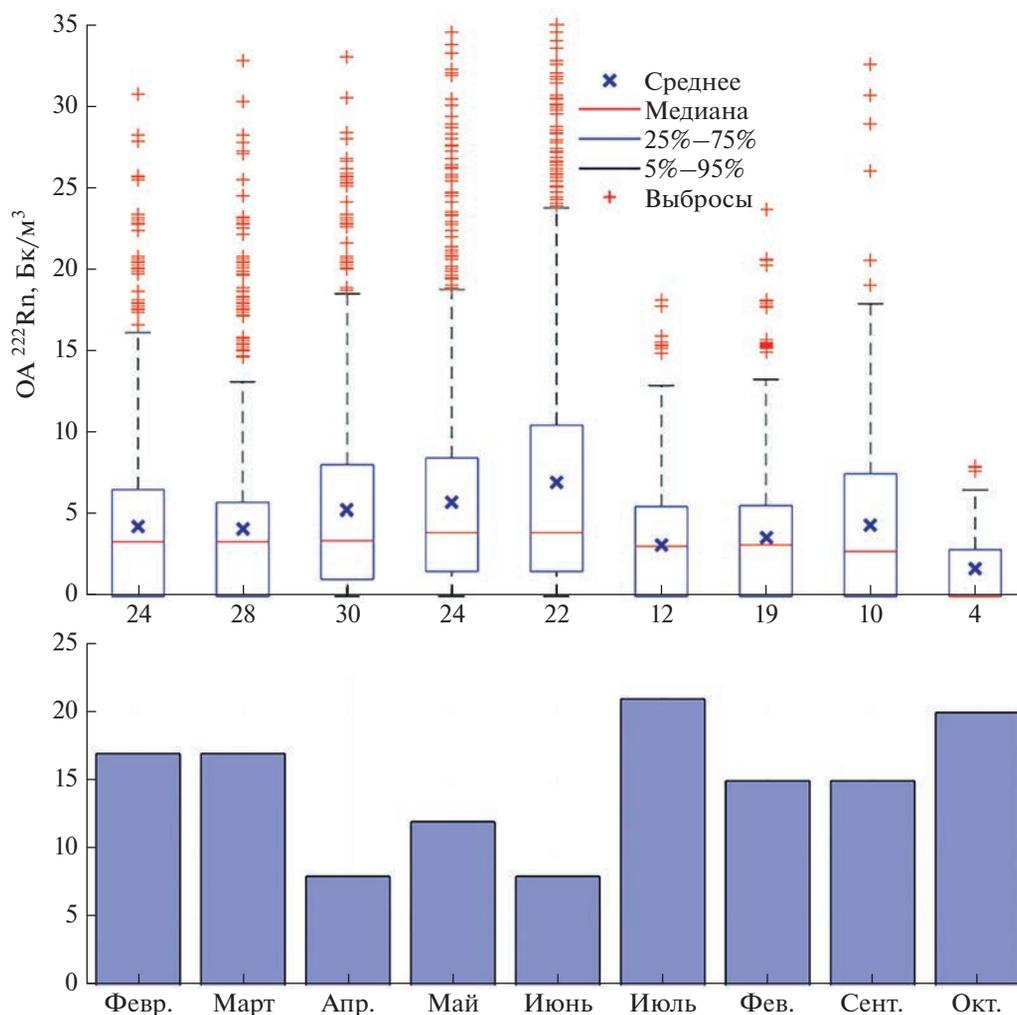


Рис. 6. Изменчивость $OA^{222}Rn$ по месяцам 2020 г. и количество дней с осадками. Числа на горизонтальной оси показывают количество дней наблюдений $OA^{222}Rn$.

вихреразрешающего моделирования вычислены средние за 1 ч высотные профили OA изотопов радона и соответствующие средние высотные профили интенсивности ионообразования.

На рис. 7 показана вычисленная с помощью Geant4 интенсивность образования ионных пар в атмосфере исходящим с земной поверхности γ -излучением в зависимости от высоты для наборов параметров грунта, приведенных в табл. 2. Высотная зависимость имеет экспоненциальный характер с масштабом 140 м. Параметры грунта оказывают незначительное влияние, что позволяет использовать в моделях ионизации атмосферы экспоненциальную параметризацию, масштабированную зависящим от параметров грунта множителем. Однако учет осадков, смывающих радиоактивные газы и аэрозольные частицы вместе с дочерними продуктами их распада, а также приводящих к уменьшению

проницаемости грунта для изотопов радона, приводит к заметному увеличению интенсивности образования ионных пар γ -излучением с поверхности земли, несмотря на некоторый рост мощности поглощенной дозы в грунте за счет заполнения части порового пространства водой.

Таблица 3. Параметры вихреразрешающей модели

Код	$H_s, \text{Вт} \cdot \text{м}^{-2}$	B
s1	50	0.5
s2	100	0.5
s3	100	2.0
s4	200	2.0

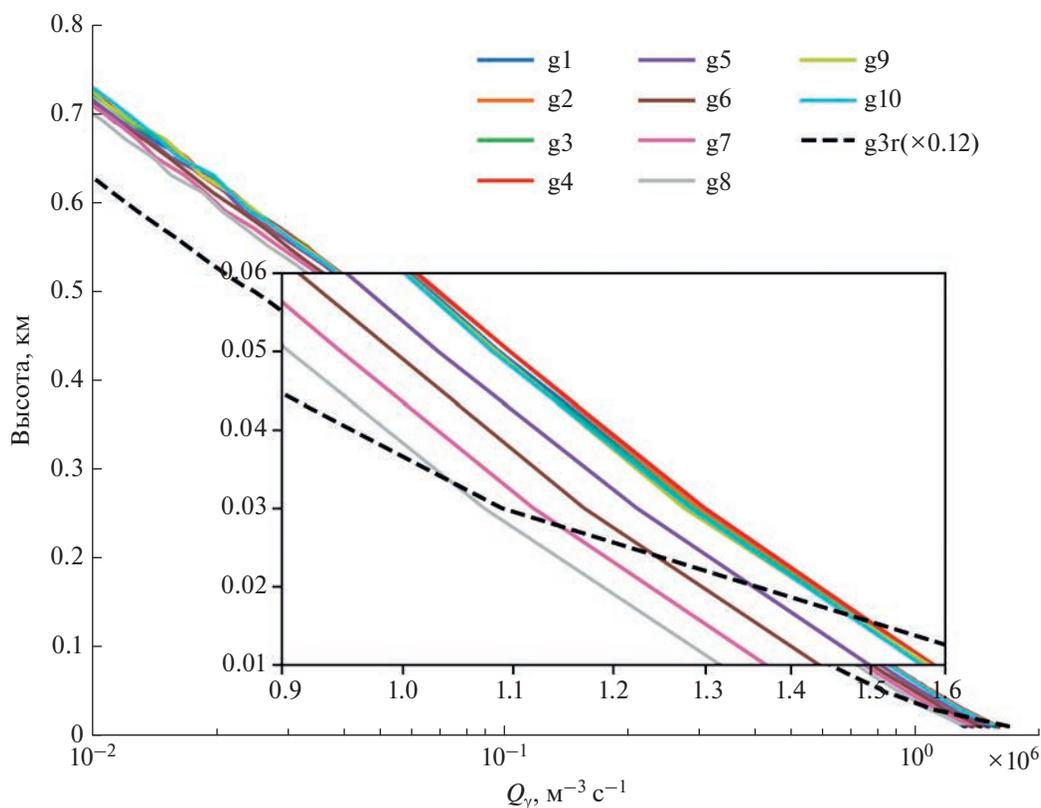


Рис. 7. Рассчитанная высотная зависимость интенсивности образования ионных пар в атмосфере γ -излучением с земной поверхностью. Расшифровка индексов параметров грунта приведена в табл. 2. Пунктиром показан результат моделирования в условиях непроницаемости для изотопов радона верхней границы грунта и осаждения на поверхность всех учитываемых дочерних продуктов распада ^{226}Ra и ^{224}Ra из атмосферы.

На рис. 8 показаны высотные профили суммарной интенсивности ионообразования для двух различных наборов параметров грунта из табл. 2 (g4, g8), отвечающих за плотность потока радиоактивных газов, и четырех параметров из табл. 3 (s1–s4), характеризующих турбулентный режим атмосферы. Для сравнения показан вклад ГКЛ на геомагнитной широте 54° в периоды минимума и максимума солнечной активности, рассчитанный на основе параметризации, использованной в работе [Anisimov et al., 2020]. Как видно из графика, определяющим параметром высотного распределения интенсивности ионообразования радионуклидами земной коры и радиоактивными газами является высота атмосферного пограничного слоя, в свою очередь зависящая от плотностей турбулентных потоков явного и скрытого тепла с поверхности. Наибольший градиент интенсивности ионообразования формируется близи земной поверхности в первых нескольких десятках метров, в основном за счет короткоживущих ядер ^{220}Rn и ^{216}Po , и около верхней границы слоя перемешивания, за счет ^{222}Rn и его

короткоживущих дочерних продуктов ^{218}Po , ^{214}Pb , ^{214}Bi , ^{214}Po .

Рис. 9 иллюстрирует распределение по высоте доли интенсивности ионообразования, приходящейся на γ -излучение с земной поверхности, рассчитанное для тех же наборов параметров, что и на рис. 8. На основании полученных результатов можно сделать вывод, что вклад γ -излучения Q_γ в суммарную ионизацию атмосферы Q_Σ обладает значительной вариабельностью, увеличивается с высотой в области больших градиентов объемной активности радона, а именно, в приземном слое и около верхней границы слоя перемешивания, уменьшается с высотой в слое перемешивания. Для сравнения, средняя по атмосферному пограничному слою величина Q_γ/Q_Σ в моделях g4 находится в диапазоне $(1.25\text{--}1.36) \times 10^{-2}$, в моделях g8 – в диапазоне 0.20–0.22. Таким образом, суммарный вклад γ -излучения с земной поверхности в ионизацию атмосферного пограничного слоя в типичном диапазоне плотностей потока радона и торона составляет приблизительно от 1% до 20%.

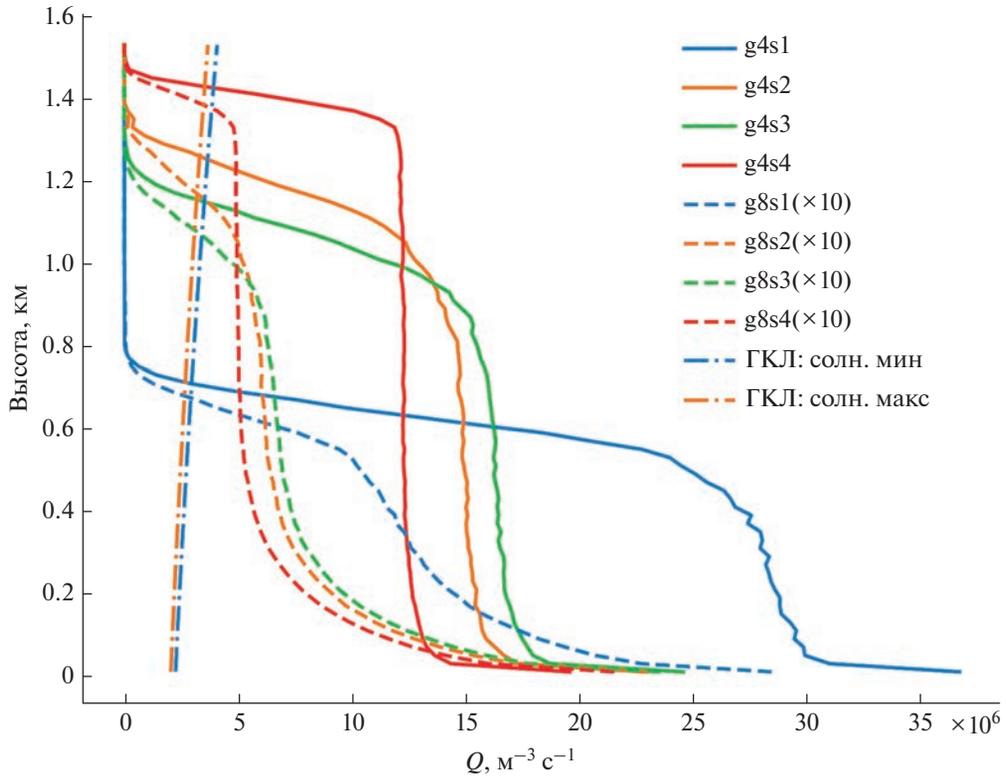


Рис. 8. Рассчитанные высотные профили интенсивности ионообразования за счет ГКЛ в минимуме и максимуме солнечной активности для геомагнитной широты ГО “Борок” ИФЗ РАН и суммарной интенсивности ионообразования радионуклидами земной коры вместе с цепочками распадов ^{220}Rn и ^{222}Rn в атмосфере для наборов параметров грунта (g4, g8) из табл. 2, определяющих плотность потока радиоактивных газов, и четырех параметров (s1–s4) из табл. 3, характеризующих турбулентный режим атмосферы.

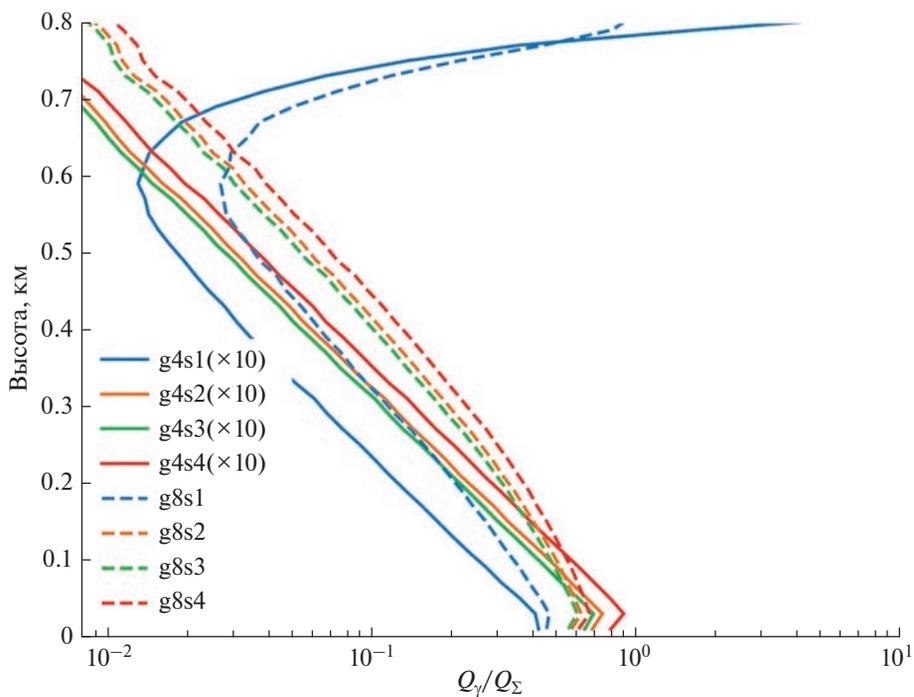


Рис. 9. Рассчитанные высотные профили приходящейся на γ -излучение с земной поверхности доли интенсивности ионообразования, нормированной на суммарную величину от всех учитываемых в модели источников ионизации земного происхождения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Три оценки плотности потока радона на полигоне ГО “Борок” ИФЗ РАН [58°04' N; 38°14' E], выполненные разными методами в разное время на различных участках земной поверхности, дали близкие результаты: 1) методом резервуара от 20 до 40 мБк м⁻² с⁻¹; 2) интегрированием высотных профилей ОА радона 7.16 ± 3.23 мБк · м⁻² с⁻¹; 3) на основе γ -спектрометрических наблюдений и диффузионной модели 6.7 ± 3.8 мБк м⁻² с⁻¹. Оценка плотности потока торона на основе γ -спектрометрических наблюдений и диффузионной модели дала при тех же параметрах грунта 1.07 ± 0.57 Бк м⁻² с⁻¹. Статистический анализ сезонного хода приземной ОА радона в зависимости от суммарного числа дней в месяце с осадками показал, что имеется обратная связь между количеством дней с осадками и ОА радона. На основе вихреразрешающей модели PALM v. 6.0 и программного инструментария Geant4 выполнены расчеты высотного распределения интенсивности образования ионных пар в атмосфере γ -излучением семейств однородно распределенных в грунте радионуклидов ⁴⁰K, ²³⁸U, ²³²Th, а также высотного распределения интенсивности образования ионных пар энергичными α - и β -частицами в последовательности распадов, начинающихся с изотопов радона ²²²Rn, ²²⁰Rn и оканчивающихся изотопами свинца ²¹⁰Pb, ²¹²Pb. Высотная зависимость интенсивности ионообразования за счет γ -излучения имеет экспоненциальный характер с масштабом ~140 м, слабо зависящий от параметров грунта. Оценка вклада γ -излучения в суммарную ионизацию атмосферы радионуклидами земной коры и радиоактивными газами ²²⁰Rn и ²²²Rn в зависимости от параметров грунта и турбулентного режима атмосферы, характеризуемого плотностью вертикального турбулентного потока явного тепла с поверхности и коэффициентом Боуэна, показала что указанный вклад обладает значительной вариабельностью, увеличивается с высотой в области больших градиентов ОА радона, а именно, в приземном слое и около верхней границы слоя конвективного перемешивания, уменьшается с высотой в слое конвективного перемешивания. Суммарный вклад γ -излучения с земной поверхности в ионизацию атмосферного пограничного слоя в типичном диапазоне плотностей потоков радона и торона в атмосферу составляет приблизительно от 1% до 20% и возрастает при уменьшении проницаемости верхнего слоя грунта для радиоактивных эманаций.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект 22-17-00053) и государственного задания ГО “Борок” ИФЗ РАН № FMWU-2022-0025.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Анисимов С.В., Афиногенов К.В., Гурьев А.В.* Аппаратная платформа аэростатных аэроэлектрических наблюдений // Научное приборостроение. 2017а. Т. 27. № 1. С. 24–28.
- Анисимов С.В., Галиченко С.В., Афиногенов К.В., Макрушин А.П., Шихова Н.М.* Объемная активность радона и ионообразование в невозмущенной нижней атмосфере: наземные наблюдения и численное моделирование // Физика Земли. 2017б. № 1. С. 155–170.
- Зукав В.В., Яковлева В.С., Каратаев В.Д., Нагорский П.М.* Ионизация приземной атмосферы излучением почвенных радионуклидов // Известия Томского политехнического университета. 2010. Т. 317. № 2. С. 171–175.
- Смирнов В.В.* Ионизация в тропосфере. С.-Пб.: Гидрометеиздат. 1992. 312с.
- Яковлев Г.А., Кобзев А.А., Смирнов С.В., Беляева И.В., Аршинов М.Ю., Яковлева В.С.* Синхронный мониторинг γ , β -фона и атмосферных осадков в геофизических обсерваториях ИМКЭС СО РАН и БЭК ИОА СО РАН // Вестник КРАУНЦ. Физ.-мат. Науки 2020. Т. 32. № 3. С. 165–179.
- Яковлев Г.А., Яковлева В.С.* Особенности сезонной динамики изотопов радона в приземной атмосфере // Вестник КРАУНЦ. Физ.-мат. Науки 2020. Т. 31. № 2. С. 129–138.
- Яковлева В.С.* Моделирование влияния состояния и изменчивости атмосферы и литосферы на плотность потоков радона и торона с поверхности земли // Известия Томского политехнического университета. 2010. Т. 317. № 2. С. 162–166.
- Allison J., Amako K., Apostolakis J. et al.* Recent developments in Geant4 // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. 2016. V. 835. P. 186–225.
- Anisimov S.V., Galichenko S.V., Prokhorchuk A.A., Aphinogenov K.V.* Mid-latitude convective boundary-layer electricity: A study by large-eddy simulation // Atmos. Res. 2020. V. 244. P. 105035.
- Barbosa S.M., Miranda P., Azevedo E.B.* Short-term variability of gamma radiation at the ARM Eastern North Atlantic facility (Azores) // J. Envir. Rad. 2017. V. 172. P. 218–231.
- Barbosa S.M., Huismann J.A., Azevedo E.B.* Meteorological and soil surface effects in gamma radiation time series — Implications for assessment of earthquake precursors // J. Envir. Rad. 2018. V. 195. P. 72–78.
- Bernard D.* A 5D, polarized, Bethe-Heitler event generator for $\gamma \rightarrow e^+e^-$ conversion // Nucl. Instr. Meth. Phys. Research Section A 2018. V. 899. № 11. P. 85–93.
- Binks W.* Energy per ion pair // Acta Radiologica 1954. V. 41. № 117. P. 85–104.

- Burnett J.L., Croudace I.W., Warwick P.E.* Short-lived variations in the background gamma-radiation dose // *J. Radiol. Prot.* 2010. V. 30. P. 525–533.
- Dueñas C., Fernández M.C., Carretero J., Liger E., Pérez M.* Release of ^{222}Rn from some soils // *Ann. Geophysicae* 1997. V. 15. P. 124–133.
- Grasty R.L.* Radon emanation and soil moisture effects on airborne gamma-ray measurements // *Geophys.* 1997. V. 62. № 5. P. 1379–1385.
- Greenfield M.B., Domondon A.T., Okamoto N., Watanabe I.* Variation in γ -ray count rates as a monitor of precipitation rates, radon concentrations, and tectonic activity // *J. Appl. Phys.* 2002. V. 91. № 3. P. 1628–1633.
- Griffiths A.D., Zahorowski W., Element A., Werczynsky S.* A map of radon flux at the Australian land surface // *Atmos. Chem. Phys.* 2010. V. 10. P. 8969–8982.
- Guedalia D., Allet C., Fontan J., Druilhet A.* Lead-212, radon and vertical mixing in the lower Atmosphere (100–2000) m // *Tellus.* XXV. 1973. V. 4. P. 381–385.
- Hassan N.M., Hosoda M., Ishikawa T., Sorimachi A., Sahoo S.K., Tokonami S., Fukushi M.* Radon migration process and its influence factors; Review // *Jpn. J. Health Phys.* 2009. V. 44 (2). P. 218–231.
- Hosoda M., Sorimachi A., Yasuoka Y., Ishikawa T., Sahoo S.K., Furukawa M., Hassan N.M., Tokonami S., Uchida S.* Simultaneous measurements of radon and thoron exhalation rates and comparison with values calculated by UNSCEAR equation // *J. Radiat. Res.* 2009. V. 50. P. 333–343.
- Inomata Y., Chiba M., Igarashi Y., Aoyama V., Hirose K.* Seasonal and spatial variations of enhanced gamma ray dose rates derived from ^{222}Rn progeny during precipitation in Japan // *Atmos. Environ.* 2007. V. 41. P. 8043–8057.
- Kardos R., Gregorič A., Jónás J., Vaupotič J., Kovács T., Ishimori Y.* Dependence of radon emanation of soil on lithology // *J. Radioanal. Nucl. Chem.* 2015. V. 304. P. 1321–1327.
- Laakso L., Petäjä T., Lehtinen K.E.J., Kulmala M., Paatero J., Hörrak U., Tammet H., Joutsensaari J.* Ion production rate in a boreal forest based on ion, particle and radiation measurements // *Atmos. Chem. Phys.* 2004. V. 4. P. 1933–1943.
- Maronga B., Banzhaf S. et al.* Overview of the PALM model system 6.0 // *Geosci. Model. Dev.* 2020. V. 13. P. 1335–1372.
- Melintescu A., Chambers S.D., Crawford J., Williams A.G., Zorila B., Galeriu D.* Radon-222 related influence on ambient gamma dose // *J. Environ. Rad.* 2018. V. 189. P. 67–78.
- Ongori J.N., Lindsay R., Newman R.T., Maleka P.P.* Determining the radon exhalation rate from a gold mine tailings dump by measuring the gamma radiation // *J. Environ. Rad.* 2015. V. 140. P. 16–24.
- Pearson J.E., Jones G.E.* Soil concentrations of “emanating radium-226” and the emanation of radon-222 from soils and plants // *Tellus.* XVIII. 1966. V. 2. P. 655–662.
- Porstendörfer J.* Properties and behavior of radon and thoron and their decay products in the air // *J. Aerosol. Sci.* 1994. V. 25. № 2. P. 219–263.
- Prasad G., Ishikawa T., Hosoda M., Sorimachi A., Janik M., Sahoo S.K., Tokonami S., Uchida S.* Estimation of radon diffusion coefficients in soil using an updated experimental system // *Rev. Sci. Instr.* 2012. V. 83. P. 093503.
- Rizzo A., Antonacci G., Borra E., Cardellini F., Ciciani L., Sperandio L., Vilardi I.* Environmental gamma dose rate monitoring and radon correlations: evidence and potential applications // *Environments.* 2022. V. 9. P. 66.
- Ryzhakova N.K.* A new method for estimating the coefficients of diffusion and emanation of radon in the soil // *J. Environ. Rad.* 2014. V. 135. P. 63–66.
- Singh B., Singh S., Virk H.S.* Radon diffusion studies in air, gravel, sand, soil and water // *Nucl. Tracks Radiat. Meas.* 1993. V. 22. № 1–4. P. 455–458.
- Sun K., Guo Q., Cheng J.* The effect of some soil characteristics on soil radon concentration and radon exhalation rate // *J. Nucl. Sci. Tech.* 2004. V. 41. № 11. P. 1113–1117.
- Tchorz-Trzeciakiewicz D.E., Rysiukiewicz M.* Ambient gamma dose rate as an indicator of geogenic radon potential // *Sci. Total Environ.* 2021. V. 755. 142771.
- Tchorz-Trzeciakiewicz D.E., Solecki A.T.* Variations of radon concentration in the atmosphere. Gamma dose rate // *Atmos. Environ.* 2018. V. 174. P. 54–65.
- Waggy S.B., Biringen S., Sullivan P.P.* Direct numerical simulation of top-down and bottom-up diffusion in the convective boundary layer // *J. Fluid Mech.* 2013. V. 724. P. 581–606.
- Wilkening M.H., Clements W.E., Stanley D.* Radon flux measurements in widely separated regions. The Natural radiation environment II / Adams J.A.S. (ed.). Rice University Houston. Texas. 1972. P. 717–730.
- Williams A.G., Zahorowski W., Chambers S., Griffiths A., Hacker J.M., Element A., Werczynsky S.* The vertical distribution of radon in clear and cloudy daytime terrestrial boundary layers // *J. Atmos. Sci.* 2011. V. 68. P. 155–174.
- Yakovleva V., Poberezhnikov A.D., Yakovlev G.A., Kobzev A.A., Smirnov S.V., Arshinov M. Yu.* Analysis of gamma-radiation background changes during periods of atmospheric precipitation // *Atomic Energy.* 2021. V. 131. № 1. P. 50–55.
- Yakovleva V.S., Yakovlev G., Parovik R., Smirnov S., Kobzev A.* Geant4 simulation of precipitated activity-to- γ -dose rate conversion factors for radon and thoron decay products // *Mathematics.* 2022. V. 10. P. 293.
- Ye Y., Zhang Y., Dai X., Ding D.* A universal laboratory method for determining physical parameters of radon migration in dry granulated porous media // *J. Environ. Rad.* 2017. V. 177. P. 135–141.
- Zhang K., Feichter J., Kazil J., Wan H., Zhuo W., Griffiths A.D., Sartorius H., Zahorowski W., Ramonet M., Schmidt M., Yver C., Neubert R.E.M., Brunke E.-G.* Radon activity in the lower troposphere and its impact on ionization rate: a global estimate using different radon emissions // *Atmos. Chem. Phys.* 2011. V. 11. P. 7817–7838.

Contribution of the Photonic Component to the Ionization of the Atmosphere by Earth Crust Nuclides and Radioactive Emanations

S. V. Anisimov^a, S. V. Galichenko^{a, *}, E. V. Klimanova^a, A. A. Prokhorchuk^a, and K. V. Afinogenov^a

^a*Borok Geophysical Observatory, Branch of the Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, Borok, Yaroslavl oblast, 152742 Russia*

**e-mail: svga@borok.yar.ru*

Abstract—We investigate the contribution of gamma radiation of natural radionuclides constituting the Earth crust, radioactive emanations, and their decay product in the ground to the intensity of production of ion pairs in the atmosphere against the background of ionization of the atmosphere by radioactive gases flowing to the atmosphere from the ground and propagating together with their short-lived daughter products. The density of the radon flux to the atmosphere is estimated by three methods: the reservoir method, the integration of altitude profiles of volume activity of radon, based on gamma spectroscopic observation and diffusion model. The distribution of the gamma dose rate dose from the earth radionuclides in the soil and in the atmosphere is calculated using Gleant4 software. The propagation of the radon isotopes and their decay products in the atmosphere is calculated using large eddy simulations supplemented with kinematic simulations of the subgrid transport of a passive scalar. It is shown that depending on the specific activity of nuclides in the ground and the turbulent regime of the atmosphere, the total contribution of the γ -radiation to the ion pair production rate in the atmospheric boundary layer is approximately from 1% to 20% and increases upon a decrease in the penetrability of the upper ground layer for radioactive emanations.

Keywords: ionization of the atmosphere, gamma radiation, gamma spectrometer, radon, thoron, Gleant4, large eddy simulations