
**ПРОБЛЕМЫ ЯДЕРНОЙ, РАДИАЦИОННОЙ
И ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ**

УДК 550.34: 551.243: 550.835.2

**МОНИТОРИНГ РАДОНА КАК ИНДИКАТОРА
СЕЙСМОТЕКТОНИЧЕСКИХ СОБЫТИЙ НА ПЛОЩАДКЕ АЭС
«БУШЕР-1» И ПРИЛЕГАЮЩЕЙ ТЕРРИТОРИИ ПРОВИНЦИИ
БУШЕР ИСЛАМСКОЙ РЕСПУБЛИКИ ИРАН**

© 2017 В.Ю. Ульянов

*Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры
(ПГАСиА), Днепрпетровск, Украина*

В работе дано обоснование применения на площадке действующей АЭС «Бушер-1», расположенной в Исламской Республике Иран, инновационной для данных условий системы предупреждения о сейсмической опасности. Предлагаемая система предупреждения базируется на основе комплексного мониторинга радона с целью повышения безопасности при эксплуатации объектов и оборудования АЭС. Положение о применении данной системы в рамках проведения мониторинга недр на АЭС «Бушер-1» должно быть закреплено в должностных инструкциях. Данная система может быть использована в рамках сейсмомониторинга прочих площадок АЭС, расположенных в зонах с повышенной сейсмичностью.

Ключевые слова: Исламская Республика Иран, АЭС «Бушер-1», комплексный мониторинг радона, радоновая сейсмостанция, радон-монитор.

Поступила в редакцию: 07.12.2017

ВВЕДЕНИЕ

В составе потока газов, свободно разгружающегося в атмосферу Земли в зонах тектонических разломов земной коры, наряду с метаном, углекислым газом, водородом и гелием, повсеместно присутствует также инертный газ – радон (^{222}Rn). Его физические и радиометрические свойства: инертность, малый период полураспада (3,82 сут), наличие дочерних продуктов распада послужили основанием для его изучения и использования в качестве одного из индикаторов при установлении степени активности таких зон [1]. Постоянное наблюдение за зонами разломов особенно важно, т.к. в них часто наблюдаются деформации земной поверхности, приводящие к нарушениям целостности зданий, сооружений, дорог, трубопроводов в т.ч. и особо важных объектов, таких как АЭС [2].

Формирование аномалий радиоактивного газа радона в покровных отложениях над зонами разломов в своё время послужило теоретической основой применения эманационной (радоновой) съемки для картирования разрывных нарушений на закрытых площадях. В 70-е годы прошлого столетия была установлена прямая связь между интенсивностью радоновых аномалий и геодинамическими процессами в зонах разломов. Это явление послужило основой новому направлению исследований в геологии – т.н. структурно-геодинамическому картированию [3]. Исходя из вышесказанного, особенности поведения ^{222}Rn в геологическом пространстве создают условия для непрерывного мониторинга за ним в качестве индикатора напряженного

состояния литосферы. Это подтверждается и аномально высокими концентрациями ^{222}Rn в периоды, предшествующие землетрясениям [4].

Значимость мониторинга радона для целей сейсмопрогноза подтверждается известными событиями в итальянской Л'Аквиле (Абруццо), происшедшими в апреле 2009г, которые были предсказаны за несколько месяцев сейсмологом Джампаоло Джулиани (Giampaolo Giuliani) по наблюдениям почвенного радона [5]. Актуальность проведения подобных исследований на территории Ирана подтверждается и последними сейсмическими событиями в провинции Керманшах, произошедшими в ночь на 12 ноября 2017г. с $M=7.3$, и в провинции Керман 1 декабря 2017г. с $M=6.3$, приведшими к многочисленным разрушениям и человеческим жертвам.

Но всё же, несмотря на всё вышесказанное, радону как возможному индикатору тектонического события уделяется совершенно недостаточное внимание, особенно это касается радона в подземных водах. И это несмотря на повсеместно создаваемые вокруг АЭС РФ и других стран СНГ геодинамические полигоны, где начаты и активно проводятся высокоточные геодезические и сейсмологические исследования, дополненные комплексами специальных наблюдений, отвечающих требованиям нормативных документов, особенно разработанным в последние годы [6-9]. Дополнительный импульс работы в этом направлении получили после известных событий на японской АЭС «Фукусима-Даичи» («Fukushima Daiichi»).

МОНИТОРИНГ РАДОНА (^{222}Rn) КАК ФАКТОР ПОВЫШЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ АЭС «БУШЕР-1»

С целью недопущения катастрофических последствий сейсмических событий, происшедших на японской АЭС «Фукусима-Даичи» («Fukushima Daiichi»), существующая на площадке АЭС «Бушер-1» система УУ (КИП контроля землетрясений в сооружении 1ZA) нуждается в дополнении новой системой – мониторинга радона (^{222}Rn), которую предстоит создать на АЭС впервые. Следует особо отметить, что предлагаемая система по своему предназначению не будет являться развитием существующих на АЭС систем типа АСКРО и ЛВРК, хотя может быть интегрирована в отдельные их сегменты. В том, что в условиях повышенной сейсмичности подобные системы вполне могут быть успешно реализованы, свидетельствуют результаты многочисленных исследований (Toutain, Baubron, 1999; Ghosh et al., 2009; Woith, 2015).

В условиях АЭС «Бушер-1» данная система представляется особенно необходимой, учитывая всё усиливающееся воздействие даже слабых сейсмических событий на состояние строительных конструкций АЭС, особенно возведённых в 70-годах прошлого века и испытавших во время ирано-иракской войны 1980-1988 гг. неоднократные техногенные воздействия минно-взрывного характера.

Следует особо отметить, что предлагаемая система предназначена для использования оперативным персоналом и службой эксплуатации сооружений АЭС. Предполагается определённое сопряжение её элементов с КИП системы УУ в здании 1ZA, а также с предполагаемой на площадке АЭС постоянной сейсмической станцией, совершенно необходимой при её дальнейшем расширении (блоки 2, 3, а в перспективе и блоки 4, 5), решение по которым уже принято, и работы на площадке 2 и 3 блоков начаты. Тем более, что МРЗ для площадки определено в 9 баллов с $0.4g$ для существующего 1 блока и $0.5g$ для 2 и 3 блоков. В дальнейшем, при достаточном обосновании, данная система может быть также включена и в общую систему сейсмической защиты АЭС, один из вариантов которой в РФ уже создан и недавно

запущен в опытную эксплуатацию на Смоленской АЭС.

Функционирование отдельных элементов системы на первых порах предполагается в частично непрерывном т.н. «ручном» режиме, а в последующем – в полностью автоматическом. Способ эксплуатации предлагаемой системы достаточно прост в выполнении. Измерения сводятся к одновременной непрерывной автоматической регистрации объёмной активности радона (ОАР) в почвенном воздухе на специально выбранных участках при помощи серийно выпускаемых т.н. автоматических радоновых станций, а также к определению содержания радона в пробах подземных вод, отбираемых на смежных участках из дренажных колодцев, с последующей обработкой проб в лабораторных условиях или непосредственно на месте. При необходимости, производится экспресс-отбор проб подземных вод из мониторинговых скважин глубиной не менее 30 м. Для регистрации радона используют на первых порах серийную измерительную аппаратуру и апробированные методики [10,11,12].

ПЕРЕЧЕНЬ ОБЪЕКТОВ МОНИТОРИНГА РАДОНА НА ПЛОЩАДКЕ АЭС И ПРИЛЕГАЮЩЕЙ ТЕРРИТОРИИ ПРОВИНЦИИ БУШЕР

Для качественного проведения мониторинга радона на площадке АЭС «Бушер-1» на первых порах перечень работ и объектов мониторинга может быть следующим:

- размещение автоматической радоновой станции в мало глубинной сухой скважине на участке площадки 1 блока возле зданий ZL.1., ZK.3 и изначально настроенной на непрерывный режим проведения измерений;
- периодический (ежедневный) отбор проб из дренажного колодца ПН-1 у сооружения 1ZF (из отводящего трубопровода в колодец ливневой канализации SF13);
- выборочный отбор проб воды на забое скважин R 1, R 16, R 24, PI_7 (для сравнительных целей допускается производить отбор проб и из скважин глубиной 15 м, в первую голову, из № 10 у здания 1ZA/B). При наличии достаточного обоснования возможен выборочный отбор проб и из скважин за пределами площадки 1 блока (скважины серии PO, EXO, PI и пр.);
- размещение приборов для обработки проб воды из скважин в бывшей химической лаборатории здания ZG.0 или в новом здании грунтовой лаборатории, оборудованной специально для обработки проб грунтов и воды во время проведения изысканий на площадке под новые блоки АЭС;
- размещение приёмной и анализирующей аппаратуры всей системы возможно в здании ZL.1.

Выбор скважин для опробования за пределами площадки 1 блока необходимо производить с учётом структурно-тектонического строения всего полуострова в пределах т.н. Бушерской антиклинали. В последствии, эти скважины могут быть использованы для исследования методами радонометрии структурно-тектонического строения полуострова с целью выявления возможных активных разломных зон, как в ядре, так и на крыльях антиклинали, в частности, предполагаемого т.н. сегментированного разлома Харг-Миш, на существовании которого, не смотря на проведённые доисследования, настаивает иранская сторона.

Также, учитывая, что площадка АЭС находится в относительной близости от наиболее сейсмически активных разломных зон земной коры в этом районе провинции Бушер, в частности, Делвар-Ахрамского субширотного разлома, на этой территории впоследствии необходимо размещение дополнительного пункта сейсмического радонового мониторинга. Как нельзя лучше для указанных целей подходят термальные источники, особенно находящиеся непосредственно в зонах выявленных разломов. Из

существующих вблизи АЭС термальных источников, отвечающих этим критериям, наиболее подходящим для размещения такого пункта является термальная водолечебница на окраине г. Архам. В 66 м от здания водолечебницы расположена действующая артезианская скважина, которая благодаря установленному в ней погружному насосу большой мощности непрерывно подает термальную воду в бассейны водолечебницы. Данная скважина, находящаяся к тому же в каменном здании, при необходимом её дооснащении как нельзя лучше подходит для непрерывного определения содержания радона в подземных водах. Охраняемый участок водолечебницы также подходит и для размещения автоматической радоновой станции для регистрации почвенного радона.

По данным Н. Karimi и F. Moore (2008) вода термального источника в Ахраме является минерализованной хлоридно-сульфатной натриево-кальцевой со средней температурой 40.3 град С. Удельная электропроводимость (ЕС) воды составляет 11.4 мСм/см, общее солесодержание (TDS) 7.9 г/л, рН = 6.8, дебит источника 11.4 л/сек [13].

Ещё одним возможным участком является г. Боразджан и его окрестности, находящиеся в зоне Казерун-Боразджанского разлома, где также отмечены многочисленные выходы термальных вод. Однако там требуются дополнительные изыскания, в том числе и по выявлению неиспользуемых скважин, особенно самоизливающихся, как наиболее ценных для подобных исследований. Всего же в провинции Бушер насчитываются 9 термальных источников, из которых, помимо Ахрама также известен источник Далаки (Dālaki) в 70 км от Бушера, где также имеется скважина [14,15]. Сведений о проведении исследований с целью определения содержания радона в горячих источниках провинции Бушер, в отличие от ряда других провинций Ирана, не имеется. Однако известно, что содержание радона в горячих источниках Ирана, таких как Sirch, Bastak, Sareen, Jowshen, Mahallat, Geno и пр., колеблется достаточно в широких пределах, от 30 до 253 Бк/л и выше.

Следует отметить, что комплексный мониторинг радона с разнесённым дублированным размещением радоновых сейсмостанций на нескольких участках существенно повышает представительность получаемых данных. Кроме того, закономерный и предсказуемый выход регистрируемых значений объемной активности радона на фоновый уровень (определяемый с учётом временного фактора для конкретного участка) после т.н. «всплеска» (т.е. максимального уменьшения или увеличения – уточняется в ходе работ) будет свидетельствовать о том, что в результате сейсмического события (в т.ч. и техногенного характера) коэффициент эманирования горных пород не изменился, а значит, структура трещинно-порового пространства в районе (и прежде всего на участке размещения существующего и новых блоков АЭС «Бушер») не претерпела существенных изменений. Постоянная регистрация и сверка указанных зависимостей с хранящимися в постоянно пополняемой и обновляемой базе данных т.н. «эталоны» будет ещё одним дополнительным фактором обеспечения сейсмической безопасности площадки АЭС. Составление каталога местных сейсмических событий крайне необходимо, учитывая то обстоятельство, что сейсмические события в каждом конкретном районе имеют своё собственное, как правило, резко отличное от других мест, т.н. «лицо». А в районе расположения АЭС по данным сейсмометрических исследований прошлых лет оно имеет ещё и ярко выраженный секторальный характер, обусловленный, в частности, тем, что механизм возбуждения сейсмических событий в прилегающих наиболее сейсмогенерирующих районах провинции Бушер различен: в разломных зонах района г. Ахрам, где в 2017 году происходили сейсмические события с $M=3.7...4.7$, преобладает сжатие, а в районе г. Боразджан на фоне сейсмических событий с $M=2.5...3.4$ преобладают сдвиги. Различными предполагаются и т.н. «эталоны» фоновых сейсмических событий, в т.ч. и

радоновые. Не совсем пока окончательно ясен механизм возникновения сейсмических событий под дном Персидского залива у Бушерского полуострова, которые происходят практически постоянно с $M=2.5...4.8$. По этой же причине выведение каких-либо глобальных универсальных зависимостей затруднено или зачастую практически невозможно, что и подтверждается результатами наблюдений в различных районах земного шара, в первую голову - на сопредельных территориях [16,17]. Выведение же региональных зависимостей или уточнение существующих формул с учётом местных условий вполне возможно, но требует длительного времени для накопления фактического материала, для которых площадка АЭС «Бушер» подходит как нельзя лучше. А учитывая то обстоятельство, что российская сторона после пуска 1 блока АЭС в эксплуатацию и передачи его иранской стороне не намерена оставлять этот объект без надзора и технического сопровождения, вопрос осуществления на практике данных исследований, причём и совместных, вполне реализуем.

ПРИБОРЫ И ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ МОНИТОРИНГА РАДОНА

На первых этапах мониторинга, как указывалось выше, дискретное определение содержания радона в пробах воды, отобранных из отводящей линии дренажного колодца ПН-1 и из выбранных мониторинговых скважин на площадке 1 блока, предполагается производить в т.н. «ручном режиме». Это связано с тем, что как отечественная, так и зарубежная серийная полевая аппаратура для непрерывной регистрации радона в подземных водах (в скважинах), как и аппаратура для непрерывной регистрации радона в проточных (дренажных) водах в настоящее время практически отсутствует. Причина в том, что непосредственное непрерывное автоматизированное измерение содержания радона в проточных водах - достаточно сложная техническая задача, связанная с особенностью самого радиоактивного газа, его инертностью и низким периодом полураспада.

На начальных этапах мониторинга радона на площадке АЭС «Бушер-1» предлагается использовать серийное приборное оборудование российского производства, в частности, производства «НТМ-Защита». Естественно, что все используемые технические средства должны отвечать условиям применения на АЭС. Средства контроля должны быть сертифицированы и соответствовать требованиям соответствующих разделов ГОСТ 15150-69, НП-001-2015, НП-031-01, ГОСТ Р 50746-2013.

Как уже указывалось выше, в качестве первоочередного объекта для опробования предлагается практически непрерывно действующий с середины 70-х гг. дренажный колодец ПН-1 возле сооружения 1ZF. Выбор ПН-1 в качестве объекта опробования отнюдь не случаен, т.к. фрагментарно сохранившаяся с 70-х годов по периметру фундаментной плиты машзала 1ZF дренажная система KWU является своеобразным и уникальным полигоном, обеспечивающим постоянный площадной водоприток подземных вод, в т.ч. и с более глубоких горизонтов через т.н. «гидравлические окна» в глинистых отложениях ИГЭ-6 верхнемиоценового – нижнеплиоценового ($N_1^3-N_2^1$) возраста. Отложения ИГЭ-6 в свою очередь являются основанием фундаментных плит как машзала 1 блока, так и всего т.н. «ядерного острова» АЭС.

Ещё одним дополнительным объектом исследований мог бы послужить также действующий с середины 70-х гг. дренажный колодец ПН-2 у сооружения 2ZF, даже не смотря на значительно более низкий водоприток по сравнению с колодцем ПН-1. Не исключено, что последнее связано с заилинием самого колодца ПН-2 и его водосборной сети, но после их чистки ситуация может существенно улучшиться. Возможно включение в систему водопунктов для экспресс-отбора проб воды на радон после

технического освидетельствования и некоторых из сохранившихся геотехнических скважин серии ВН на площадке б. 2 блока KWU.

На длительную перспективу необходимо будет оборудовать выше перечисленные водопункты (дренажный колодец ПН-1 на площадке 1 блока АЭС, дренажный колодец ПН-2 на площадке б. 2 блока KWU, термальные самоизливающиеся скважины в г. Ахрам и, возможно, г. Боразджан) автоматизированными системами непрерывного определения содержания радона в воде. Необходимость проведения именно непрерывных автоматизированных наблюдений подчёркивается многими исследователями радона как сейсмоиндикатора. Есть и примеры успешного проведения подобных исследований в различных странах, в т. ч. в некоторых провинциях Исламской Республики Иран, носящих, однако, преимущественно локально-временной характер [18-23]. Причём ряд иранских специалистов также настаивает на опробовании с указанными целями, как наиболее пригодных, именно термальных источников (S. Mehdi Hashemi, Ali Negarestani, Mojtaba Namvaran и др.). Желательным для проведения подобных исследований является и относительно высокая концентрация радона в воде некоторых таких источников.

В качестве приборной базы на последующих этапах исследований предпочтительно использовать доработанные и адаптированные к климатическим условиям площадки автоматизированные системы для непрерывного (по возможности, не менее 2-4 замеров в 1 час) определения содержания радона в воде модели DURRIDGE RAD7 с дополнительным устройством RAD AQUA фирмы DURRIDGE Company, Inc. (США). Или же доработанную и адаптированную к условиям площадки приборную систему для непрерывного определения содержания радона в воде модели RIM 1688-2 немецкой фирмы SARAD GmbH, а также хорошо зарекомендовавший себя в РФ радон-монитор AlphaGUARD PQ2000 PRO с дополнительным устройством Alpha KIT. Для исключения систематических ошибок подобных устройств иранские специалисты рекомендуют на одной точке использовать одновременно по два комплекта оборудования различных производителей, особенно при проведении работ на термальных водопунктах [24].

Следует отметить, что указанные выше радон-мониторы в вариантах AlphaGUARD PQ2000-S и RIM 1688GEO для отбора и анализа почвенного радона в целях унификации оборудования на начальных этапах исследований могут рассматриваться как альтернатива автоматической радоновой станции CPC-05 («НТМ-Защита», Россия). Также ещё одним вариантом замены CPC-05 может служить оборудование фирмы ALGADE (Франция), учитывая наличие определённых конструктивных преимуществ радоновых станций этой фирмы, в частности, отсутствием у них механической воздуходувки. Указанное оборудование должно устойчиво работать в условиях весьма высоких температуры и влажности, присущих прибрежным районам Персидского Залива в летний период, в т.ч. и провинции Бушер. Учитывая климатические особенности региона наблюдений, возможен вариант питания автоматических радоновых станций и от солнечных батарей.

Размещение автоматизированного оборудования возможно в малогабаритном необитаемом боксе непосредственно у точки наблюдения.

В целях максимального приближения исследовательского оборудования и обслуживающего персонала к опробуемому водопункту (в пределах площадки АЭС), на начальных этапах работ его размещение возможно и в обитаемом автотранспортном модуле.

При выборочном экспресс-опробовании скважин за пределами площадки АЭС возможно размещение оборудования в самоходной передвижной лаборатории на колёсном шасси, также оснащённой, но в упрощённом составе, необходимым

оборудованием и системами жизнеобеспечения. Описание таких лабораторий, в т.ч. и их оснащения, приводится в документе МАГАТЭ [25].

ВЫВОДЫ

1. Целью предлагаемой системы мониторинга является выявление и изучение возможной взаимосвязи между степенью обогащения подземных вод радоном, зависящей, помимо прочих факторов, от степени раскрытости геологических структур, условий циркуляции подземных вод, в т.ч. термальных, гидродинамической зональности, и общими сейсмотектоническими условиями на участке расположения АЭС «Бушер-1» и прилегающей территории провинции Бушер.

2. Применение радонометрии в комплексе с традиционными геофизическими методами целесообразно при изучении сложной разломно-блоковой тектоники горных пород фундамента на предмет возможности её внезапной активизации, что особенно характерно для природных условий ближайшей к п-ву Бушер горной системы Загрос. Указанные исследования в дальнейшем могут стать составной частью мониторинга недр на площадке АЭС «Бушер-1» и прилегающей территории, в купе с проводимыми высокоточными геодезическими наблюдениями (в т.ч. и в рамках мониторинга СДЗК) и сейсмометрией. Необходимость в устройстве на площадке постоянно действующей сейсмостанции и проведении непрерывных сейсмических наблюдений в связи с планируемым расширением АЭС не подлежит сомнению, тем более что решение о строительстве 2 и 3 блоков на этой площадке уже принято и работы на площадке 2 и 3 блоков начаты. А на очереди, возможно, и блоки 4, 5, что только повышает требования к сейсмической безопасности всего объекта в целом.

3. Для качественного проведения мониторинга радона на площадке АЭС «Бушер-1» методика его проведения должна заключаться в тщательном и всеобъемлющем анализе результатов непрерывных замеров ОАР в почвенном воздухе и параллельно проводимых постоянных замеров содержания радона в пробах воды из различных водопунктов (дренажные колодцы, скважины) на площадке АЭС «Бушер», а в последствии и на прилегающей к п-ву Бушер территории предгорий горной системы Загрос (термальные скважины в г. Ахрам и Боразджан).

4. На начальных этапах проведения мониторинга радона обработка проб воды из скважин и дренажных колодцев может производиться в «ручном» режиме в лабораторных условиях непосредственно на площадке АЭС.

5. При выполнении мониторинга радона на площадке АЭС вначале предлагается использовать серийное оборудование российского производства.

6. На длительную перспективу будет необходимо оборудовать выбранные водопункты автоматизированными системами непрерывного определения содержания радона в подземных и проточных (дренажных) водах. Указанные системы должны определённым образом сопрягаться с КИП контроля землетрясений, а также с вновь созданной на площадке АЭС постоянной сейсмической станцией. Возможен вариант интегрирования объектов радонометрии в отдельные сегменты систем типа АСКРО и ЛВРК, причём как существующего, так и будущих блоков. В дальнейшем все эти системы могут быть объединены и в общую систему сейсмической защиты данной АЭС.

7. Предлагаемая комплексная система мониторинга радона в случае её реализации сможет обеспечить более полную сейсмозащиту и, как следствие, безаварийную эксплуатацию зданий и сооружений АЭС «Бушер-1». А также начатых постройкой дополнительных блоков АЭС, расположенных в сложных сейсмотектонических условиях ИРИ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Седин В.Л. и др.* Шкала оценки активности тектонических разломов земной коры по интенсивности радоновыделения из недр на площадках строящихся и действующих АЭС [Текст] / В.Л. Седин, В.Ю. Ульянов, Е.М. Бикус // Геориск. – 2015. – №4. – С. 48–52.
2. *Рудаков, В.П.* К вопросу о природе эманационных (радоновых) предвестников землетрясений [Текст] / В.П. Рудаков // Геохимия. – 2003. – №2.
3. *Горбушина, Л.В. и др.* Эманационный метод индикации геодинамических процессов при инженерно-геологических изысканиях [Текст] / Л.В. Горбушина, Ю.С. Рябоштан // Советская геология. – 1975. – №4. – С. 106–112.
4. *Делатказин, Т.Ш. и др.* Мониторинг поля радоновых эманаций в зоне техногенного воздействия [Текст] / Т.Ш. Делатказин, Ю.П. Коновалова, В.И. Ручкин // Проблемы нефтепользования. – 2016. – №4. – С. 97–103.
5. *Елохин, А.П.* Нетрадиционные методы радиационного контроля радиоактивного загрязнения окружающей среды [Текст] / А.П. Елохин // Ядерные измерительно-информационные технологии. – 2013. – №1(45). – С. 62–95.
6. Методические указания по ведению гидрогеодеформационного мониторинга для целей сейсмопрогноза (R-STEPS) [Текст] / Под ред. Г.С. Вартапяна. – М.: ЗАО «Геоинформмарк», 2000. – 77 с.
7. Оценка сейсмической опасности участков размещения ядерно- и радиационно опасных объектов на основании геодинамических данных [Текст]. РБ-019-01. – М., 2001.
8. СТО 95 102-2013. Ведение объектового мониторинга состояния недр на предприятиях госкорпорации «РОСАТОМ» [Текст]. – М.: СРО НП «СОЮЗАТОМГЕО», 2013.
9. СТО 95 103-2013 Руководство по методике комплексного инженерно-сейсмометрического и сейсмологического мониторинга состояния конструкций зданий и сооружений, включая площадки их размещения [Текст]. – М.: СРО НП «СОЮЗАТОМГЕО», 2013.
10. МР 2.6.1.27-2003. Зона наблюдения радиационного объекта. Организация и проведение радиационного контроля окружающей среды [Текст]. – М., 2003.
11. РД 52.18.595-96. Федеральный перечень методик выполнения измерений, допущенных к применению при выполнении работ в области мониторинга загрязнения окружающей природной среды [Текст]. Методика контроля содержания трития в природных водах МВИ 01–6/96. – М., 1998.
12. Рекомендации по приборному обеспечению дозиметрического и радиометрического контроля в соответствии с НРБ-99 и ОСПОРБ-99 [Текст]. – М., 2003.
13. Karimi H, Moore F. The source and heating mechanism for the Ahram, Mirahmad and Garu thermal springs, Zagros Mountains, Iran. *Geothermics* 37(2008), pp. 84–100.
14. Mirhosseini S.M., Moattar F., Negarestani A., Karbasi A.R. Environmental Hydrochemistry and Seasonal Variations in Radon Concentration in Geno Hot Spring, North of Hormozgan, Iran. *Environmental Biology*: Jan. 2014, Vol. 8, Issue 1, p. 56.
15. Javad Nouraliee, Soheil Porkhial, Amir Tamjidi. Study on Dālaki Geothermal Resource in Bushehr Province, in the North of Persian Gulf. *World Geothermal Congress*. Melbourne, Australia, 19-25 April 2015.
16. *Закиров, Т.З.* Особенности распределения концентрации радона в подземных водах некоторых сейсмоактивных зон Узбекистана (в связи с поисками предвестников землетрясений) [Текст] / Т.З. Закиров: автореф. дисс. ... канд. техн. наук. – Ташкент, 1984. – С. 18.
17. *Максудов, А.У.* Мониторинг сейсмических предвестников для прогноза землетрясений [Текст] / А.У. Максудов // Вычислительные нанотехнологии. – 2016. – №1. – 2016. – С. 52–61.
18. *Семинский, К.Ж. и др.* Радон в подземных водах Прибайкалья и Забайкалья: пространственно-временные вариации [Текст] / К.Ж. Семинский, А.К. Семинский // Геология и тектонофизика. – 2016. – Т. 7. – №3. – С. 477–493.
19. *Афонин, А.А. и др.* Измерение радона на гидротермальной системе [Текст] / А.А. Афонин, Ю.Д. Кузьмин, В.Ф. Воропаев, А.Ю. Максимов, А.А. Котляров // Комплексные сейсмологические и геофизические исследования Камчатки. – Петропавловск-Камчатский, 2004. – С. 171–177.
20. *Ишанкулиев Дж., и др.* Динамика уровня подземных вод, концентрации подпочвенного радона и молекулярного водорода в прикаспийском сейсмоактивном регионе [Текст] / Дж. Ишанкулиев, Г.Ч. Сарыева, К.П. Азимов, Н.К. Азимова // Сб. докл. межд. конф. «Актуальные проблемы современной сейсмологии», посвященной 50-летию Института сейсмологии им. Г.А.Мавлянова АН Респ. Узбекистан 12–14 октября 2016 г. – Ташкент, 2016.

- С. 234–241.
21. Ульянов, В.Ю. Организация и методика проведения мониторинга радона на площадках АЭС в асейсмичных регионах [Текст] / В.Ю. Ульянов // Проблемы недропользования. – 2015. – №1. – С. 103–107.
 22. Negarestani Ali, Hashemi Seyed Mehdi, Naseri Farzin, Namvaran Mojtaba, Musavi Nasab Seyed Mohammad, Montazeri Habiballan. Preliminary Investidation of the variation of radon concentration in the Jowshan hot spring in the SE of Iran as a precursor for the M 4.9 Shahdad and M 4.3 Sirch earthquakes om May, 2009 / Iranian Journal of Geophysics, 2012, Volume 6, pp. 30–39.
 23. Montazeri H., Abbasnejad A., Negarestani A. Continuous radon monitoring in the Jowshan hot spring as an earthquake precursor, SE Iran. Geochemical Journal, Vol. 45, 2011, pp. 463–472.
 24. Negarestani A., Namvaran M., Shahpasandzadeh M., Fatemi S.J., Alavi S.A., Hashemi S.M., Mokhtari M. Design and investigation of a continuous radon monitoring network for earthquake precursory process in Great Tehran. Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, May 2014, Vol. 300, Issue 2, pp. 757–767.
 25. IAEA-TECDOC-1092/R. Руководство по мониторингу при ядерных и радиационных авариях [Текст]. – Вена: МАГАТЭ, 2002. – С. 322.

REFERENCES

- [1] Sedin V.L., Uluanov V., Bicus K.M. Shkala otsenki aktivnosti tektonicheskikh razlomov zemnoj kory po intensivnosti radonovydeleniya iz neдр na ploshhadkah stroyashhihsya i dejstvuyushhih AES [Scale assessment of active tectonic faults of the crust on the Intensity of radon exhalation from the depths to the construction site and the existing energy facilities]. Georisk, 2015, №4, pp. 48–52. (in Russian)
- [2] Rudakov V.P. K voprosu o prirode ehmanacionnykh (radonovykh) predvestnikov zemletrjasenijj [The nature of emanation (radon) earthquake precursors]. Geochemistry, 2003, №2, pp. 222–224. (in Russian)
- [3] Gorbushina L.V., Ryaboshtan Y.S. Ehmanacionnyj metod indikacii geodinamicheskikh processov pri inzhenerno-geologicheskikh izyskaniyakh [Emanation method indication of geodynamic processes in geotechnical investigations]. Soviet Geology, 1975, №4, pp. 106–112. (in Russian)
- [4] Dalatkazin Timur Sh., Konovalova Yulia P., Ruchkin Vladimir I. Monitoring polja radonovykh ehmanacijj v zone tekhnogenogo vozdejstvija [Monitoring radon emanations field in the zone of technogenous impact]. Subsoil use problems, 2016, №4, pp. 97-103. (in Russian)
- [5] Elokhin A.P. Netradicionnye metody radiacionnogo kontrolja radioaktivnogo zagryaznenija okruzhajushhejj sredy [Unconventional methods for radiation monitoring of radioactive contamination of environment]. Nuclear measurement and information technology, 2013, №1(45), pp. 62–95. (in Russian)
- [6] Metodicheskie ukazaniya po vedeniju gidrogeodeformacionnogo monitoringa dlja celejj sejjsmoprogoza (R-STEPS) [Methodical instructions for conducting hydro-deformation monitoring for seismic forecasting purposes (R-STEPS)]. Ed. by G.S. Vartanyan. M. Pub. ZAO Geoinformmark, 2000, p. 77. (in Russian)
- [7] Ocenka sejjsmicheskoyj opasnosti uchastkov razmeshhenija jaderno- i radiacionno opasnykh objektov na osnovanii geodinamicheskikh dannyx [Estimation of seismic hazard of sites of location of nuclear and radiation hazardous objects on the basis of geodynamic data. RB-019-01]. M., 2001. (in Russian)
- [8] СТО 95 102-2013. Vedenie ob"ektovogo monitoringa sostojaniya neдр na predpriyatijakh goskorporacii «ROSATOM» [STO 95 102-2013. Conducting object monitoring of the state of the subsoil at the enterprises of the state corporation ROSATOM]. M. Pub. SRO NP SOYUZATOMGEO, 2013. (in Russian)
- [9] STO 95 103–2013 Rukovodstvo po metodike kompleksnogo inzhenerno-sejjsmometriceskogo i sejjsmologicheskogo monitoringa sostojaniya konstrukcijj zdaniij i sooruzhenijj, vkljuchaja ploshhadki ikh razmeshhenija [STO 95 103-2013. Guidance on the method of complex engineering seismic and seismological monitoring of the state of structures of buildings and structures, including the sites of their deployment]. M. Pub. SRO NP SOYUZATOMGEO, 2013. (in Russian)
- [10] MR 2.6.1.27-2003. Zona nabljudeniya radiacionnogo ob"ekta. Organizacija i provedenie radiacionnogo kontrolja okruzhajushhejj sredy [MR 2.6.1.27-2003. Observation zone of the radiation object. Organization and conduct of radiation monitoring of the environment]. (in Russian)
- [11] RD 52.18.595-96. Federal'nyj perechen' metodik vypolnenija izmerenijj, dopushhennykh k primeneniju pri vypolnenii rabot v oblasti monitoringa zagryaznenija okruzhajushhejj prirodnoj

- sredy [Tekst]. Metodika kontrolja sodержaniya tritija v prirodnykh voda MVI 01—6/96 [RD 52.18.595-96. The federal list of measurement techniques approved for use in the field of monitoring of environmental pollution. Methods for controlling the content of tritium in natural water MVI 01-6/96]. M., 1998. (in Russian)
- [12] Rekomendacii po pribornomu obespecheniju dozimetricheskogo i radiometricheskogo kontrolja v sootvetstvii s NRB-99 i OSPORB-99 [Recommendations on the instrumentation of dosimetric and radiometric control in accordance with NRB-99 and OSPORB-99]. M., 2003. (in Russian)
- [13] Karimi H., Moore F. The source and heating mechanism for the Ahram, Mirahmad and Garu thermal springs, Zagros Mountains, Iran. *Geothermics* 37(2008), pp. 84–100. (in English)
- [14] Mirhosseini S.M., Moattar F., Negarestani A., Karbasi A.R. Environmental Hydrochemistry and Seasonal Variations in Radon Concentration in Geno Hot Spring, North of Hormozgan, Iran. *Environmental Biology*: Jan. 2014, Vol. 8, Issue 1, p. 56. (in English)
- [15] Javad Nouraliee, Soheil Porkhial, Amir Tamjidi. Study on Dālaki Geothermal Resource in Bushehr Province, in the North of Persian Gulf. *World Geothermal Congress*. Melbourne, Australia, 19–25 April 2015. (in English)
- [16] Zakirov T.Z. Osobennosti raspredelenija koncentracii radona v podzemnykh vodakh nekotorykh sejsmoaktivnykh zon Uzbekistana (v svjazi s poiskami predvestnikov zemletrjasenij) [Features of distribution of radon concentration in groundwater of some seismically active zones of Uzbekistan (in connection with searches of precursors of earthquakes)]. Tashkent, 1984, p. 18. (in Russian)
- [17] Makh sudov A.U. Monitoring sejsmicheskikh predvestnikov dlja prognoza zemletrjasenij [Monitoring of seismic harbingers for the forecast of earthquakes]. *Vychislitelnye nanotekhnologii* [Jour. Comp. nanotechnol], 2016, Issue 1, pp. 52–61. (in Russian)
- [18] Seminsky K.Zh., Seminsky A.K. Radon v podzemnykh vodakh Pribajkal'ja i Zabajkal'ja: prostranstvenno-vremennye variacii [Radon in groundwaters in the Baikal region and Transbaikalia: variations in space and time]. *Geodynamics & Tectonophysics*, 2016, Vol. 7, №3, pp. 477–493. (in Russian)
- [19] Afonin A.A., Kuzmin Y.D., Voropaev V.F., Maksimov A.A., Kotlyarov A.A. Izmerenie radona na gidrotermal'noj sisteme [The measuring of radon by hydrothermal systems]. *Kompleksnye sejsmologicheskie i geofizicheskie issledovanija Kamchatki* [Compilation "Complex seismological and geophysical research of Kamchatka"]. Petropavlovsk-Kamchatsky, 2004, pp. 171–177. (in Russian)
- [20] Ishankuliev J., Saryeva G.Ch., Azimov K.P., Azimova N.K. Dinamika urovnja podzemnykh vod, koncentracii podpochvennogo radona i molekularnogo vodoroda v prikaspijskom sejsmoaktivnom regione [Dynamics of groundwater level, concentration of subsoil radon and molecular hydrogen in the Caspian seismically active region]. *Sb. dokl. mezhd. konf. «Aktual'nye problemy sovremennoj sejsmologii»*, posvjashhennoj 50-letiju Instituta sejsmologii im. G.A.Mavlyanova AN Resp. Uzbekistan 12–14 oktjabrja 2016 g. [Collection of Reports the International Conference "Actual Problems in Modern Seismology" devoted to the 50th anniversary of G.A. Mavlyanov Institute of Seismology of Academy of Sciences of Republic Uzbekistan 12-14 oct. 2016]. Tashkent, 2016, pp. 234–241. (in Russian)
- [21] Ulyanov V.Yu. Organizacija i metodika provedenija monitoringa radona na ploshhadkakh AEhS v asejsmichnykh regionakh [Organization and methodology of radon monitoring at NPP sites with aseismic regions]. *Problemy nedropol'zovanija* [Problems of subsoil use], 2015, №1, pp. 103–107. (in Russian)
- [22] Negarestani Ali, Hashemi Seyed Mehdi, Naseri Farzin, Namvaran Mojtaba, Musavi Nasab Seyed Mohammad, Montazeri Habiballan. Preliminary Investidation of the variation of radon concentration in the Jowshan hot spring in the SE of Iran as a precursor for the M 4.9 Shahdad and M 4.3 Sirch earthquakes om May, 2009. *Iranian Journal of Geophysics*, 2012, Volume 6, pp. 30–39. (in English)
- [23] Montazeri H., Abbasnejad A., Negarestani A. Continuous radon monitoring in the Jowshan hot spring as an earthquake precursor, SE Iran. *Geochemical Journal*, Vol. 45, 2011, pp. 463–472. (in English)
- [24] Negarestani A., Namvaran M., Shahpasandzadeh M., Fatemi S.J., Alavi S.A., Hashemi S.M., Mokhtari M. Design and investigation of a continuous radon monitoring network for earthquake precursory process in Great Tehran. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, May 2014, Vol. 300, Issue 2, pp. 757–767. (in English)
- [25] IAEA-TECDOC-1092/R. Rukovodstvo po monitoringu pri jadernykh i radiacionnykh avarijakh [IAEA-TECDOC-1092/R. Guidelines for monitoring nuclear and radiation accidents]. Vienna: MAGATE [IAEA], 2002, p. 322. (in Russian)

Radon Monitoring as an Indicator of Seismotectonic Events at the Bushehr-1 NPP site and Bushehr Province Adjoining Territory of the Islamic Republic of Iran

V.Y. Ulyanov

*Dnieper State Academy of Construction and Architecture,
Chernyshevsky St., 24a, Dnepropetrovsk, Ukraine, 49600
e-mail: vulanov@mail.ru
ORCID ID: 0000-0002-9028-3408*

Abstract - The work provides justification for the application on the site of the Bushehr-1 NPP in the Islamic Republic of Iran, an innovative for these conditions warning system on seismic hazard. The proposed warning system is based on the integrated monitoring of radon in order to improve safety in the operation of NPP facilities and equipment. Regulations on the application of this system in the context of subsoil monitoring at Bushehr-1 NPP should be fixed in job descriptions. This system can be used as part of seismic monitoring of other sites of nuclear power plants located in zones with increased seismicity.

Keywords: Islamic Republic of Iran, Bushehr-1 NPP, integrated radon monitoring, radon seismic station, radon monitor.