

УДК 551.510.7

**РАДИАЦИОННЫЕ ВЕЛИЧИНЫ КАК ТРАССЕРЫ-ИНДИКАТОРЫ  
ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ ЯВЛЕНИЙ НА ТЕРРИТОРИИ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ**

**П. М. Нагорский<sup>1</sup>, В. С. Яковлева<sup>2</sup>, М. С. Черепнев<sup>2</sup>, Г. А. Яковлев<sup>3</sup>**

<sup>1</sup> Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН,  
634055, г. Томск, пр. Академический, 10 / 3,

<sup>2</sup> Национальный исследовательский Томский политехнический университет,  
634050, г. Томск, пр. Ленина 30,

<sup>3</sup> Муниципальное бюджетное общеобразовательное учреждение средняя  
общеобразовательная школа «Эврика-Развитие», 634050, г. Томск,  
пер. Юрточный 8, стр. 1.

E-mail: vsyakovleva@tpu.ru

В работе проанализированы результаты мониторинга согласованных вариаций радиационных величин на временных масштабах от синоптического до годового, которые могут по отдельности или в определенном наборе служить индикаторами экстремальных природных и техногенных явлений. Показано, что баланс между основными источниками ионизирующих излучений в приземной атмосфере зависит от времени года, а экстремумы – связаны с процессами схода (установления) снежного покрова. Предложен метод определения оптимального набора радиационных величин, которые при их синхронном мониторинге могут быть надежными и достоверными трассерами/индикаторами экстремальных природных или техногенных явлений.

*Ключевые слова: ионизирующее излучение, атмосфера, индикатор*

© Нагорский П. М. и др., 2016

MSC 81V35

**RADIATION VALUES AS TRACERS / INDICATORS OF EXTREMAL PHENOMENA  
AT THE TERRITORY OF WEST SIBERIA**

**P. M. Nagorskiy<sup>1</sup>, V. S. Yakovleva<sup>2</sup>, M. S. Cherepnev<sup>2</sup>, G. A. Yakovlev<sup>3</sup>**

<sup>1</sup> Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems SB RAS,  
634055, Tomsk Akademicheskaya str., 10/3, Russia,

<sup>2</sup> National Research Tomsk Polytechnic University, 634050, Tomsk, Lenin st., 30 Russia,

<sup>3</sup> Municipal budget educational institution, Secondary School "Eureka-Development",  
634050, Tomsk, Yrtochny side st. 8, build. 1., Russia.

E-mail: vsyakovleva@tpu.ru

The results of the monitoring of agreed variations of radiation values on time scales from the synoptic to an annual were analyzed in this paper. These radiation values can serve as indicators of extremal natural and technogenic phenomena, alone or in a certain set. It is shown that the balance between the main sources of ionizing radiation in the surface atmosphere depends on the time of year, and extremes appear due to processes of melting (formation) of snow cover. A method for determining the optimal set of radiation values, which when synchronous monitoring can be valid and reliable tracers / indicators of extremal natural or man-made phenomena, was developed.

*Key words: ionizing radiation, atmosphere, indicator*

© Nagorskiy P. M. et al., 2016

## Введение

Атмосферные радионуклиды, почвенные радиоактивные газы и ионизирующие излучения является широко используемыми и перспективными радиоактивными трассерами динамических процессов, протекающих в верхних слоях литосферы и приземной атмосфере, в т.ч. экстремальных природных явлений. Это обусловлено их замечательными индикаторными свойствами и в большинстве случаев более простой и экономичной процедурой контроля, по сравнению с не радиоактивными трассерами [1-4]. В связи с этим государственные структуры и научные коллективы производят радиационный мониторинг приземной атмосферы и исследование динамики активности ряда радионуклидов в грунте [2, 3].

Однако изменения окружающей среды и климата во многих регионах планеты, включая территорию Сибири, остаются недостаточно изученными как для прогноза вектора наблюдаемых изменений, так и для обоснованной оценки роли природных и техногенных факторов. Кроме того, в нынешнем переходном состоянии глобальной климатической системы экстремальные природные и техногенные явления (ЭЯ) проявляются, согласно данным МЧС России, с все более возрастающей частотой.

В существующих государственных системах радиационного мониторинга непрерывно измеряется только один параметр – мощность дозы  $\gamma$ - излучения. Остальные радиационные величины, такие как объемная активность изотопов радона и дочерних продуктов их распада, плотность потока  $\alpha$ - или  $\beta$ - излучения в атмосфере, плотность потока радона с поверхности грунта, измеряются при эпизодическом контроле [4-7]. Регистрируемые аномальные всплески в  $\gamma$ - фоне при недостаточности дополнительной информации сложно однозначно отнести к «сигналу тревоги» радиационных инцидентов. Например, аномальные всплески в атмосферном  $\gamma$ - фоне часто возникают в периоды прохождения циклонов, выпадения осадков [5]. Эти всплески в  $\gamma$ - фоне обусловлены повышением активности  $\gamma$ - изучающих дочерних продуктов распада радона (ДПР) и торона у земной поверхности, а не радиационным инцидентом.

Важное место также занимает получение экспериментальных и численных оценок степени влияния внешних факторов на динамику характеристик полей ионизирующих излучений (ИИ), радона и его ДПР [8-14]. Здесь следует отметить, что в суммарный фон ионизирующей радиации в приземной атмосфере основной вклад вносят: а) почвенный радон и торон совместно с их ДПР; б) атмосферные изотопы радона и их ДПР. Соотношение между этими источниками ионизирующей радиации определяет вклад каждого из них в изменяющихся метеорологических и геодинамических условиях. Оценки характеристик этих источников позволят вносить соответствующие корректировки в исследование проблемы расшифровки всплесков и, соответственно, физических явлений, проходящих на границе литосфера – атмосфера, а также при моделировании процессов взаимодействия литосфера-атмосфера региональными и глобальными моделями [10-14].

Одним из возможных направлений, позволяющих оценить степень влияния антропогенных, метеорологических и литосферных факторов на происхождение и состав ионизирующей радиации в приземном слое атмосферы, является анализ вариаций радиационных трассеров-индикаторов, которые представляют собой отношение потоков  $\alpha$ -,  $\beta$ - и  $\gamma$ - излучений [15, 16]. Анализ временных вариаций трассеров/индикаторов, введенных в [15, 16], во время прохождения мощного тайфуна через район атомной станции Фукусима (Япония) на Камчатку (п. Паратунка) позволил установить сле-

дующее. За время наблюдений (сентябрь–декабрь 2011 г.) в п. Паратунка зарегистрировано прохождение серии сильных тайфунов. Однако только тайфун, проходящий в конце ноября месяца через п. Паратунка, проходил и по территории аварийной станции Фукусима. Появление в атмосфере радиоактивных аэрозолей техногенного происхождения должно не только сопровождаться появлением новых радиоактивных элементов, но и соответствующими изменениями в вариациях атмосферных полей  $\beta$ - и  $\gamma$ -излучений и, соответственно, их отношения. Таким образом,  $\gamma / \beta$ -трассер может быть весьма чувствительным индикатором нестационарных процессов, связанных с экстремальными погодными и техногенными явлениями.

Рассмотренные в [15, 16] случаи касались отдельных, достаточно краткосрочных, природных и техногенных явлений. Поэтому представляются весьма актуальными оценки вариаций трассеров/индикаторов на больших временных масштабах: от синоптического до годового.

Основанием и исходными данными работы явился предложенный и осуществляемый с конца 2008 г. комплексный подход к мониторингу ионизирующей радиации [17-19]. Комплексный подход включает синхронные измерения временной и пространственной (в вертикальном разрезе) динамики характеристик полей  $\alpha$ -,  $\beta$ - и  $\gamma$ -излучений в системе «грунт – приземная атмосфера». Параллельно проводится измерение метеорологических, актинометрических и атмосферно-электрических величин. Комплексный радиационный мониторинг предназначен не только для индикации/прогноза экстремальных климатических явлений, но и техногенных аварий, экстремальных геодинамических процессов, а также для научных исследований и решения ряда прикладных задач в области радиоэкологии, геоэкологии, геофизики, инжиниринга.

Вышесказанное определило цель настоящей работы, заключающейся в анализе согласованных вариаций радиационных величин на временных масштабах от синоптического до годового, которые могут по отдельности или в определенном наборе служить индикаторами экстремальных природных и техногенных явлений.

## Измерительное оборудование и методология проведения эксперимента

Томская обсерватория радиоактивности и ионизирующих излучений (ТОРИИ, г. Томск, Академгородок) создавалась с целью мониторинга структуры и динамики характеристик радонового поля (плотности потоков радона и торона с поверхности земли, объемная активность радона, торона и их ДПР) и полей ионизирующих излучений в системе «литосфера-атмосфера-космос» [17-19].

Для исследований выбраны следующие радиационные величины, реагирующие «аномально» при подготовке и/или осуществлении одного или нескольких ЭЯ:

*характеристики полей радона в системе «грунт-атмосфера»:*

- объемная активность  $i$ -го радионуклида (радона, торона, дочерних продуктов распада) в воздухе приземной атмосферы на высоте или в грунте на глубине  $h$ ,  $A_{Vi}$ , Бк/м<sup>3</sup>;

- плотность потока радона с поверхности грунта  $q_{Rn}(z=0)$ , мБк/(м<sup>2</sup>с);

*характеристики полей ионизирующих излучений:*

- плотность потока ионизирующего излучения вида  $j$  на высоте  $z$ ,  $P_j(z)$ , м<sup>2</sup>/с;

- мощность амбиентного эквивалента дозы  $\dot{H}^{ast}(10)$ , мкЗв/ч;

- мощность поглощенной дозы  $\dot{D}_j$  ионизирующего излучения вида  $j$ , мкГр/ч.

На экспериментальной площадке ТОРИИ с конца 2008 г. развернут мониторинг, детальная схема которого представлена на рис. 1. Всего непрерывно регистрируется более 30 рядов данных о радиационных величинах (объемная активность радионуклидов, плотность потока ИИ, мощность дозы) и метеорологических величин с тактом 0,5–10 мин. Контроль характеристик полей  $\alpha$ ,  $\beta$ - и  $\gamma$ -излучений ведется 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.

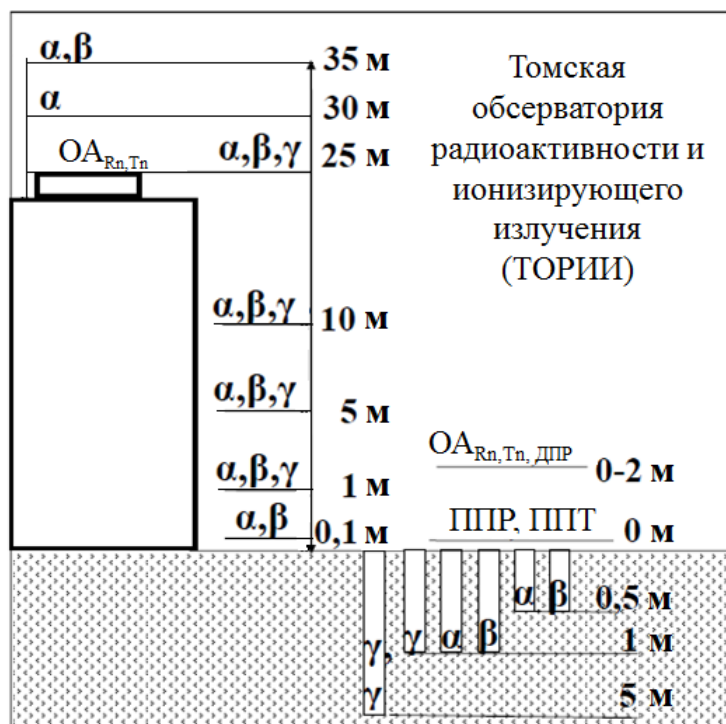


Рис. 1. Структурная схема контроля ионизирующих излучений и естественной радиоактивности в приземной атмосфере и поверхностном слое грунта

Для контроля плотности потоков и поглощенных доз  $\beta$ - и  $\gamma$ -излучений в приземной атмосфере были выбраны газоразрядные счетчики  $\gamma$ - и жесткого  $\beta$ -излучения СТС-6 и СБМ-19. Выбор детекторов был произведен с учетом требований к условиям эксплуатации приборов.

Универсальный комплекс включает лабораторный стенд «AtRad», состоящий из стандартной метеорологической мачты высотой 10 м, к которой прикреплены газоразрядные счетчики  $\beta$ - и  $\gamma$ -излучений и сцинтилляционные детекторы ИИ. Счетчики соединены с устройством питания и преобразования импульсов излучения в TTL формат. В роли сборщика данных выступает АЦП, работающий в счетном режиме, выполненный в виде РСІ платы (компания «Парсек» г. Дубна).

К каждому из 4-х газоразрядных счетчиков, измеряющих ( $\beta + \gamma$ )-излучение, добавлены однотипные счетчики, закрытые алюминиевым и пластиковым корпусами, и измеряющие только  $\gamma$ -излучение. Таким образом, по разности скорости счета импульсов между парными счетчиками, расположенными на одной высоте, выделялся «чистый»  $\beta$ -фон, и одновременно получись временные ряды данных о  $\gamma$ - и  $\beta$ -излучениях с частотой дискретизации 2 мин.

Для контроля и мониторинга почвенного радона по  $\alpha$ - и  $\beta$ -излучению были выбраны высокочувствительные сцинтилляционные блоки детектирования БДПА-01 и

БДПБ-01 (АТОМТЕХ, Беларусь). Выбор этих детекторов был сделан исходя из требований к широкому диапазону условий эксплуатации, поскольку они работают в диапазоне температур от минус 30 до 50 °С, и относительной влажности – вплоть до 98%. Эти же блоки, а также блоки детектирования - излучения БДКГ-03 были установлены на серии высот (1, 5, 25, 30 и 35 м, рис. 1).

Контроль объемной активности изотопов радона, дочерних продуктов их распада, ЭРОА, коэффициента равновесия между радоном и ДПР, а также величины РАЕС производится с использованием переносных приборов радиационного контроля: радиометры радона РРА-01М-03 и РГА-06П; радиометр ЭРОА радона РАМОН-01Н и радиометр ОА радона и торона и ДПР RTM 2200 (фирма SARAD, Германия). Радиометр RTM 2200 установлен на высоте 1 м от земной поверхности.

Мониторинг метеорологических, актинометрических и атмосферно-электрических величин (температура атмосферы –  $T$ , давление –  $p$ , относительная влажность –  $h$ , скорость и направление ветра –  $w$ , температура поверхности –  $T_p$  и подповерхностные температуры –  $T_s$  на серии глубин) в ИМКЭС СО РАН проводится с помощью автоматизированной информационно-измерительной системы. В ее состав дополнительно входят измерители напряженности электрического поля атмосферы  $E$  «Поле-2», полярных электропроводностей  $L_{\pm}$  «Электропроводность-2» и уровня  $\gamma$ -фона ИРФ-3Т в помещении, которое находится непосредственно под измерительной площадкой. Приходящая солнечная радиация  $P_r$  измеряется пиранометром Kipp & Zonen CM-11 и фотометром NILU-UV-6Т. Измерения – непрерывные, с тактом 1 минута. Параллельно, измерения основных метеопараметров и характеристик турбулентности с тактом в 1 минуту ведется с помощью ультразвуковой метеостанции АМК-3. Для контроля текущего состояния активного слоя почвы и оценки вариаций конвективного газообмена с атмосферой проводятся измерения температуры почвы при помощи резисторных температурных датчиков, расположенных на ее поверхности и на серии глубин (до 5 метров).

Вариации основных компонент ионизирующей радиации и метеовеличин за 2011–2015 гг. представлены на рис. 2. Для исключения вариаций, связанных с быстропротекающими метеорологическими и аналогичными по временному масштабу явлениями, проведена агрегация данных и отфильтрованы все масштабы с периодами менее 10 суток. Масштаб 10 суток выбран потому, что он превосходит масштаб основных метеорологических процессов (циклоны и антициклоны) для территории Западной Сибири (за исключением блокирующих антициклонов).

## Согласованные вариации полей ионизирующей радиации и метеовеличин

Выбор и оценка оптимального набора радиационных величин из выявленных по предварительным измерениям радиационных индикаторов ЭЯ должны базироваться на регистрации и анализе отклонений зарегистрированных величин от их невозмущенных значений во временной, частотной и (или) пространственной области. Эти невозмущенные значения, в свою очередь, могут испытывать вариации, обусловленные более продолжительными процессами. В нашем случае таким процессом с наименьшим периодом, значительно превосходящим масштаб анализируемых экстремальных явлений, следует рассматривать годовой цикл.

База данных мониторинга полей ионизирующих излучений и радиоактивности охватывает временной интервал с 2009 года и по настоящее время. Наиболее полные пространственно-временные данные были получены в 2012–2013 гг.

**Сезонные вариации анализируемых величин.** Анализ данных по вариациям полей естественной радиоактивности и метеовеличин за 2011–2015 гг., представленных на рис. 2, показывает, что минимальные температуры и максимальные значения атмосферного давления в годовом цикле не совпадают с минимумами в уровнях  $\beta$ - и  $\gamma$ - радиоактивности.

Переход к зимнему сезону сопровождается синхронным снижением  $\gamma$ - фона на всех высотах. Динамика  $\beta$ - фона практически аналогична, с небольшими отличиями. Появление снежного покрова приводит к тому, что, вначале уровни  $\beta$ - и  $\gamma$ - фона перестают зависеть от высоты, а затем, при увеличении толщины снежного покрова, начинают нарастать с высотой.

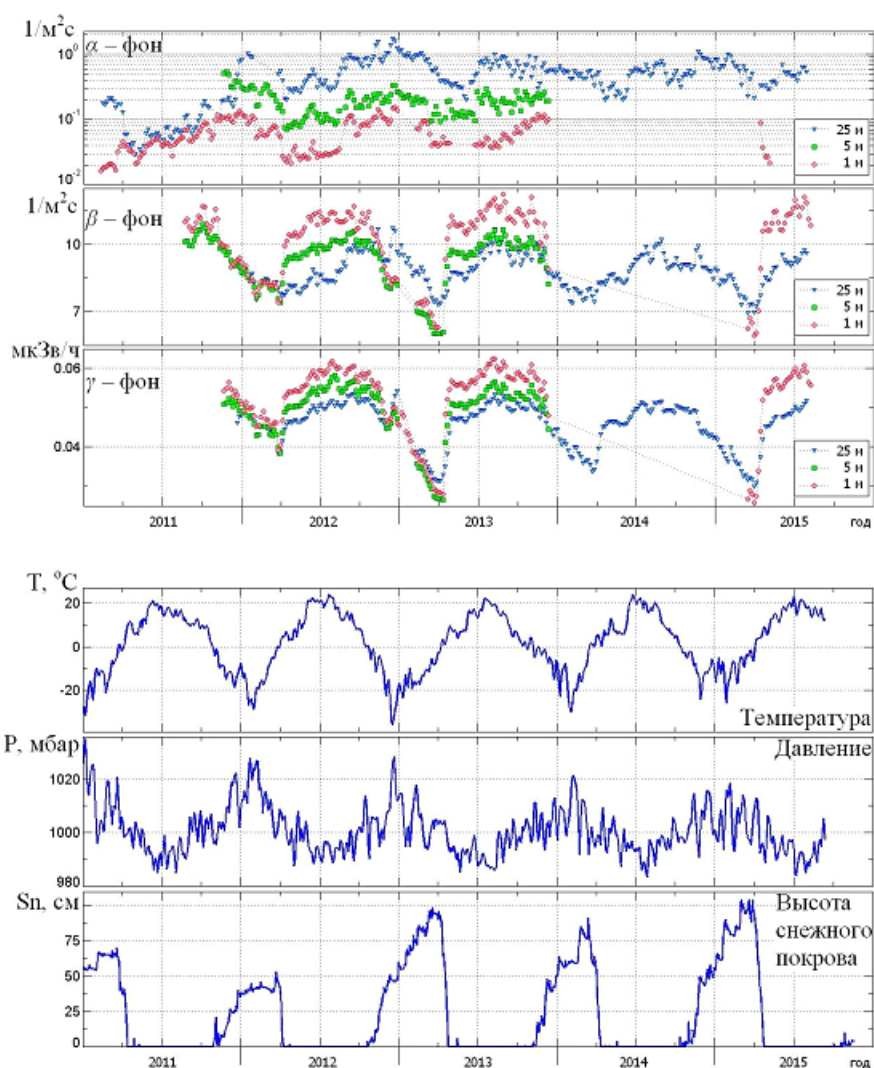


Рис. 2. Вариации  $\alpha$ -,  $\beta$ - и  $\gamma$ - компонент радиоактивного фона и метеовеличин в приземной атмосфере (2011–2015 гг.). Здесь:  $T$  – температура приземной атмосферы,  $P$  – давление,  $S_n$  – высота снежного покрова

Увеличение снежного покрова с 0,5 м до 1 м приводит к образованию «провода» в уровнях  $\beta$ - и  $\gamma$ -излучений. Летом уровни  $\beta$ - и  $\gamma$ -радиоактивности имеют слабовыраженный максимум в годовом цикле.

Анализ данных мониторинга показал: а) существует явная зависимость между уровнем снежного покрова и уровнями  $\alpha$ -,  $\beta$ -,  $\gamma$ -радиоактивности; б) в годовом цикле отмечается явный сдвиг между вариациями  $\alpha$ - и  $\beta$ -,  $\gamma$ -радиоактивности; в) появление снежного покрова приводит к изменению знака вертикальных градиентов  $\beta$ - и  $\gamma$ -фона.

Для  $\alpha$ -радиоактивности существенен разброс значений на разных высотах. Хотя для нее практически отсутствует годовая вариация, можно выделить слабый минимум  $\alpha$ -радиоактивности, приходящийся на II-ой квартал года. Большая дисперсия данных на различных высотах связана, в первую очередь с тем, что на уровень  $\alpha$ -радиоактивности в приземном слое ниже 20–25 м, сильное влияние оказывают местные предметы (деревья, строения, и т.д.) из-за малой длины пробега  $\alpha$ -частиц распадающихся изотопов. Выше 20–25 м, вследствие перемешивания, это влияние исчезает. Согласно данным мониторинга на высотах 25 и 35 м уровни  $\alpha$ -радиоактивности фактически совпадают.

Вариации сглаженных величин  $\beta$ - и  $\gamma$ -радиоактивности имеют высокую степень взаимной корреляции  $R_{max}(\tau \sim 0) = +0.8$  и фактическое отсутствие сдвига  $\tau$  между рядами. Величина нормированных коэффициентов функции взаимной корреляции между вариациями  $\alpha$ - и  $\beta$ -фона, а также между  $\alpha$ - и  $\gamma$ -фона не превосходят  $R_{max}(\tau \sim 0) \leq +0.6$ . Запаздывание вариаций  $\alpha$ -фона относительно вариаций  $\beta$ - и  $\gamma$ -фона  $\tau$  составляет:  $\tau_{\alpha\beta} \sim 40$  суток,  $\tau_{\alpha\gamma} \sim 40$  суток. Ход нормированных функций взаимной корреляции иллюстрируется рис. 3.

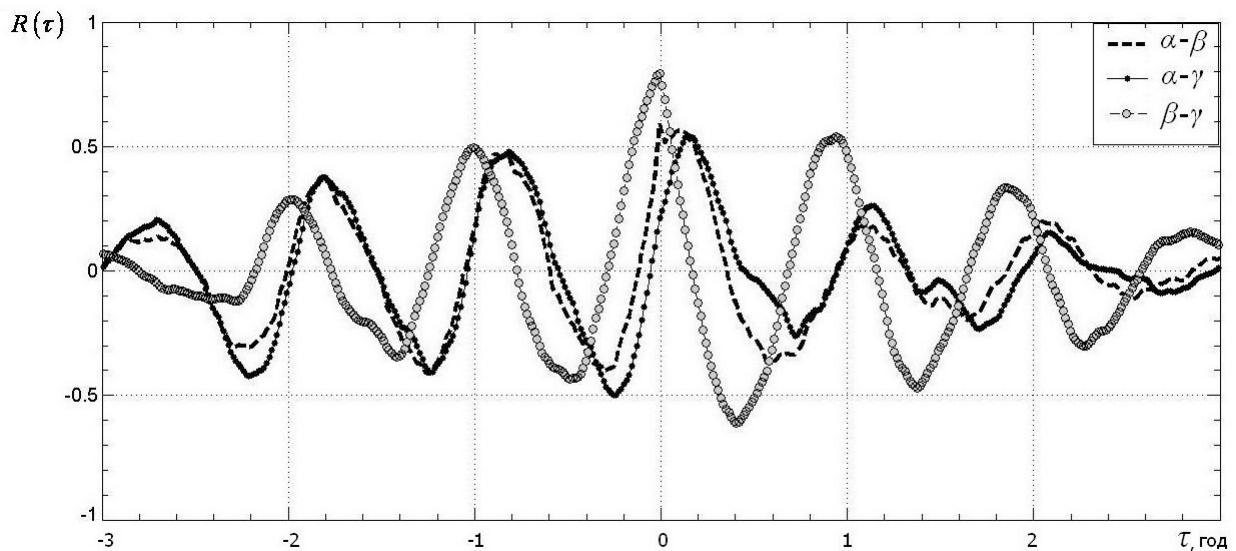


Рис. 3. Нормированные функции взаимной корреляции  $R_{max}(\tau)$  между рядами  $\alpha$ -,  $\beta$ - и  $\gamma$ -фона. По оси абсцисс отложен сдвиг  $\tau$  в годах.

Динамика ионизирующего излучения оказывает существенное влияние на сезонные вариации введенных в [15, 16] радиационных трассеров. Перейдем к анализу сезонной динамики радиационных трассеров, которые могут быть предложены на

основании результатов мониторинга характеристик полей природных ионизирующих излучений.

Динамика трассеров-индикаторов в годовом цикле представлена на рис. 4.

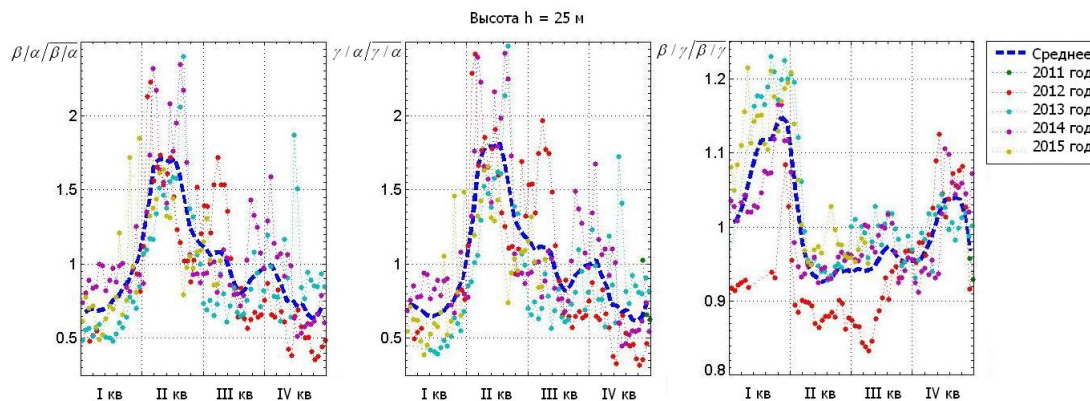


Рис. 4. Нормированные сезонные вариации трассеров-индикаторов ионизирующей вариации, высота  $h = 25$  м. Штриховая линия – усредненный сезонный ход на временном интервале 2011-2015 гг.

На рис.4 в качестве базовой взята высота расположения датчиков, равная 25 м. Эта высота превосходит высоты всех близлежащих местных строений и деревьев. Приведенные на рис. 4 данные по  $\beta/\gamma$ ,  $\gamma/\alpha$ ,  $\beta/\alpha$  трассерам нормированы на средние значения соответствующих трассеров. Из анализа данных мониторинга, часть из которых представлена на рис. 4, следует, что трассеры  $\alpha/\beta$  и  $\alpha/\gamma$ , вне зависимости от высоты расположения датчиков  $\beta$ - и  $\gamma$ - излучений, ведут себя идентичным образом. Идентичным образом ведут себя в годовом цикле и обратные трассеры  $\beta/\alpha$ ,  $\gamma/\alpha$ . Такая идентичность связана, в первую очередь, с тем, что длина пробега в атмосфере  $\alpha$ - частиц на порядки меньше чем  $\beta$ -частиц и  $\gamma$ -квантов.

Для  $\beta/\gamma$  трассера максимумы в годовом цикле обусловлены процессами установления и схода снежного покрова, а главный максимум в годовом цикле связан со сходом снежного покрова. Также как и для вариаций уровней  $\alpha$ ,  $\beta$ - и  $\gamma$ -излучений для рассматриваемых трассеров-индикаторов существует явное запаздывание между  $\beta/\gamma$ - трассером и  $\alpha$ - трассерами ( $\beta/\alpha$  и  $\gamma/\alpha$ ) в весенне-летний сезон и опережение – в осенне-зимний (рис. 4).

Анализ данных по динамике трассеров-индикаторов, расположенных на серии одинаковых высот показал, что вариации радиационного фона уменьшаются, что свидетельствует о важности учета пространственного распределения характеристик полей ионизирующих излучений. Как следует из представленных материалов, наибольшее подобие в годовом ходе зарегистрировано для трассеров  $\alpha/\beta$ ,  $\alpha/\gamma$ , и обратных им трассеров  $\beta/\alpha$ ,  $\gamma/\alpha$ .

Представленные материалы наглядно показывают следующее. Баланс между основными источниками ионизирующих излучений в приземной атмосфере (почвенные и атмосферные изотопы радона совместно с их ДПР) определяется временем года, а их максимумы связаны с процессами схода (установления) снежного покрова.



## Вариации анализируемых величин синоптического масштаба

Рассмотрим временные масштабы временных вариаций трассеров, радиационных и метеорологических величин, превышающие суточный. Для этого сгруппируем экстремальные явления по генетическому принципу следующим образом:

- аномальные по длительности периоды отсутствия осадков, экстремально высоких и низких температур, обусловленные блокирующими антициклонами;
- прохождение серий циклонов (антициклонов);
- ЭЯ, связанные с ограничением дальности видимости  $S_m$ , к этой группе относятся такие явления как мгла, дым лесных пожаров и т.д.

За период проведения мониторинга длительное понижение среднесуточной температуры до  $-40$  °С было зарегистрировано с 10 по 20 декабря 2012 г. Вариации ряда трассеров-индикаторов ионизирующих излучений при понижении температуры и аномально высоком повышении давления представлены на рис. 5а. На нижних панелях рис. 5а представлены данные по давлению и температуре.

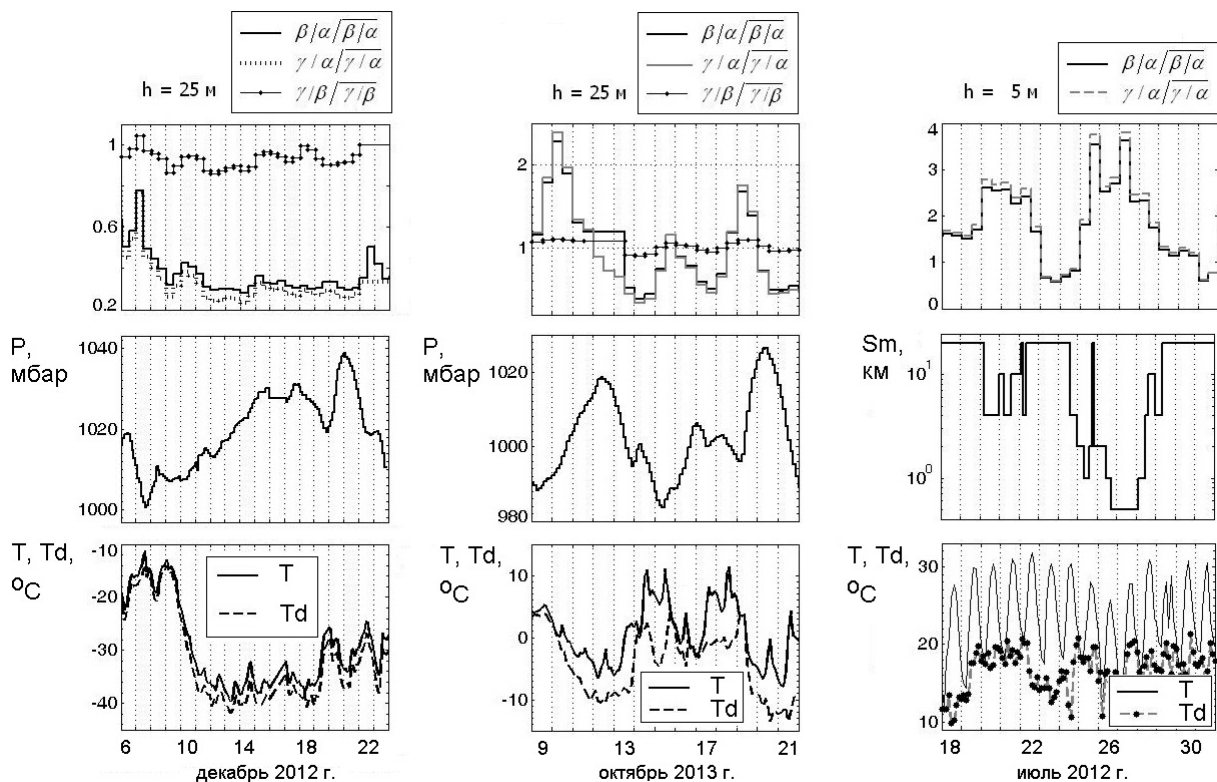


Рис. 5. Реакция трассеров-индикаторов на экстремально низкие температуры и экстремально высокое атмосферное давление (а), прохождение серии циклонов (б), задымленность атмосферы от интенсивных летних лесных пожаров (в). Здесь:  $T_d$  – температура точки росы,  $S_m$  – дальность видимости,  $h$  – высота расположения сцинтилляционных датчиков. Интервалы усреднения: данных по ионизирующим излучениям – одни сутки; метеоданных – 3 часа

Для  $\beta/\beta$  и  $\beta/\gamma$  трассеров повышение давления и понижение температуры приводит вначале к росту значений соответствующих трассеров, а затем – к их насыщению. Для трассера  $\gamma(25\text{м}/\beta(25\text{м}))$  зарегистрирована обратная картина: вначале

происходит падение значений трассера, а затем – насыщение. Для трассеров  $\gamma/\beta$  на высотах 1 и 5 м наблюдается плавное возрастание значений трассеров, которое только в конце анализируемого периода сменяется понижением. Для трассера  $\alpha(25\text{м}/\alpha(5\text{м}))$  реакция на понижение температуры и повышение давления практически полностью отсутствует, а для трассера  $\alpha(25\text{м}/\alpha(1\text{м}))$  – она аналогична реакции трассера  $\beta(25\text{м}/\beta(5\text{м}))$ . Значения анализируемых трассеров испытывают квазипериодические вариации с периодом 2–3 суток. Причина появления этих вариаций не установлена. В вариациях основных метеовеличин данный период не зарегистрирован. Выпадения осадков с 10 по 18 декабря 2012 г. (период наибольшего падения среднесуточной температуры) зарегистрировано не было. В целом, согласно представленным данным, реакция на экстремальное понижение температуры и повышение давления трассеров  $\beta/\beta$  и  $\beta/\gamma$ , зарегистрированных на серии высот, подобна.

Вариации трассеров во время прохождения серии циклонических образований (рис. 5б). В этом случае зарегистрированы согласованные квазипериодические колебания  $\beta/\gamma$  - трассера, температуры и давления. Для трассеров  $\alpha(25\text{м}/\alpha(5\text{м}))$  и  $\alpha(25\text{м}/\alpha(1\text{м}))$  реакция на прохождение циклонов практически отсутствует. Вариации трассеров  $\gamma(25\text{м}/\gamma(5\text{м}))$  и  $\gamma(25\text{м}/\gamma(1\text{м}))$  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 суток) влияние на динамику анализируемых трассеров.

Таким образом, для вариаций с периодами более 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 метеовеличин.

Ограничение дальности видимости, которое складывается в дымовом смоге от лесных пожаров, также приводит к изменению уровня радиоактивного фона и, соответственно, трассеров. Аэрозоль, в том числе и радиоактивный, наряду с парниковыми газами является важным климатообразующим фактором, влияющим на радиационный баланс Земли [6]. Детальные исследования состояния приземного слоя атмосферы были проведены при длительных лесных пожарах на территории Западной Сибири летом 2012 года [20]. Лесные пожары 2012 года в Сибири продолжались с июня по август, охватили огромную территорию и нанесли колоссальный ущерб. Наиболее экстремальные условия по замутнённости атмосферы сложились в третьей декаде июля (24-27 июля 2012 года), когда дымовой шлейф от удаленных очагов пожара устойчиво оставался на территории г. Томска, а метеорологическая дальность видимости уменьшалась до десятков-сотен метров. Синоптическая ситуация в этот период над всей восточной частью Западной Сибири была обусловлена малоградиентным барическим полем. Температура воздуха изменялась в пределах от +15 °С в ночные часы до +30° С днём, ветер был слабым (1–3 м/с) северного направления, осадки отсутствовали.

Рассмотрим вариации уровня естественной радиоактивности с 29 июня по 30 июля 2012 г. Этот интервал включает несколько наиболее длительных временных участков интенсивного задымления (от двух суток и более). На основании совместного анализа вариаций уровней ионизирующей радиации и дальности видимости  $S_m$  обнаружено следующее. Интенсивное задымление, и связанное с ним уменьшение  $S_m$ , приводит к согласованному уменьшению уровня  $\alpha$ -фона. Для  $\beta$ - и  $\gamma$ -фона зарегистрировано плавное нарастание уровня фона на интервале интенсивного за-

дымления. Динамика исследуемых трассеров представлена на рис. 5в. На верхней панели приведены данные по метеорологической дальности видимости  $S_m$ .

## Определение оптимального набора радиационных величин

Комплексный мониторинг, осуществляемый в Томске в ТОРИИ, является избыточным для его массового копирования другими научными коллективами. Анализ данных многолетнего мониторинга позволил разработать метод определения оптимального набора радиационных величин, которые при их синхронном мониторинге могут служить трассерами/индикаторами экстремальных климатических явлений. Согласно методу, для надежной идентификации одного или нескольких из рассмотренных выше ЭЯ установленная аппаратура должна проводить непрерывные измерения следующих величин: а) плотность потока альфа- и бета-излучения не менее, чем на 3-х высотах 1–1,5 м, 5–10 м и 25–40 м с тактом от 1 до 10 мин; б) мощность AMBIENTного эквивалента дозы - излучения не менее, чем на 2-х высотах 1–1,5 м и 25–40 м с тактом от 1 до 10 мин.; в) плотность потока радона с поверхности грунта с тактом не более 30 мин.; г) объемную активность радона в грунте на не менее, чем 2-х глубинах 0,4–0,6 м и 0,8–1,2 м с тактом не более 60 мин; д) объемную активность изотопов радона и их ДПР в воздухе приземной атмосферы на не менее, чем 2-х высотах от 0,9–1,5 м и 25–40 м с тактом не более 60 мин.

Выбор количества высот контроля и рекомендуемые диапазоны высот установки детекторов ИИ обосновываются тем, что изменение турбулентности атмосферы сильно изменяет профиль объемной активности радона, торона и продуктов их распада, особенно у земной поверхности, следовательно, приводит к существенным вариациям характеристик полей ИИ. Количество глубин (скважин) контроля и рекомендуемые диапазоны глубин установки детекторов ИИ обосновано тем, что на глубинах до 1 метра активность радона может существенно изменяться во времени в зависимости от метеоусловий, состояния атмосферы и грунта, при этом нарушается радиоактивное равновесие в природных рядах  $^{238}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$  после изотопов радона. Это является следствием «утечки» изотопов радона из грунта в приземную атмосферу.

Параллельно необходимо проводить мониторинг следующих метеорологических величин с тактом от 0,5 до 1 мин: а) температура, атмосферное давление, относительная влажность атмосферы, скорость и направление ветра приземного слоя атмосферы; б) температура поверхности и подповерхностные температуры; г) влажность грунта; д); напряжённость электрического поля и полярные электропроводности; е) приходящая солнечная радиация; ж) характеристики турбулентности атмосферы.

Из выбранного набора величин ионизирующей радиации и их отношений необходимо оставить только те, которые удовлетворяют следующим критериям: а) аномально реагирующие не менее, чем в 95% случаев на ЭЯ; б) если более, чем одна радиационная величина или их отношение аномально реагируют на ЭЯ, следует минимизировать их количество, оставляя те, который позволяют однозначно идентифицировать конкретное ЭЯ; в) в наборе должна быть не менее, чем одна радиационная величина или их отношение, которая достоверно показывает, что аномальная реакция вызвана именно ЭЯ, а не радиационными авариями или изменением напряженно-деформированного состояния земной коры.

## Заключение

Анализ данных мониторинга вариаций ионизирующей радиации и метеовеличин на территории Западной Сибири на временных масштабах от синоптического до годового позволил:

- установить, что баланс между основными источниками ионизирующих излучений в приземной атмосфере зависит от времени года, а экстремумы – связаны с процессами схода (установления) снежного покрова;

- выявить реакцию трассеров-индикаторов на экстремально низкие температуры и экстремально высокое атмосферное давление, на прохождение серии циклонов и на задымленность атмосферы от лесных пожаров;

- определить радиационные величины, одинаково реагирующие на определенное ЭЯ, что позволило предложить метод определения оптимального набора радиационных величин, которые при их синхронном мониторинге могут служить трассерами/индикаторами экстремальных климатических явлений.

В целом, полученные результаты свидетельствуют о сильном влиянии внешних условий на вклад различных источников в суммарный уровень ионизирующей радиации приземной атмосферы. Принципиальное значение обнаруженных эффектов связано с той ролью, которую ионизирующая радиация играет как в формировании погодных условий, так и в биосистемных процессах.

Работа выполнена при поддержке ФЦП № 14.575.21.0105.

## Список литературы

- [1] Zahorowski W., Chambers S., Henderson-Sellers A., “Ground based radon-222 observations and their application to atmospheric studies”, *J. Environ. Radioact.*, **76** (2004), 3–33.
- [2] Уткин В. И., “Радоновая проблема в экологии”, *Соросовский образовательный журнал*, 2000, № 3, 73–80.
- [3] *United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR)*, 1982 report to the General Assembly with annexes, **77**, United Nations sales publication, New York, 1982, 114 pp.
- [4] Berezina E. V., Elansky N. F., Moiseenko K. B., et al., “Estimation of nocturnal <sup>222</sup>Rn soil fluxes over Russia from TROICA measurements”, *Atmos. Chem. Phys.*, **13** (2013), 11695–11708.
- [5] Renfro A. A., Cochran J. K., Colle B. A., “Atmospheric fluxes of <sup>7</sup>Be and <sup>210</sup>Pb on monthly time-scales and during rainfall events at Stony Brook, New York (USA)”, *J. of Environmental Radioactivity*, **116** (2013), 114–123.
- [6] Duenas C., et al., “Air mass origin and its influence on radionuclide activities (<sup>7</sup>Be and <sup>210</sup>Pb) in aerosol particles at a coastal site in the western Mediterranean”, *Atmospheric Research*, **101** (2011), 205–214.
- [7] Яковлева В. С., Нагорский П. М., Черепнев М. С., “Формирование  $\alpha$ -,  $\beta$ - и  $\gamma$ -полей приземной атмосферы природными атмосферными радионуклидами”, *Вестник КРАУНЦ. Физ.-мат. науки*, 2014, № 1(8), 86–96.
- [8] Денисов С. Н., Елисеев А. В., Мохов И. И., “Оценка изменений эмиссии метана болотными экосистемами северной Евразии в XXI веке с использованием результатов расчетов с региональной моделью климата”, *Метеорология и гидрология*, 2010, № 2, 55–62.
- [9] Rasch P. J., et al., “A comparison of scavenging and deposition processes in global models: results from the WCRP Cambridge Workshop of 1995”, *Tellus*, 2000, № 52B, 1025–1056.
- [10] Yakovleva V. S., Parovik R. I., “Solution of diffusion-advective equation of radon transport in many-layered geological medium”, *Nukleonika*, **55:4** (2010), 601–606.

- [11] Hirao S, Yamazawa H, Moriizumi J., “Estimation of the Global  $^{222}\text{Rn}$  Flux Density from the Earth’s Surface”, *Jpn. J. Health Phys.*, **45**:2 (2010), 161–171.
- [12] Паровик Р. И., “Модель нестационарной диффузии-адвекции радона системе грунт-атмосфера”, *Вестник КРАУНЦ. Физ.-мат. науки*, 2010, № 1(1), 39–45.
- [13] Conen F., Robertson L. B., “Latitudinal distribution of Rn-222 flux from continents”, *Tellus.*, 2002, № 54B, 127–133.
- [14] Яковлева В. С., Паровик Р. И., “Численное решение уравнения диффузии-адвекции радона в многослойных геологических средах”, *Вестник КРАУНЦ. Физ.-мат. науки*, 2011, № 1(2), 44–54.
- [15] Nagorskiy P. M., Cherepnev M. S., Firstov P. P., Ippolitov I. I., Makarov E. O., Smirnov S. E., Smirnov S. V., Vukolov A. V., Yakovleva V. S., *Consistency of Component Variations of Ionizing Radiation and Atmospheric-Electric Values*, XV International Conference on Atmospheric Electricity, Norman, Oklahoma, U.S.A. 15–20 June 2014, Preprint. 4.
- [16] Нагорский П. М., Макаров Е. О., Фирстов П. П., Яковлева В. С. Радиационный  $\beta / \gamma$  – трассер опасных природных явлений, *Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России*, V научно-техн. конф. (Сб. статей), ИВиС ДВО РАН., Петропавловск-Камчатский, 2015, 1–5 [http://www.emsd.ru/conf2015lib/pdf/mon/Nagorskiy\\_etc.pdf](http://www.emsd.ru/conf2015lib/pdf/mon/Nagorskiy_etc.pdf).
- [17] Яковлева В. С. и др., “Методология многофакторного эксперимента по процессам переноса радона в системе «литосфера–атмосфера»”, *АНРИ*, 2009, № 4, 55–60.
- [18] Яковлева В. С., Каратаев В. Д., Вуколов А. В., Ипполитов И. И., Кабанов М. В., Нагорский П. М., “Развитие технологии радиационного мониторинга в городской среде”, *Вестник КРАУНЦ. Физ.-мат. науки*, 2015, № 1(10), 65–71.
- [19] Яковлева В. С., Нагорский П. М., “Особенности калибровки детекторов ионизирующих излучений, используемых для мониторинга почвенного радона”, *Вестник КРАУНЦ. Физ.-мат. науки*, 2015, № 1(10), 54–64.
- [20] Ипполитов И. И., Кабанов М. В., Нагорский П. М., Пхалагов Ю. А., Смирнов С. В., “Суточные вариации напряженности электрического поля в дымах от лесных пожаров”, *Доклады Академии наук*, **453**:2 (2013), 207–210.

Поступила в редакцию / Original article submitted: 20.03.2016