

УДК 550.35

Научная статья

## Синхронный мониторинг $\gamma$ , $\beta$ -фона и атмосферных осадков в геофизических обсерваториях ИМКЭС СО РАН и БЭК ИОА СО РАН

Г. А. Яковлев<sup>1</sup>, А. А. Кобзев<sup>2</sup>, С. В. Смирнов<sup>2</sup>, И. В. Беляева<sup>3</sup>, М. Ю. Аршинов<sup>4</sup>,  
В. С., Яковлева<sup>5</sup>

<sup>1</sup> Томский государственный университет, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 36, Россия

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

<sup>3</sup> Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, пл. Соляная, 2, Россия

<sup>4</sup> Институт оптики атмосферы им. В. Е. Зуева СО РАН, 634055, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1, Россия

<sup>5</sup> Томский политехнический университет, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30, Россия

E-mail: vsyakovleva@tpu.ru

Синхронный эксперимент по исследованию динамики радиационных величин в различных условиях: городская среда и открытая загородная местность был произведен в августе-сентябре 2020. Ежеминутно производили измерения мощности амбиентного эквивалента дозы  $\gamma$ -излучения, плотности потока  $\beta$ -излучения на высоте 1 м на территориях геофизической обсерватории ИМКЭС СО РАН и на станции БЭК ИОА СО РАН. Оба пункта мониторинга были оборудованы оптическими осадкомерами ОПТИОС. Основной целью исследования было исследование различий в отклике радиационного  $\beta$ - и  $\gamma$ -фона на жидкие атмосферные осадки внутри городской среды и на открытой местности, вдалеке от городской инфраструктуры и лесных массивов. Доказано, что пункт мониторинг, расположенный в городской черте адекватно отражают метеорологическую обстановку, как минимум в радиусе 3 км.

*Ключевые слова:* бета-излучение, гамма-фон, осадки, приземная атмосфера, динамика, интенсивность, мониторинг, облако

DOI: 10.26117/2079-6641-2020-32-3-165-179

Поступила в редакцию: 07.09.2020

В окончательном варианте: 04.10.2020

**Для цитирования.** Яковлев Г. А. и др. Синхронный мониторинг  $\gamma$ ,  $\beta$ -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. DOI: 10.26117/2079-6641-2020-32-3-165-179

Контент публикуется на условиях лицензии Creative Commons Attribution 4.0 International (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru>)

© Яковлев Г. А. и др., 2020

**Финансирование.** Эксперимент выполнен в рамках государственного задания ИМКЭС СО РАН Проект № IX.138.2.3.

## Введение

В течение многих десятилетий национальные и международные сети радиационного мониторинга по всему миру, такие как ЕГАСМРО [1] в РФ, RadNet [2] в США, BiS's network system [3] в Германии и др., занимаются исследованиями радиационного фона и радиоактивности окружающей среды. Данные радиационного мониторинга европейских стран стекаются в единую сеть EURDEP [4]. Их первоочередной задачей является контроль за прохождением радиоактивных облаков, вызванных радиационными инцидентами. В отсутствие радиационных инцидентов, исследуются изменения состояния окружающей среды и погоды, вызывающие изменение гамма-фона (мощности дозы гамма-излучения). Многие исследовательские группы, занимающиеся вопросами изменения климата, берут за основу данные сетей радиационного мониторинга [1, 2, 4].

К настоящему времени известно, что величина мощности дозы  $\gamma$ -излучения не постоянна во времени и пространстве, и зависит от различных факторов, таких как состояние атмосферы, время суток, сезон года и геолого-географические характеристики региона исследования [5–9]. Пространственно-временные вариации радиационного фона, активности радиоактивных газов и аэрозолей в приземной атмосфере, газов в поверхностном слое грунта, являются следствием различных процессов и явлений, происходящих в окружающей среде.

Также неоднократно было обнаружено, что периоды выпадения осадков сопровождаются аномальным увеличением (всплесками) радиационного  $\gamma$ -фона [10–16]. Это явление объясняется процессами вымывания короткоживущих  $\beta$ - и  $\gamma$ -излучающих продуктов распада радона и торона из атмосферы на различные поверхности (почва, различные покрытия), и даже получило собственное название «radon washout» [6].

Попытки найти взаимосвязь между интенсивностью осадков и величиной всплесков мощности дозы  $\gamma$ -излучения были предприняты ранее в работах [5, 11, 13, 17–19], но значимой взаимосвязи обнаружено не было. Возможно, это связано с недостаточно высоким временным разрешением данных [20]. К такому же заключению, что чувствительность детекторов ионизирующих излучений играет важную роль при расшифровке радиационного фона, пришли ученые крупного научного коллектива [21], которые пользовались в своей работе данными австрийской, бельгийской и немецкой сетей мониторинга, стекающимися в EURDEP [4]. Этот же вывод подтверждается работами [22–26]. Использование высокочувствительных  $\gamma$ -сцинтилляционных детекторов позволяет изучать влияние опасных явлений, таких как конвективные дождевые облака с грозовыми явлениями, на гамма-фон [27].

Разработанная в работе [5] «rainout-washout» модель, которая делит атмосферу на две части «в облаке» и «под облаком», пока еще не получила экспериментального подтверждения. Тем более, что она существенно усложняет теоретические расчеты из-за множества не достаточно изученных входных параметров модели, связанных с характеристиками облаков и осадков. Следует упомянуть, что все еще отсутствует математическая модель, описывающая связь между радиационной величиной (например, мощностью дозы  $\gamma$ -излучения) и характеристикой осадков (интенсивность, количество). В работе [19] было положено начало для создания упомянутой физической модели, однако, ее развитие было отложено из-за отсутствия подробных данных об интенсивности осадков с высоким временным разрешением.

Основная часть измерительных единиц национальных и международных сетей радиационного мониторинга расположена внутри населенных пунктов, поэтому, необ-

ходимо учитывать следующие моменты. Уплотнение городской застройки, многоэтажные здания, создающие закрытые пространства, техногенно измененный во время строительных работ поверхностный слой грунта, энергетические объекты внутри города представляют собой дополнительные источники ионизирующего излучения, радиоактивных газов и аэрозолей в городской атмосфере. Пешеходно-транспортные коммуникации, асфальтированные площадки для отдыха, парковки, наоборот, снижают или полностью задерживают поступление радиоактивных газов и ионизирующего излучения из грунта в городскую атмосферу. Это приводит к значительному перераспределению источников радиации внутри городской среды, которое не известно, систематически не исследуется, и даже не принимается во внимание при анализе результатов радиационного контроля.

Поэтому, кроме соблюдения требований к высокому временному разрешению данных по радиационному фону и осадкам, необходимо изучить вопрос о влиянии объектов техносферы на результаты радиационного мониторинга.

Учитывая вышеизложенное, целью нашей работы было исследование различий в отклике радиационного  $\beta$ - и  $\gamma$ -фона на жидкие атмосферные осадки внутри городской среды и на открытой местности, вдалеке от городской инфраструктуры и лесных массивов.

## Приборы и методы радиационного и метеорологического мониторинга

Для проведения исследований был спланирован и осуществлен синхронный мониторинг  $\gamma$ - и  $\beta$ -фона и атмосферных осадков на двух экспериментальных площадках, расположенных на расстоянии  $\sim 3$ -х км друг от друга: геофизической обсерватории (ГО) ИМКЭС СО РАН, расположенной в городской черте; станции БЭК ИОА СО РАН, расположенной за городом (рис. 1).

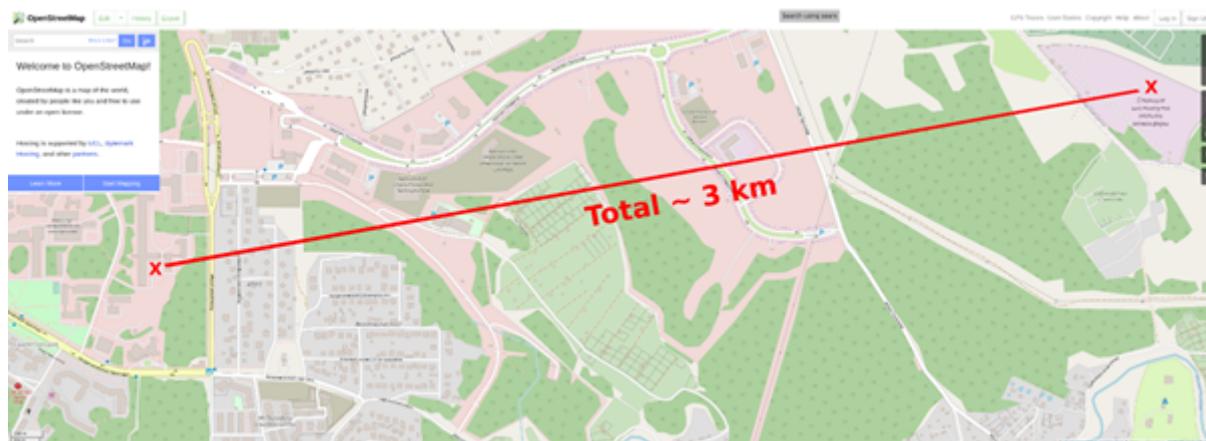


Рис. 1. Локация ГО ИМКЭС СО РАН и БЭК ИОА СО РАН

На станции БЭК были установлены сцинтилляционные детекторы  $\beta$ -излучения БДПБ-01 и гамма-излучения БДКГ-03 (АТОМТЕХ, Республика Беларусь) на высоте 1 м от земной поверхности в центре поля БЭК СО РАН площадью  $\sim 84$  тыс. м<sup>2</sup>. Внешний вид расположения детекторов показан на рис. 2.



Рис. 2. Расположение детекторов на станции БЭК ИОА СО РАН

Однотипные сцинтилляционные детекторы  $\beta$ -излучения БДПБ-01 и гамма-излучения БДКГ-03 установлены на нижней экспериментальной площадке геофизической обсерватории ИМКЭС СО РАН (рис. 3) площадью  $\sim 4700 \text{ м}^2$ , окруженной с 3-х сторон кирпичными зданиями.



Рис. 3. Расположение детекторов в ГО ИМКЭС СО РАН

Детекторы  $\gamma$ - и  $\beta$ -излучений регистрировали данные с высокой частотой дискретизации 1 минута. Детектор БДКГ-03 в качестве чувствительного элемента содержит сцинтиллятор NaI(Tl) размерами  $\text{Ø}25 \times 40 \text{ мм}$ , диапазоном регистрируемых энергий  $\gamma$ -излучения от 50 кэВ до 3 МэВ. В детекторе БДПБ-01 в качестве чувствительного элемента используется тонкая пластина из сцинтилляционной пластмассы  $\text{Ø}60 \text{ мм}$ . Диапазон регистрируемых энергий  $\beta$ -частиц от 155 кэВ до 3,5 МэВ.

Данные об интенсивности и другим характеристикам жидких атмосферных осадков с высоким временным разрешением регистрировались оптическими осадкомерами ОПТИОС [28], установленными на расстоянии не более 10 м от детекторов  $\gamma$ - и  $\beta$ -излучений в ГО ИМКЭС СО РАН (далее по тексту ИМКЭС) и на станции БЭК ИОА СО РАН (далее по тексту БЭК).

## Результаты и их анализ

Результаты исследования различий в отклике радиационного  $\beta$ - и  $\gamma$ -фона на высоте 1 м на жидкие атмосферные осадки внутри городской среды (ИМКЭС) и за городом на открытой местности (БЭК) в течение 2-х месяцев приведены на рис. 4.

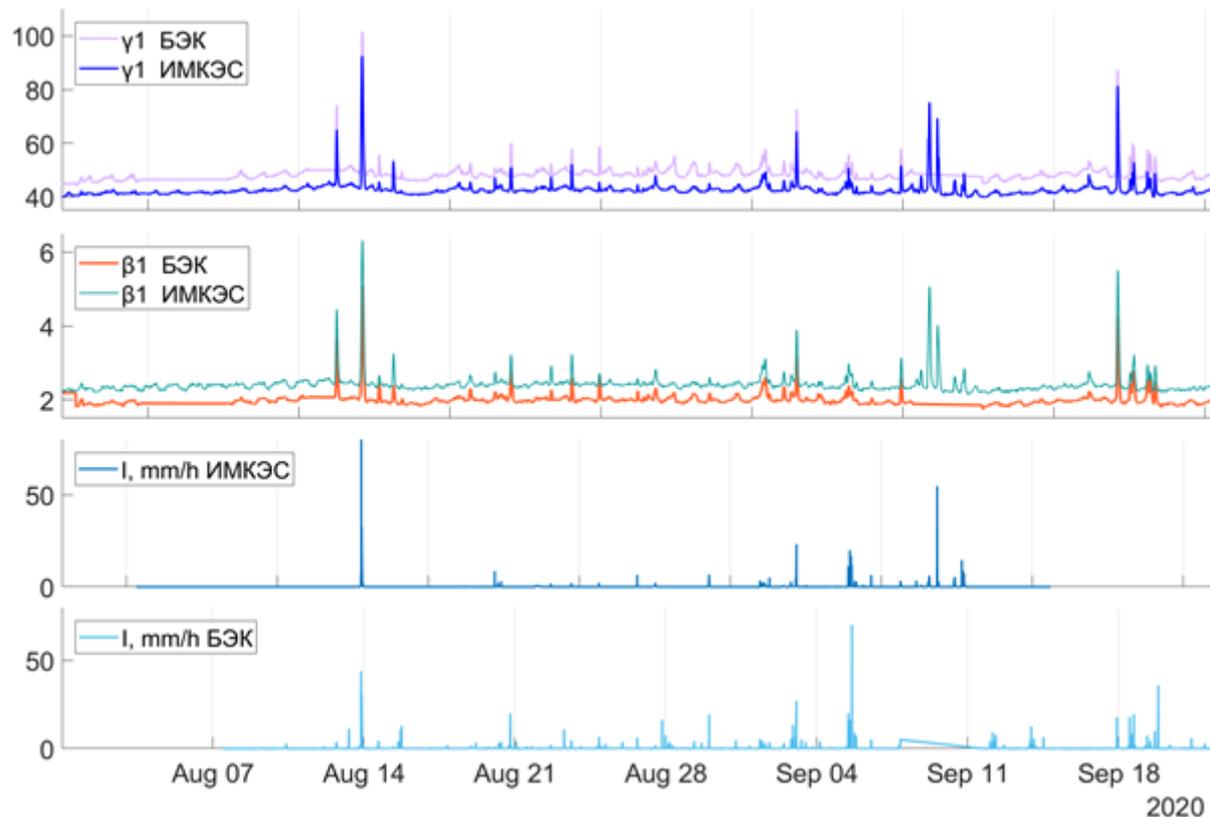


Рис. 4. Динамика радиационного  $\beta$ - и  $\gamma$ -фона в имп./с и интенсивности осадков

Получена неожиданная практически идеальная синхронность в динамике как  $\beta$ -, так и  $\gamma$ -фона на площадках, находящихся в 3-х км друг от друга, с разным типом подстилающего грунта и окружающими объектами. Предполагалось, что окружающие площадку ИМКЭС многоэтажные здания будут оказывать существенное влияние на динамические процессы в приземной атмосфере, изменяя тем самым поведение радиационного фона.

Учитывая, что сбор информации  $\gamma$ -детекторами происходит в радиусе около 300 м, можно сделать вывод, что локальная метеорологическая ситуация на расстоянии около 3-х км в течение всего эксперимента была практически одинаковой и изменялась синхронно.

Анализируя динамику радиационных величин и интенсивности осадков (рис. 4), стоит отметить, что динамика интенсивности осадков, в основном, не синхронна на площадках ИМКЭС и БЭК, что является более ожидаемым результатом. В отличие от  $\gamma$ -детектора, оптический осадкомер отражает обстановку в довольно узкой области  $\sim 20$  см.

Далее рассмотрим более детально период отсутствия осадков (рис. 5) и периоды с разной интенсивностью осадков (усредненные за 1 мин. значения) (рис. 6-10).

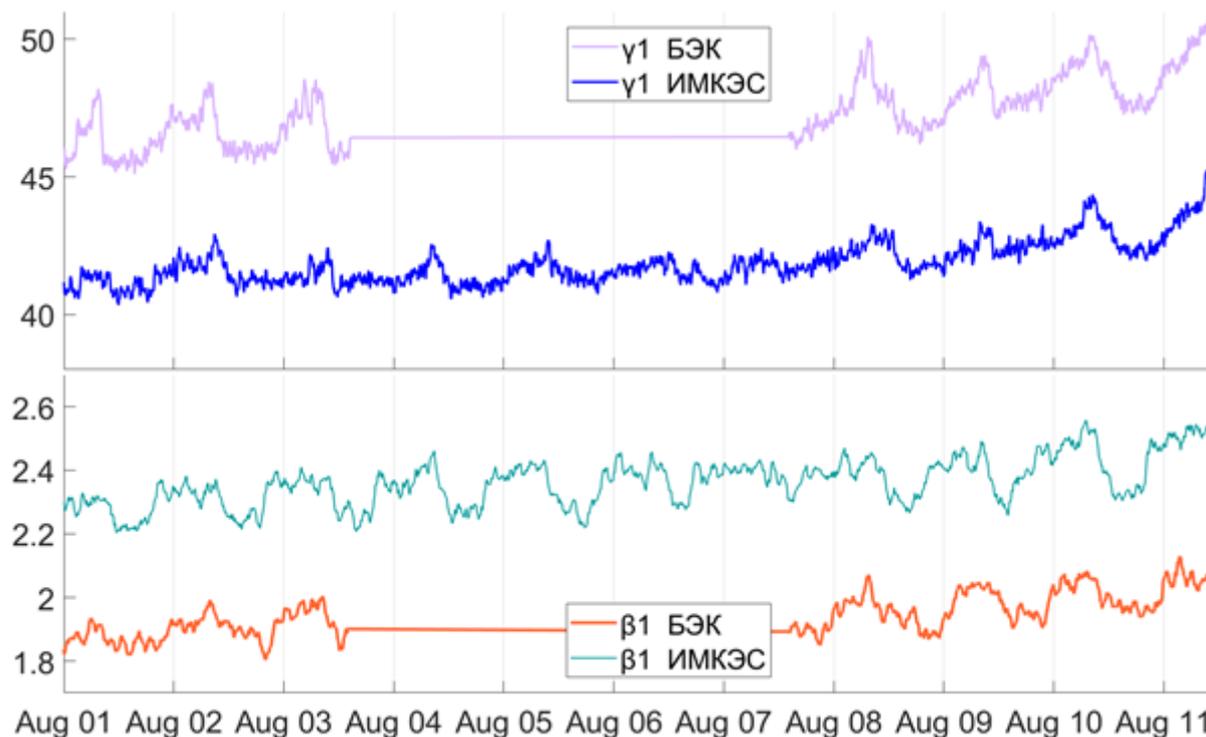


Рис. 5. Динамика радиационного  $\beta$ - и  $\gamma$ -фона в имп./с в отсутствие осадков

**Суточные вариации  $\gamma$ - и  $\beta$ -фона.** В периоды отсутствия атмосферных осадков (рис. 5) наблюдается четко выраженный суточный ход заряженной и нейтральной компонент радиационного фона. Синхронность в суточном ходе  $\beta$ - и  $\gamma$ -фона на высоте 1 м достаточно схожая, но с разным размахом. Поскольку суточный ход обусловлен влиянием динамики  $\beta$ - и  $\gamma$ -излучающих дочерних продуктов распада радона (в основном) и торона (в меньшей степени) в приземной атмосфере и поверхностном слое грунта, различия в амплитуде вариаций  $\gamma$ -фона могут быть обусловлены большей плотностью потока радона с поверхности грунта, которая напрямую зависит от содержания  $^{238}\text{U}$ . Суточные вариации  $\gamma$ -фона больше похожи на «пилообразные», а  $\beta$ -фона – «ступенчатые». Детектор  $\beta$ -излучения собирает информацию в радиусе нескольких метров, соответственно, бета-фон на высоте 1 м в большей степени зависит от излучения почвенных радионуклидов в поверхностном слое грунта.

$\gamma$ -фон на станции БЭК немного повышен, по сравнению с ИМКЭС, что может объясняться следующими причинами: 1) содержание  $^{238}\text{U}$  в поверхностном грунте на станции БЭК больше; 2) вокруг площадки ИМКЭС много асфальтированных поверхностей, которые являются поглотителем  $\gamma$ -излучения почвенных радионуклидов; 3) здания вокруг площадки ИМКЭС не вносят существенного вклада в суммарный  $\gamma$ -фон, и служат защитой от  $\gamma$ -излучения, испускаемого почвенными радионуклидами в радиусе около 200 м, в итоге область сбора фотонов заметно сокращена. Разница в величине  $\beta$ -фона на экспериментальных площадках может быть обусловлена различным соотношением активности  $\beta$ - и  $\gamma$ -излучающих радионуклидов в окружающих объектах. Все это требует дополнительной проверки.

Отсутствие различий в суточном ходе  $\beta$ - и  $\gamma$ -фона в городской и загородной атмосфере приводит к выводу о том, что объекты техносферы не оказывают существенного влияния на динамику радиационного фона, связанную с изменением погодных условий. Следовательно пункты мониторинга, расположенные в городской

черте адекватно отражают текущую метеорологическую обстановку, как минимум в радиусе 3 км.

**Отклик  $\gamma$ - и  $\beta$ -фона на атмосферные осадки.** Проанализируем влияние атмосферных осадков на динамику  $\beta$ - и  $\gamma$ -фона на двух удаленных экспериментальных площадках, учитывая, что аномальные всплески радиационного фона обусловлены излучением радионуклидов  $^{214}\text{Bi}$  и  $^{218}\text{Pb}$ , осажденных на земную поверхность.

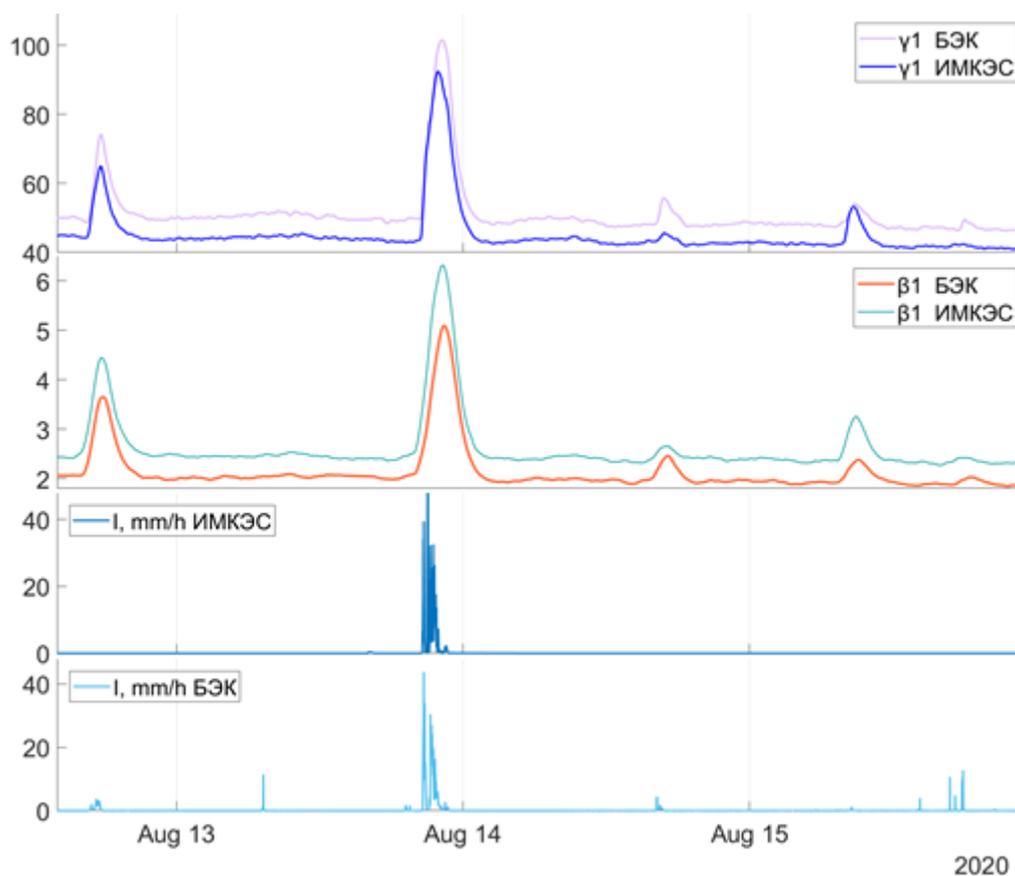


Рис. 6. Динамика радиационного  $\beta$ - и  $\gamma$ -фона в имп./с и интенсивности осадков

Рассмотрим интенсивный ливень 13 августа 2020 года (рис. 6), который синхронно практически с одинаковой интенсивностью и спектром проявился на площадке ИМКЭС и на станции БЭК. Ливень привел к совершенно идентичному отклику в  $\beta$ - и  $\gamma$ -фоне на двух удаленных площадках. Это говорит о том, что интегральная активность радона в атмосфере в районе ИМКЭС и на станции БЭК практически одинакова.

Этот факт подтверждается поразительной синхронностью как спектра интенсивности осадков, прошедших 1 сентября 2020 (рис. 7), так и динамики  $\beta$ - и  $\gamma$ -фона на дистанционно разнесенных экспериментальных площадках. Не смотря на низкую интенсивность (менее 5 мм/ч) осадков, отклик в радиационном фоне достаточно четко выражен.

Судя по отсутствию временной задержки в моментах начала всплесков в  $\gamma$ -фоне и схожести в его динамике можно прийти к выводу о том, что в каждый случай осадков одновременно над двумя пунктами мониторинга ИМКЭС и БЭК проходило одно кучево-дождевое облако с линейными размерами не менее 3-х км, при этом осадки в разных частях облака должны были иметь одинаковые характеристики.

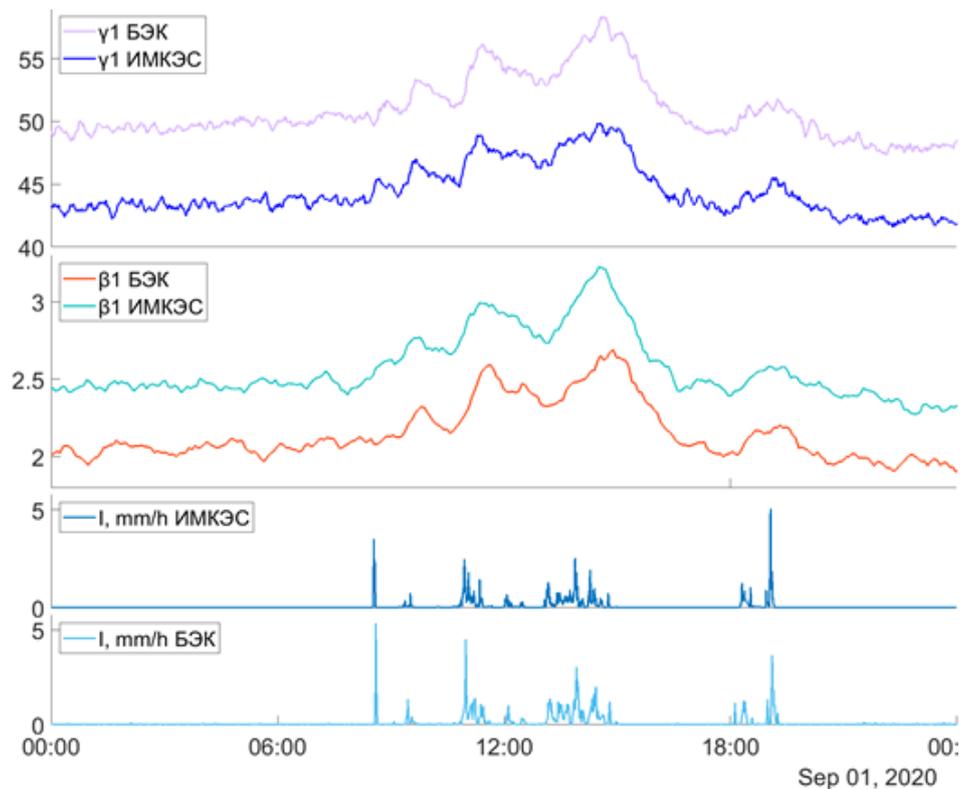


Рис. 7. Динамика радиационного  $\beta$ - и  $\gamma$ -фона в имп./с и интенсивности осадков

Либо одновременно проходили мультячейковые облака с одинаковыми характеристиками. Причем, направление движения облака (облаков) должно было быть примерно перпендикулярно красной линии на рис.1, обозначающей расстояние между 2-мя пунктами мониторинга. Поскольку, если бы облако прошло сначала через один пункт мониторинга, и затем через другой, мы бы зарегистрировали временную задержку между всплесками в  $\beta$ - и  $\gamma$ -фоне в ИМКЭС и на станции БЭК, а также совершенно иную динамику.

Далее рассмотрим периоды выпадения жидких атмосферных осадков разной интенсивности, которые были зарегистрированы в ИМКЭС и на станции БЭК в разное время, но тем не менее, вызвали одинаковую реакцию в приземном  $\beta$ - и  $\gamma$ -фоне.

Осадки 12 августа (рис. 6), которые были зарегистрированы оптическим осадкомером только на станции БЭК, также вызвали синхронный и равный по величине отклик в  $\beta$ - и  $\gamma$ -фоне на расстоянии 3 км. Это свидетельствует о том, что вблизи ИМКЭС выпали осадки схожей интенсивности и длительности, которые не попали непосредственно в локальную область регистрации оптического осадкомера.

Низкоинтенсивные осадки, зарегистрированные только на станции БЭК 14 и 15 августа вызвали синхронный, но разный по величине отклик в  $\beta$ - и  $\gamma$ -фоне. Причиной различий может служить как разная площадь покрытия осадками, так и разное расстояние до места установки детекторов.

В период с 25 по 31 августа (Рис. 8) картина по осадкам средней и низкой интенсивности на разных площадках сильно различается. Не смотря на это, синхронность динамики  $\beta$ - и  $\gamma$ -фона на удаленных площадках продолжает удивлять и радовать. Во-первых, переход к высокочувствительным сцинтилляционным детекторам для мониторинга радиационной обстановки был оправдан.



Рис. 8. Динамика радиационного  $\beta$ - и  $\gamma$ -фона в имп./с и интенсивности осадков

По сравнению с газоразрядными детекторами, которые обычно используют в региональных системах АСМРО, сцинтилляционные детекторы позволяют увеличить частоту дискретизации данных, регистрируя при этом все низкофоновые изменения, вызванные как изменением метеорологической обстановки, так и влиянием объектов техносферы. Это очень важно и при решении задач о влиянии малых доз радиации на население, и в исследованиях влияния динамических процессов, происходящих в системе «литосфера-атмосфера» на радиационный фон приземной атмосферы.

Реакция  $\gamma$ -фона на серию ливней 5 сентября 2020 года (рис. 9) позволяет точно определить время начала осадков.

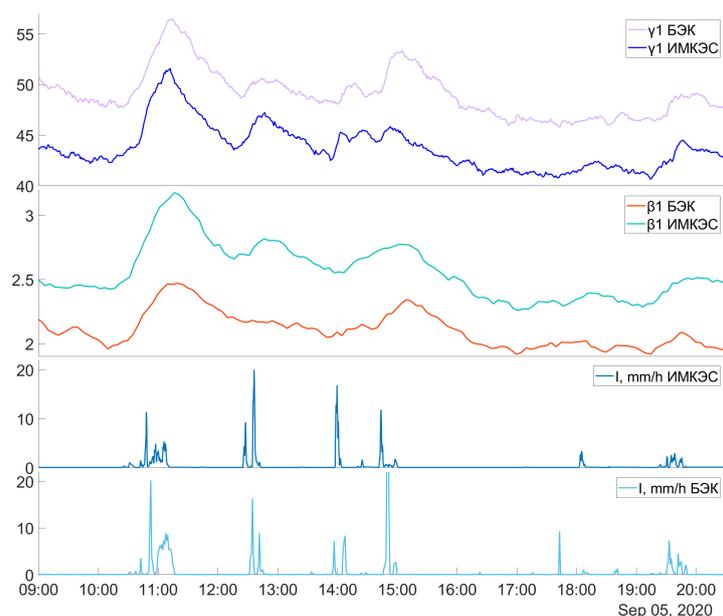


Рис. 9. Динамика радиационного  $\beta$ - и  $\gamma$ -фона в имп./с и интенсивности осадков

На станции БЭК осадки (в 12:30, рис. 9) начались на несколько минут позже, чем в ИМКЭС, при этом хорошо видна разница во времени начала роста  $\gamma$ -фона (2-й пик). В этой серии ливней 3-й и 4-й имеют несколько разные характеристики, как времени начала, так и спектра интенсивности. Эти различия также хорошо выражены в отклике  $\gamma$ -фона количеством максимумов и их величиной.

В период с 17 по 19 сентября 2020 года также была зарегистрирована серия ливней на станции БЭК (рис. 10).

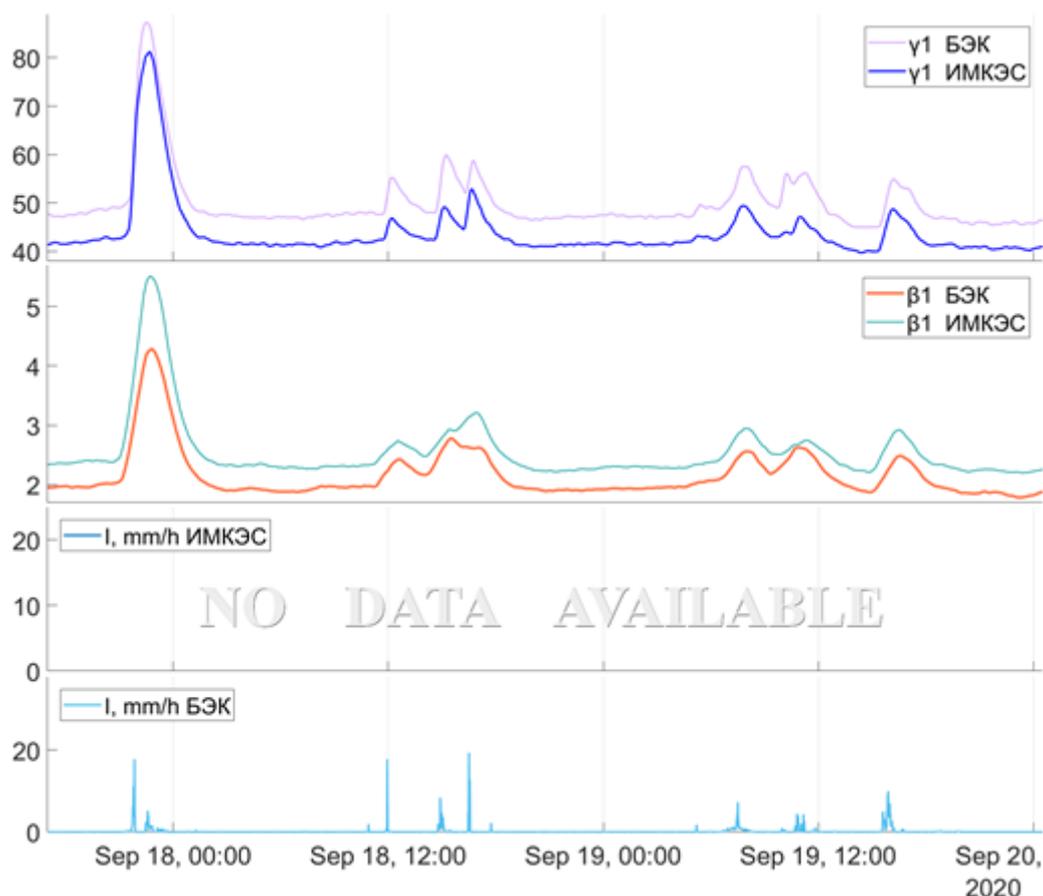


Рис. 10. Динамика радиационного  $\beta$ - и  $\gamma$ -фона в имп./с и интенсивности осадков

В ИМКЭС оптический осадкомер в этот период не работал. Эти данные подтверждают все, сделанные ранее выводы. С учетом результатов многолетних исследований [29], можно подтвердить, что кучево-дождевые облака накрывали оба пункта мониторинга одновременно, поскольку начало всех зарегистрированных аномалий в  $\beta$ - и  $\gamma$ -фоне проявлялось синхронно. Осадки заканчивались в одно и то же время в ИМКЭС и на станции БЭК, о чем свидетельствует синхронность максимумов всплесков и формы изменения  $\beta$ - и  $\gamma$ -фона.

## Заключение

Удивительная синхронность в динамике  $\beta$ - и  $\gamma$ -фона, зарегистрированная на протяжении почти 2-х месяцев в пунктах мониторинга, удаленных друг от друга на расстоянии 3 км, позволила сделать ряд основных выводов:

1. Объекты техносферы не оказывают существенного влияния на динамику радиационного фона, связанную с изменением погодных условий.

2. Радиационный  $\beta$ - и  $\gamma$ -фон, измеряемый сцинтилляционными детекторами, установленными в городской черте, адекватно отражает текущую метеорологическую обстановку, как минимум в радиусе 3 км.

3. Измерение  $\beta$ - и/или  $\gamma$ -фона в дополнение к измерителям осадков поможет производить более детальный анализ состояния и динамики приземной атмосферы.

Не смотря на обилие дополнительных источников радона в городской инфраструктуре интегральная активность радона в атмосфере над городом и окрестностями на удалении 3 км практически одинаковая. Целесообразно оборудовать пункт радиационного мониторинга на большем расстоянии от города для проверки влияния техносферы на окружающую среду.

Полученные результаты могут быть интересны специалистам в области физики облаков.

**Конкурирующие интересы.** Конфликтов интересов в отношении авторства и публикации нет.

**Авторский вклад и ответственность.** Автор участвовал в написании статьи и полностью несет ответственность за предоставление окончательной версии статьи в печать.

## Список литература/References

- [1] Единая государственная автоматизированная система мониторинга радиационной обстановки на территории Российской Федерации <http://egasmro.ru/ru> (дата обращения от 23.10.2019).
- [2] EPA's Nationwide Environmental Radiation Monitoring <https://www.epa.gov/radnet> (дата обращения от 23.10.2019).
- [3] Measuring stations in Germany <https://odlinfo.bfs.de/EN/index.html> (дата обращения от 23.10.2019).
- [4] European Radiological Data Exchange Platform <https://remon.jrc.ec.europa.eu/About> (дата обращения от 23.10.2019).
- [5] Takeuchi N., Katase A. "Rainout-washout model for variation of environmental gamma-ray intensity by precipitation", Journal of Nuclear Science and Technology, 1982, № 19(5), 393-409.
- [6] EURADOS Report, Radiation Protection 106, 1999.
- [7] Lebedyte M., Butkus D., Morkūnas G., "Variations of the ambient dose equivalent rate in the ground level air", Journal of environmental radioactivity, 2003, № 64(1), 45-57.
- [8] Beck H. L., "Gamma radiation from radon daughters in the atmosphere", Journal of Geophysical Research, 1974, № 79(15), 2215-2221.
- [9] Datar G., Vichare G., Raghav A., Bhaskar A., Sinha A. K., Nair K. U., "Response of Gamma-Ray Spectrum During Ockhi Cyclone", Front. Earth Sci., 8:15 <https://doi.org/10.3389/feart.2020.00015> (2020).
- [10] Mercier J. F., Tracy B. L., d'Amours R., Chagnon F., Hoffman I., Korpach E. P., Ungar R. K., "Increased environmental gamma-ray dose rate during precipitation: a strong correlation with contributing air mass", Journal of environmental radioactivity, 100(7) (2009), 527-533.
- [11] Fujinami N., Watanabe T., Tsutsui T., "Looping variation of correlation between radon progeny concentration and dose rate in outdoor air", In Radioactivity in the Environment, 7 (2005), 284-289.
- [12] Hiemstra P. H., Pebesma E. J., Heuvelink G. B., Twenhöfel C. J., "Using rainfall radar data to improve interpolated maps of dose rate in the Netherlands", Science of the total environment, 409(1) (2010), 123-133.

- [13] Burnett J. L., Croudace I. W., Warwick P. E., "Short-lived variations in the background gamma-radiation dose", *Journal of Radiological Protection*, 30(3) (2010), 525.
- [14] Liu H., Daisuke K., Motokiyo M., Hirao S., Moriizumi J., Yamazawa H. "On the characteristics of the wet deposition process using radon as a tracer gas", *Radiation protection dosimetry*, 160(1-3) (2014), 83-86.
- [15] Livesay R. J., Blessinger C. S., Guzzardo, T. F., Hausladen P. A., "Rain-induced increase in background radiation detected by Radiation Portal Monitors", *Journal of environmental radioactivity*, 137 (2014), 137-141.
- [16] Barbosa S. M., Miranda P., Azevedo E. B., "Short-term variability of gamma radiation at the ARM Eastern North Atlantic facility (Azores)", *Journal of environmental radioactivity*, **172** (2017), 218-231.
- [17] Takeyasu M., Iida T., Tsujimoto T., Yamasaki K., Ogawa Y., "Concentrations and their ratio of  $^{222}\text{Rn}$  decay products in rainwater measured by gamma-ray spectrometry using a low-background Ge detector", *Journal of environmental radioactivity*, 88(1) (2006), 74-89.
- [18] Fujinami N., "Observational study of the scavenging of radon daughters by precipitation from the atmosphere", *Environment International*, 22 (1996), 181-185.
- [19] Yakovleva V. S., Nagorsky P. M., Cherepnev M. S., Kondratyeva A. G., Ryabkina K. S., "Effect of precipitation on the background levels of the atmospheric  $\beta$ - and  $\gamma$ -radiation", *Applied Radiation and Isotopes*, 118 (2016), 190-195.
- [20] Inomata Y., Chiba M., Igarashi Y., Aoyama M., Hirose K., "Seasonal and spatial variations of enhanced gamma ray dose rates derived from  $^{222}\text{Rn}$  progeny during precipitation in Japan", *Atmospheric Environment*, 41(37) (2007), 8043-8057.
- [21] Bossew P., Cinelli G., Hernández-Ceballos M., Cernohlawek N., Gruber V., Dehandschutter B., Menneson F., Bleher M., Stöhlker U., Hellmann I., Weiler F., Tollefsen T., Tognoli P. V., De Cort M., "Estimating the terrestrial gamma dose rate by decomposition of the ambient dose equivalent rate", *Journal of Environmental Radioactivity*, 166 (2016), 296-308.
- [22] Yamanishi H., Miyake H., "Separation of natural background by using correlation time-series data on radiation monitoring", *Journal of Nuclear Science and Technology*, 40 (2003), 44-48.
- [23] Keller P.E., Kouzes R. T., "Influence of Extraterrestrial Radiation on Radiation Portal Monitors", *Nuclear Science, IEEE Transactions on Nuclear Science*, 56 (2008), 1575-1583.
- [24] Knoll G., "Background and Detector Shielding", *Radiation Detection and Measurement*, 2nd ed, John Wiley & Sons, New York, 1989, 714-719.
- [25] Terry I.R., "The Skyshine Benchmark Experiment Revisited", *Radiation Protection Dosimetry*, 115 (2005), 538-541.
- [26] Brunke E-G. et al., "Cape Point GAW station  $^{222}\text{Rn}$  detector: factors affecting sensitivity and accuracy", *Atmospheric Environment*, 36 (2002), 2257-2262.
- [27] Reuveni Y., Yair Y., Price C., Steinitz G., "142-150", *Atmospheric Research*, 196 (2017).
- [28] Kalchikhin V. V., Kobzev A. A., Korolkov V. A., Tikhomirov A. A., "Results of optical precipitation gage field tests", *Atmospheric and Oceanic Optics*, 31(5) (2018), 545-547.
- [29] Яковлева В. С., Нагорский П. М., Яковлев Г. А., Зелинский А. С., Пустовалов К. Н., Смирнов С. В., Беляева И. В., "Предварительные результаты анализа вариаций бета-фона приземной атмосферы, обусловленных ливневыми осадками", *Вестник КРАУНЦ. Физ.-мат. науки*, **31:2** (2020), 139-149. [Yakovleva V. S., Nagorskiy P. M., Yakovlev G. A., Zelinskiy A. S., Pustovalov K. N., Smirnov S. V., Belyayeva I. V., "Predvaritel'nyye rezul'taty analiza variatsiy beta-fona prizemnoy atmosfery, obuslovlennykh livnevymi osadkami", *Vestnik KRAUNTS. Fiz.-mat. nauki*, 31:2 (2020), 139-149].

## Список литературы (ГОСТ)

- [1] Единая государственная автоматизированная система мониторинга радиационной обстановки на территории Российской Федерации <http://egasmro.ru/ru> (дата обращения от 23.10.2019)

- [2] EPA's Nationwide Environmental Radiation Monitoring <https://www.epa.gov/radnet> (дата обращения от 23.10.2019)
- [3] Measuring stations in Germany <https://odlinfo.bfs.de/EN/index.html> (дата обращения от 23.10.2019)
- [4] European Radiological Data Exchange Platform <https://remon.jrc.ec.europa.eu/About> (дата обращения от 23.10.2019)
- [5] Takeuchi N., Katase A. Rainout-washout model for variation of environmental gamma-ray intensity by precipitation // *Journal of Nuclear Science and Technology*. 1982. no. 19(5). pp. 393-409.
- [6] EURADOS Report, 1999. Radiation Protection 106, URL: [http://ec.europa.eu/energy/nuclear/radiation\\_protection/doc/publication/rp106.pdf](http://ec.europa.eu/energy/nuclear/radiation_protection/doc/publication/rp106.pdf)
- [7] Lebedyte, M., Butkus, D., & Morkūnas, G. Variations of the ambient dose equivalent rate in the ground level air // *Journal of environmental radioactivity*. 2003. no. 64(1). pp. 45-57.
- [8] Beck, H. L. Gamma radiation from radon daughters in the atmosphere. *Journal of Geophysical Research*. 1974. no. 79(15). pp. 2215-2221.
- [9] Datar G., Vichare G., Raghav A., Bhaskar A., Sinha A. K., Nair, K. U. Response of Gamma-Ray Spectrum During Ockhi Cyclone // *Front. Earth Sci*. 2020. vol. 8. no. 15. <https://doi.org/10.3389/feart.2020.00015>
- [10] Mercier J. F., Tracy B. L., d'Amours R., Chagnon F., Hoffman I., Korpach E. P., Ungar R. K. Increased environmental gamma-ray dose rate during precipitation: a strong correlation with contributing air mass // *Journal of environmental radioactivity*. 2009. vol. 100(7). pp. 527-533.
- [11] Fujinami, N., Watanabe, T., Tsutsui, T. Looping variation of correlation between radon progeny concentration and dose rate in outdoor air // *In Radioactivity in the Environment*. 2005. vol. 7. pp. 284-289.
- [12] Hiemstra P. H., Pebesma E. J., Heuvelink G. B., Twenhöfel C. J. Using rainfall radar data to improve interpolated maps of dose rate in the Netherlands // *Science of the total environment*. 2010. vol. 409(1). pp. 123-133.
- [13] Burnett J. L., Croudace I. W., Warwick P. E. Short-lived variations in the background gamma-radiation dose // *Journal of Radiological Protection*. 2010. vol.30(3). 525.
- [14] Liu H., Daisuke K., Motokiyo M., Hirao S., Moriizumi J., Yamazawa H. On the characteristics of the wet deposition process using radon as a tracer gas. *Radiation protection dosimetry*. 2014. vol. 160(1-3). pp. 83-86.
- [15] Livesay R. J., Blessinger C. S., Guzzardo, T. F., Hausladen P. A. Rain-induced increase in background radiation detected by Radiation Portal Monitors // *Journal of environmental radioactivity*. 2014. vol. 137. pp. 137-141.
- [16] Barbosa S. M., Miranda P., Azevedo E. B. Short-term variability of gamma radiation at the ARM Eastern North Atlantic facility (Azores) // *Journal of environmental radioactivity*. 2017. vol. 172. pp. 218-231.
- [17] Takeyasu M., Iida T., Tsujimoto T., Yamasaki K., Ogawa Y. Concentrations and their ratio of  $^{222}\text{Rn}$  decay products in rainwater measured by gamma-ray spectrometry using a low-background Ge detector // *Journal of environmental radioactivity*. 2006. vol. 88(1). pp. 74-89.
- [18] Fujinami N. Observational study of the scavenging of radon daughters by precipitation from the atmosphere // *Environment International*. 1996. vol.22. pp. 181-185.
- [19] Yakovleva V. S., Nagorsky P. M., Cherepnev M. S., Kondratyeva A. G., Ryabkina K. S. Effect of precipitation on the background levels of the atmospheric  $\beta$ - and  $\gamma$ -radiation // *Applied Radiation and Isotopes*. 2016. vol. 118. pp. 190-195.
- [20] Inomata Y., Chiba M., Igarashi Y., Aoyama M., Hirose K. Seasonal and spatial variations of enhanced gamma ray dose rates derived from  $^{222}\text{Rn}$  progeny during precipitation in Japan // *Atmospheric Environment*. 2007. vol. 41(37). pp. 8043-8057.

- [21] Bossew P., Cinelli G., Hernández-Ceballos M., Cernohlávek N., Gruber V., Dehandschutter B., Menneson F., Bleher M., Stöhlker U., Hellmann I., Weiler F., Tollefsen T., Tognoli P.V., De Cort M. Estimating the terrestrial gamma dose rate by decomposition of the ambient dose equivalent rate // *Journal of Environmental Radioactivity*. 2016. vol. 166. pp. 296-308.
- [22] Yamanishi H., Miyake H. Separation of natural background by using correlation time-series data on radiation monitoring // *Journal of Nuclear Science and Technology*. 2003. vol. 40. pp. 44-48.
- [23] Keller P.E., Kouzes R.T. Influence of Extraterrestrial Radiation on Radiation Portal Monitors // *Nuclear Science, IEEE Transactions on Nuclear Science*. 2008. vol. 56. pp. 1575-1583.
- [24] Knoll G. Background and Detector Shielding. *Radiation Detection and Measurement*, 2nd ed. New York: John Wiley & Sons, 1989, ch. 20, sec. I. pp. 714-719.
- [25] Terry I.R. The Skyshine Benchmark Experiment Revisited // *Radiation Protection Dosimetry*. 2005. vol. 115. pp. 538-541.
- [26] Brunke E-G. et al. Cape Point GAW station <sup>222</sup>Rn detector: factors affecting sensitivity and accuracy // *Atmospheric Environment*. 2002. vol. 36. pp. 2257–2262.
- [27] Reuveni Y., Yair Y., Price C., Steinitz G. Ground level gamma-ray and electric field enhancements during disturbed weather: Combined signatures from convective clouds, lightning and rain // *Atmospheric Research*. 2017. vol. 196. pp. 142–150.
- [28] Kalchikhin V. V., Kobzev A. A., Korolkov V. A., Tikhomirov A. A. Results of optical precipitation gage field tests // *Atmospheric and Oceanic Optics*. 2018. vol. 31(5). pp. 545-547.
- [29] Яковлева В. С., Нагорский П. М., Яковлев Г. А., Зелинский А. С., Пустовалов К. Н., Смирнов С. В., Беляева И. В. Предварительные результаты анализа вариаций бета-фона приземной атмосферы, обусловленных ливневыми осадками // *Вестник КРАУНЦ. Физ.-мат. науки*. 2020. Т. 31. №2. С. 139-149.

## Synchronous monitoring of $\gamma$ , $\beta$ -background and atmospheric precipitations in geophysical observatories of IMCES SB RAS and BEC IAO SB RAS

G. A. Yakovlev<sup>1</sup>, A. A. Kobzev<sup>2</sup>, S. V. Smirnov<sup>2</sup>, I. V. Belyaeva<sup>3</sup>, M. Ju. Arshinov<sup>4</sup>, V. S. Yakovleva<sup>5</sup>

<sup>1</sup> Tomsk State University, Tomsk, Lenina avenue, 36

<sup>2</sup> Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 10/3 Academicheskyy ave., Tomsk 634055

<sup>3</sup> Tomsk State University of Architecture and Building, 2 Solyanaya sq., Tomsk 634003

<sup>4</sup> V.E. Zuev Institute of Atmospheric Optics of Siberian Branch of the Russian Academy of Science, Academician Zuev square, 1, Tomsk 634055

<sup>5</sup> Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Lenina avenue, 30

E-mail: vsyakovleva@tpu.ru

A synchronous experiment to study the dynamics of radiation quantities in various conditions: the urban environment and open countryside was carried out in August-September 2020. Every minute measurements of the ambient dose equivalent rate of  $\gamma$ -radiation,  $\beta$ -radiation flux density were made at 1 m height in the territories of the IMCES SB RAS geophysical observatory and at the BEC station of IAO SB RAS. Both monitoring points were equipped with OPTIOS optical rain gauges. The main purpose of the study was to study the differences in the response of the  $\beta$ - and  $\gamma$ -radiation background to liquid atmospheric precipitation inside the urban environment and in open areas, far from urban infrastructure and forests. It has been proven that monitoring point located within the city adequately reflects the meteorological situation, at least within a radius of 3 km.

*Key words: beta radiation, gamma background, precipitation, surface atmosphere, dynamics, intensity, monitoring, cloud.*

DOI: 10.26117/2079-6641-2020-32-3-165-179

Original article submitted: 07.09.2020

Revision submitted: 04.10.2020

**For citation.** Yakovlev G. A., et al Synchronous monitoring of  $\gamma$ ,  $\beta$ -background and atmospheric precipitations in geophysical observatories of IMCES SB RAS and BEC IAO SB RAS. *Vestnik KRAUNC. Fiz.-mat. nauki.* 2020, **32**: 3, 165-179. DOI: 10.26117/2079-6641-2020-32-3-165-179

**Competing interests.** The authors declare that there are no conflicts of interest regarding authorship and publication.

**Contribution and Responsibility.** All authors contributed to this article. Authors are solely responsible for providing the final version of the article in print. The final version of the manuscript was approved by all authors.

*The content is published under the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 International License (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru>)*

© Yakovlev G. A., et al, 2020

**Funding.** The experiment (study, research, investigation, analysis) was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation Project № IX.138.2.3.