

Нагорский П. М.^{1,3}, Макаров Е. О.², Фирстов П. П.², Яковлева В. С.³

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, г. Томск, *nrm_sta@mail.ru*

²Камчатский филиал геофизической службы РАН, г. Петропавловск-Камчатский

³Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования Национальный исследовательский Томский политехнический университет

Введение

Важнейшим направлением исследований атмосферной радиоактивности до сих пор является искусственная радиоактивность, вызванная испытаниями ядерного оружия, техногенными авариями и технологическими процессами [1-3]. В существующих государственных системах радиационного мониторинга непрерывно измеряется только один параметр – мощность дозы γ -излучения. Остальные радиационные величины, такие как объемная активность радона, β -излучающих радионуклидов, плотность потока радона с поверхности грунта, измеряются при эпизодическом контроле. Регистрируемые аномальные всплески в γ -фоне при недостаточности дополнительной информации сложно однозначно отнести к «сигналу тревоги» радиационных инцидентов. Часто аномальные всплески в γ -фоне обусловлены природными явлениями, такими, как прохождение циклонов, осадки, при которых радиоактивный газ радон и дочерние продукты его распада (ДПР) играют основную роль. В данных случаях – отрицательную роль, т.к. существенно усложняют расшифровку результатов при контроле радиационной обстановки. Для устранения этой проблемы необходимо знать вклады радона, торона и других источников в суммарные поля ионизирующих излучений, а также степень влияния внешних факторов.

Являясь благородным газом, радон присутствует в атмосфере и не зависит от наличия облаков и (или) осадков. Образовавшиеся ДПР радона являются тяжелыми металлами (в том числе ^{214}Pb , период полураспада $T \sim 27$ мин, ^{214}Bi , $T \sim 20$ мин), которые достаточно быстро прилипают к частицам аэрозоля. В отличие от ^{222}Rn , ДПР могут удаляться из атмосферы атмосферными осадками. Известно, что уровень измеренной радиации заметно возрастает при выпадении осадков. Этот рост обусловлен наличием ДПР в каплях дождя или хлопьях снега [2-5].

Для оценок уровня ионизирующей радиации, связанной с осадками, используются методы анализа обратных траекторий воздушных масс, скоростей их переноса и информация о скорости эманации радона из литосферы [2, 5, 7]. Надежное прогнозирование увеличения γ -излучения от осадков затруднительно, поскольку концентрация ДПР радона в осадках сложным образом зависит от концентрации радона в атмосфере, процессов образования и переноса облаков, типа осадков.

В работах, посвященных оценкам изменения уровня ионизирующей радиации, связанного с осадками, используются данные только о γ -излучении [2, 5]. Хорошо известно, что процессы распада радона и его ДПР формируют не только γ -фон, но также α - и β -фон. Этот фактор пока никак не используется в анализе уровня и вариаций компонент радиационного фона.

Подчеркнем ещё одно, весьма важное обстоятельство: непосредственное воздействие ионизирующих излучений на окружающую среду, биологические объекты и человека определяется видом излучения. Потоки α -частиц, имеющие очень малую длину пробега в воздухе, могут воздействовать только на кожные покровы и легкие. Потоки β -частиц способны проходить в воздухе расстояние от десятков сантиметров до нескольких метров. В биологических тканях величина пробега этих частиц лежит в пределах от долей до единиц сантиметров (воздействуют на кожные и подкожные ткани). Поток фотонов γ -излучения обладает высокой проникающей способностью и в воздухе может проходить расстояния более 1 км (воздействует на весь организм).

1. Постановка задачи

Проведенные нами ранее исследования позволили установить, что вариации α -, β - и γ -фона не являются полностью согласованными [2, 6, 8] как на внутрисуточных, так и на межсуточных и более длительных интервалах. Выявленное различие в динамике α -, β - и γ -фона является основой настоящей работы, которая посвящена исследованию динамики γ / β -трассера, представляющего отношение измеренных в приземной атмосфере значений плотности потоков γ - и β -излучений во время опасных природных явлений, обусловленных метеорологическими процессами.

Отметим, что возникающие в литосфере геодинамические процессы, связанные с подготовкой землетрясений, также могут приводить к изменению интенсивности стока почвенных газов (в том числе радона и торона) в приземный слой атмосферы [2, 10, 11], однако эти вопросы не обсуждаются.

2. Экспериментально-измерительная база мониторинга

Мониторинг анализируемых величин проводился по методике, изложенной в [6], на территории г. Томска (асейсмичный регион с континентальным типом климата) и в п. Паратунка, Камчатка (сейсмоактивный регион с морским типом климата).

В г. Томске (ИМКЭС СО РАН, НИ ТПУ) с конца 2008 г. и по настоящее время ведется контроль характеристик полей α , β - и γ - излучений на серии высот 10 см, 1, 5, 10, 25, 30 и 35 м в приземном слое атмосферы, и на серии глубин 10, 20, 50 см, 1 и 5 м в грунте. Контроль плотности потоков и поглощенных доз β - и γ - излучений в приземной атмосфере ведется газоразрядными счетчиками γ - и жесткого β -излучения СТС-6 и СБМ-19. В дополнение к газоразрядным счетчикам установлены высокочувствительные сцинтилляционные блоки детектирования β - излучений БДПБ-01 на высотах 10 см, 1, 5 и 25 м и на глубинах 0,5 и 1 мм и γ - излучений БДКГ-03 на высотах 1,5 и 25 м и на глубине 0,5 м.

Контроль метеорологических и атмосферно-электрических величин (температура приземного слоя атмосферы T , давление P , относительная влажность, скорость и направление ветра, температура поверхности и на серии глубин) проводится с помощью информационно-измерительной системы. В её состав также включены измерители напряжённости электрического поля атмосферы E «Поле-2», полярных электропроводностей λ_- , λ_+ атмосферного воздуха «Электропроводность-2». Параллельно, измерения основных метеорологических величин и характеристик турбулентности ведутся с помощью двух ультразвуковых метеостанций АМК-3.

На Петропавловск-Камчатском геодинамическом полигоне в 1997-2002 гг. была создана сеть пунктов мониторинга подпочвенного радона с целью прогноза сильных землетрясений Авачинского залива [9-11]. Регистрация подпочвенного радона с ноября 1999 ведется радиометрами «РЕВАР». Вблизи здания Института вулканологии и сейсмологии ДВО РАН на базе скважины глубиной 350 м в подземном бункере расположен опорный пункт ИНС. Схема расположения аппаратуры в этом пункте приведена в [10]. Для проведения многофакторного скоординированного мониторинга и регистрации β - и γ - излучений на Петропавловск-Камчатском геодинамическом полигоне в п. Паратунка с 2009 г. установлены газоразрядные счетчики на высотах 2.5 и 5 м.

К каждому из газоразрядных счетчиков, измеряющих $\beta+\gamma$ - излучение, добавлены однотипные счетчики, закрытые алюминиевым и пластиковым корпусами и измеряющие только γ - излучение. По разности скорости счета импульсов между парными счетчиками, расположенными на одной высоте, можно выделять «чистый» β - фон и одновременно получать временные ряды данных о γ - и β -излучениях.

Результаты данных мониторинга дополнялись текущими данными о метеорологической обстановке (данные метеостанций ВМО), космической погоде (поток солнечного радиоизлучения, числа Вольфа, индексы геомагнитной активности, интенсивность потока космических лучей) и т.д.

3. Результаты мониторинга и их анализ

Предварительный анализ данных мониторинга в обоих пунктах позволил установить, что во временных рядах существуют вариации уровней радиации с периодами от единиц минут до года.

3.1. Вариации трассеров / индикаторов в годовом цикле

Рассмотрим пределы изменения основных компонент ионизирующей радиации, а также введенных на их основе радиационных трассеров / индикаторов на годовом интервале на примере асейсмичного региона (г. Томск). Для исключения вариаций, связанных с метеорологическими явлениями, проведем агрегацию данных и отфильтруем все масштабы менее 15 суток. Масштаб 15 суток выбран потому, что он превосходит масштаб основных метеорологических процессов. Обработка данных мониторинга показала, что существует явная зависимость между уровнем снежного покрова и β -, γ - радиоактивностью. Увеличение снежного покрова с 0.5 м до 1 м приводит к образованию «провала» в уровнях β - и γ -излучений. Кроме того, градиент вертикального профиля β - и γ -радиоактивности может иметь разный знак, в зависимости от наличия снежного покрова. Летом уровни β - и γ - радиоактивности имеют слабовыраженный максимум в годовом цикле. Динамика β/γ -трассера в годовом цикле иллюстрируется рис. 1.

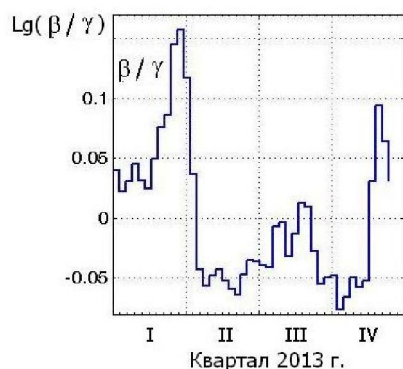


Рис. 1. Вариации γ/β - трассера в годовом цикле в г. Томске.

Для α -радиоактивности существенен разброс значений на разных высотах. Хотя для неё практически отсутствует годовая вариация, можно выделить слабый минимум α -радиоактивности в период летнего солнцестояния. Большая дисперсия данных на различных высотах связана, в первую очередь, с тем, что на распределение α -радиоактивности в приземном слое ниже 20-25 метров сильное влияние оказывают местные предметы (деревья, строения, и т.д.) из-за малой длины пробега α -частиц распадающихся изотопов. Выше 20-25 м это влияние исчезает (вследствие перемешивания). Трассеры α/β и α/γ , вне зависимости от высоты расположения датчиков β - и γ - радиоактивности, ведут себя идентичным образом.

Идентичным образом ведут себя в годовом цикле и обратные трассеры β/α , γ/α . Такая идентичность связана, в первую очередь, с тем, что длина пробега в атмосфере α - частиц на порядки меньше, чем β - частиц и γ - квантов.

3.2. Вариации γ/β - трассера синоптического и меньших временных масштабов

3.2.1. Синоптический масштаб

Рассмотрим временные масштабы вариаций радиационных и метеорологических величин, превышающие суточные. Для этого исключим из анализа вариации с периодом менее 2-х суток. Основными целями являются анализ реакции рассматриваемых трассеров/индикаторов на экстремальные явления в атмосфере, связанные с высоким и низким атмосферным давлением, экстремально низкими температурами, прохождением серий интенсивных циклонов.

За весь период проведения мониторинга длительное понижение среднесуточной температуры до -40°C было зарегистрировано в г. Томске только 1 раз: с 10 по 20 декабря 2012 г. Для β/β и β/γ трассеров повышение давления и понижение температуры приводит вначале к росту значений соответствующих трассеров, а затем — к их насыщению. Значения анализируемых трассеров испытывают вариации с периодом 2–3 суток. В вариациях основных метеовеличин этот период не зарегистрирован. В целом, согласно представленным данным, реакция на экстремальное понижение температуры и повышение давления трассеров β/β и β/γ , зарегистрированных на серии высот, — подобна. Во время прохождения серии циклонических образований регистрируются квазипериодические колебания температуры и давления, а также выпадение осадков. Для α -трассеров реакция на прохождение циклонов практически отсутствует. Вариации трассеров $\gamma(25\text{ м})/\gamma(1\text{ м})$ являются синфазными с вариациями температуры и противофазны вариациям давления. Аналогичные закономерности зарегистрированы и для других трассеров. Выпадение слабых морозящих осадков практически не оказывает (при отфильтровывании вариаций с периодами менее 2-х суток) на динамику анализируемых трассеров.

Таким образом, для вариаций с периодами более двух суток наименьшая связь между вариациями давления и температуры выявлена для $\alpha(h_n)/\alpha(h_m)$ - трассеров. Вариации остальных рассматриваемых трассеров связаны с изменениями давления либо температуры и синфазны (либо противофазны) вариациям этих метеопараметров.

3.2.2. Отдельные метеорологические явления

Сгруппируем опасные явления (ОЯ) по генетическому принципу следующим образом:

- ОЯ, связанные с ограничением дальности видимости S_m (туманы, мгла, дым пожаров и т.д.);
- грозы, шквалы, интенсивные ливневые осадки (фронты и внутримассовыми явления);
- аномальные по длительности периоды без дождей, экстремально высоких и низких температур, обусловленные блокирующими антициклонами.

Рассмотрим динамику трассеров во время ОЯ, связанных с ограничением дальности видимости. В проблеме влияния аэрозоля на климатические системы особое значение имеют ситуации задымления атмосферы во время летних лесных и торфяных пожаров, регулярно возникающих в различных регионах земного шара и выбрасывающих в атмосферу большое количество дымового аэрозоля. Те особые ситуации, которые складываются в дымовом смоге от лесных пожаров, относятся к числу недостаточно изученных в части вариаций электрических, актинометрических и радиоактивных параметров приземной атмосферы. Детальные исследования

вариаций перечисленных параметров приземного слоя атмосферы были проведены при длительных лесных пожарах на территории Западной Сибири летом 2012 года. Синоптическая ситуация в этот период была обусловлена малоградиентным барическим полем. Температура воздуха изменялась в пределах от $+15^{\circ}\text{C}$ в ночные часы до $+30^{\circ}\text{C}$ днём, ветер был слабым (1–3 м/с), осадки отсутствовали.

Интенсивное задымление, и связанное с ним уменьшение метеорологической дальности видимости S_m , приводит к соответствующему падению потока солнечного излучения в видимом и УФ-диапазонах. Если для видимого диапазона поток солнечного излучения может уменьшаться до 30%, то для длин волн менее 340 нм он может упасть до 5%. Падение S_m приводит к согласованному уменьшению уровня α -фона. Для β - и γ -фона зарегистрировано плавное нарастание уровня фона на интервале интенсивного задымления. В целом полученные результаты свидетельствуют об очень сильном влиянии лесных пожаров на радиационные, электрические и оптические характеристики нижней тропосферы.

Перейдем к анализу данных, зарегистрированных в г. Томске во время такого ОЯ как зимняя гроза. В анализируемом случае зимняя гроза была обусловлена последовательным прохождением теплого фронта, фронта окклюзии и холодного фронта (декабрь 2014 г.). Вращение атмосферного вихря привело к последовательному прохождению перечисленной серии фронтов через пункт мониторинга. Анализ данных показал, что вариации γ/β -трассера и γ/α -трассера в целом похожи, однако полного совпадения между ними не наблюдается. Выявление причин такого несоответствия должно расширить диагностические возможности.

3.2.3. Динамика γ/β -трассера при прохождении циклона через район атомной станции Фукусима на Камчатку

Перейдем к анализу данных [8], которые были получены осенью 2011 г. во время такого ОЯ как прохождение мощного тайфуна через район атомной станции Фукусима (Япония) на Камчатку (п. Паратунка). За время наблюдений (сентябрь – декабрь 2011 г.) в п. Паратунка зарегистрировано прохождение серии сильных тайфунов (метеоданные за фрагмент анализируемого интервала представлены на рис. 2, правая колонка).

Синоптические процессы играют важную роль в уровне и динамике атмосферных β - и γ -излучений и могут привести к их увеличению в десятки и сотни раз. Анализ данных показал, что падение атмосферного давления, связанное с прохождением очередного циклона, сопровождается выпадением осадков в виде дождя (или снега) и соответствующими выбросами как в β -, так и γ -фоне. Поэтому в анализируемом случае необходимо было «подавить» выбросы γ/β -трассера, обусловленные выпадением природных радионуклидов, и «усилить» выбросы γ/β -трассера, связанные с радионуклидами техногенного происхождения.

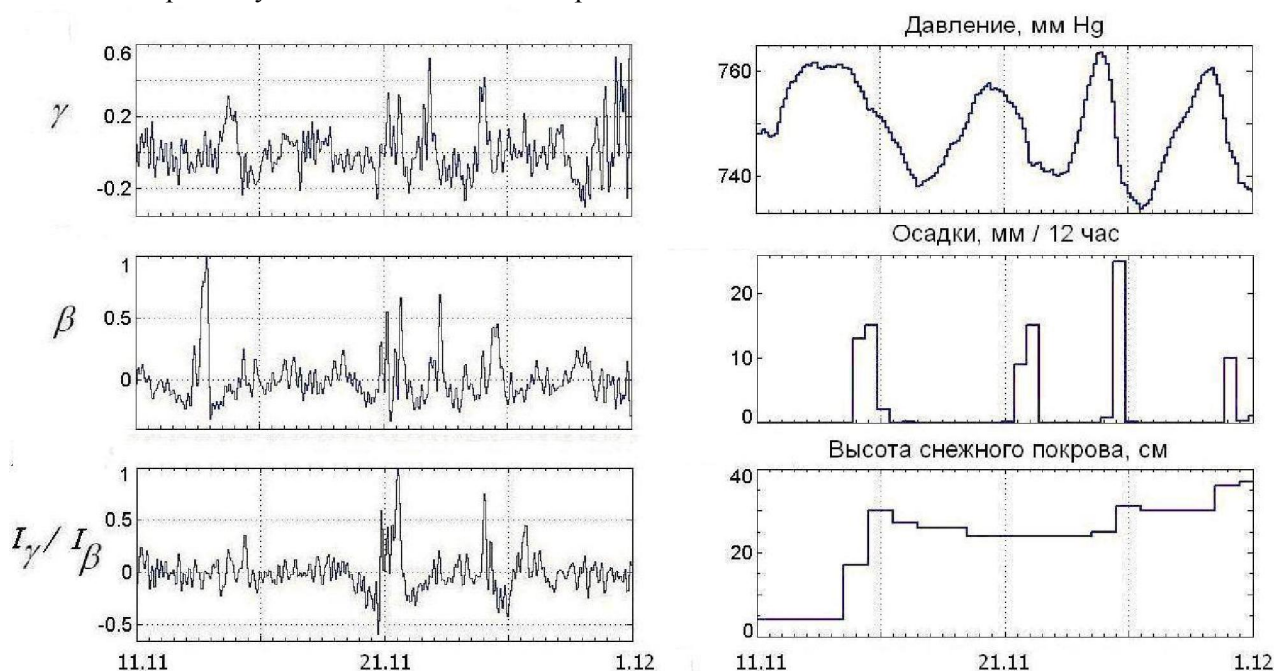


Рис. 2. Вариации числа импульсов γ - и β -радиации (высота 5 м), их нормированного отношения после фильтрации – слева и метеорологических величин (атмосферное давление, осадки, высота снежного покрова) – справа, п. Паратунка, Камчатка

В этой связи обработка информации потребовала:

- выбора оптимальных параметров полосовой фильтрации данных;
- выбора вида спектральной обработки данных.

Данные измерений были пропущены через полосовые фильтры: для β -, γ - радиоактивности и их отношения полоса периодов составила 0.25-10 суток; для метеорологических величин и электрического поля – 1-30 суток.

В результате выбросы в уровнях фона компонент ионизирующей радиации (β и γ), обусловленные очередным циклоном, не приводят к значительному изменению трассера (рис. 2, левая колонка). Исключением являются вариации атмосферных полей β - и γ - излучений в третьей декаде ноября (после 20-го числа) 2011 г., во время прохождения циклона через район атомной станции Фукусима (Япония) на Камчатку. Возможной причиной появления выброса во временной зависимости отношения скоростей счета β - и γ - импульсов является захват циклоном радиоактивных аэрозолей техногенного происхождения в районе атомной станции Фукусима.

Появление в атмосфере радиоактивных аэрозолей техногенного происхождения должно сопровождаться появлением новых радиоактивных элементов, соответствующими изменениями в вариациях атмосферных полей β - и γ - излучений, а также их отношения. Таким образом, γ / β - трассер может быть весьма чувствительным индикатором нестационарных процессов, связанных с опасными техногенными явлениями.

4. Заключение

Предложенный γ / β - трассер может быть весьма чувствительным индикатором процессов, связанных с опасными природными и (или) техногенными явлениями. Связано это с тем, что техногенные, атмосферные и литосферные процессы приводят к качественному изменению состава радионуклидов в приземной атмосфере и, как следствие, к изменению отношения γ / β .

Вариации γ / β - трассера приводят к изменениям механизмов воздействия ионизирующих излучений на окружающую среду, что является важным фактором, определяющим качество среды обитания.

Поддержано ФЦП, проект № 2014-14-576-0165-037.

Список литературы

1. Уткин В.И., Юрков А.К. Радон и проблема тектонических землетрясений // Вулканология и сейсмология. 1997. № 4. С. 82-94.
2. Firstov P.P., Yakovleva V.S., Shirokov V.A. et al. The nexus of soil radon and hydrogen dynamics and seismicity of the northern flank of the Kuril-Kamchatka subduction zone // Annals of Geophysics. 2007. V. 50. № 4. P. 547-556.
3. Микляев П.С., Петрова Т.В. Механизмы формирования потока радона с поверхности почв и подходы к оценке радоноопасности селитебных территорий // АНРИ. 2007. № 2. С. 2-16.
4. Cortes, G., Sempau, J., Ortega, X. Automated measurement of radon daughters Bi-214 and Pb-214 in rainwater // Nukleonika. 2001. V. 46. P. 161-164.
5. Mercier J.-F., Tracy B.L., d'Amours R. et al. Increased environmental gamma-ray dose rate during precipitation: a strong correlation with contributing air mass // J. of Environ. Radioactivity. 2009. V. 100. P. 527-533.
6. Яковлева В.С., Ипполитов И.И., Кабанов М.В. и др. Скоординированный многофакторный эксперимент по анализу процессов поступления почвенного радона в приземный слой атмосферы // АНРИ. 2009. № 4. С. 55-60.
7. Greenfield M.B., Ito N., Kubo K. et al. Determination of rain age via g rays from accreted radon progeny // J. of App. Phys. 2008. V. 104. № 07 4912.
8. Nagorskiy P.M., Cherepnev M. S., Firstov P.P. et al. Consistency of Component Variations of Ionizing Radiation and Atmospheric-Electric Values // XV Intern. Conf. on Atmospheric Electricity, Norman, Oklahoma, USA. 2014. 4 p. http://www.nssl.noaa.gov/users/mansell/icae2014/preprints/Nagorskiy_201.pdf
9. Фирстов П.П., Чернева Н.В., Пономарев Е.А., Бузевич А.В. Подпочвенный радон и напряженность электрического поля атмосферы в районе Петропавловск-Камчатского геодинамического геодинамического полигона // Вестник КРАУНЦ. Серия науки о Земле. 2006. № 1. Вып. № 7. С. 102-109.
10. Фирстов П.П., Рудаков В.П. Результаты регистрации подпочвенного радона на Петропавловск-Камчатском геодинамическом полигоне // Вулканология и сейсмология. 2003. № 1. С. 26-41.
11. Фирстов П.П. Мониторинг объемной активности подпочвенного радона (^{222}Rn) на Паратунской гидротермальной системе в 1997-1998 гг. с целью поиска предвестников сильных землетрясений Камчатки // Вулканология и сейсмология. 1999. № 6. С. 33-43.