

Литература

1. Подрезов Ю.В., Шахраманьян М.А. Методологические основы прогнозирования динамики чрезвычайных лесопожарных ситуаций. Монография. Издание первое. - М.: ВНИИ ГОЧС. - 2001.
2. Подрезов Ю.В., Шахраманьян М.А. Методологические основы прогнозирования последствий чрезвычайных лесопожарных ситуаций. Монография. Издание первое. - М.: ВНИИ ГОЧС. - 2001.
3. <http://www.meteorf.ru/about/structure/niu/354>.
4. Соловьев В.И. Анализ данных в экономике. - М.: «Кнорус», 2019.

Сведения об авторах

Борисова Людмила Робертовна, доцент департамента анализа данных, принятия решений и финансовых технологий Финансового университета при Правительстве РФ; доцент кафедры «Высоких технологий в обеспечении безопасности жизнедеятельности» МФТИ (ГУ). Тел. 8-916-245-71-27 E-mail: borisovalr@mail.ru.

Подрезов Юрий Викторович, доцент, главный научный сотрудник научно-исследовательского центра ФГБУ ВНИИ ГЧС (ФЦ); заместитель заведующего кафедрой Московского физико-технического института (государственного университета). Тел.: 8-903-573-44-84; e-mail: uvp4@mail.ru;

Анисимов Артем Константинович, ведущий аналитик ООО «Интернет-решения». Тел.: 8-915-040-35-99; e-mail: a-anisimov@phystech.edu.

УДК 621.039.58

ОЦЕНКА РАДИАЦИОННОЙ АВАРИИ НА АПЛ В БУХТЕ ЧАЖМА ПО МЕЖДУНАРОДНОЙ ШКАЛЕ ЯДЕРНЫХ И РАДИОЛОГИЧЕСКИХ СОБЫТИЙ (ИНЕС)

**Кандидат физ.-мат. наук Д.А. Припачкин, А.В. Шикин,
доктор техн. наук В.Л. Высоцкий, С.Н. Красноперов, С.В. Дьяков
Институт проблем безопасного развития атомной энергетики
Российской академии наук (ИБРАЭ РАН)**

Проведен анализ исходных данных, и выполнена оценка события «авария на АПЛ К-431 в бухте Чажма» по шкале ИНЕС в соответствии с методологией оценки событий по шкале ИНЕС.

Классификация события была выполнена по трем критериям: «Воздействие на человека и окружающую среду»; «Воздействие на радиологические барьеры, средства и системы управления установки»; «Воздействие на глубокошелонированную защиту установки». С учетом консервативного подхода общая оценка события «авария на АПЛ К-431 в бухте Чажма» с учетом всех критериев оценена на уровне 5 шкалы ИНЕС (Авария с широкими последствиями).

Ключевые слова: ядерная авария, Чажма, атомная подводная лодка, шкала ИНЕС, оценка, последствия для населения и территорий.

ASSESSMENT OF THE RADIATION ACCIDENT ABOARD A NUCLEAR SUBMARINE IN CHAZHMA BAY USING THE INTERNATIONAL NUCLEAR AND RADIOLOGICAL EVENT SCALE (INES)

Ph.D. (Phys.-Mat.) *D.A. Pripachkin*, A.V. *Shikin*, Dr. (Tech.) *V.L. Vysotsky*,
S.N. Krasnoperov, *S.V. Dyakov*

Nuclear Safety Institute of the Russian Academy of Sciences (IBRAE RAN)

Analysis of initial data and assessment of the event “Accident aboard the K-431 nuclear submarine in Chazhma Bay” were performed using the INES-based methodology.

The event was rated according to three criteria: “Impact on people and the environment”, “Impact on radiological barriers and control” and “Impact on defense in depth”. Within the conservative approach, the event “Accident aboard the K-431 nuclear submarine in Chazhma Bay”, taking into account all criteria, was rated at INES level 5 (“Accident with wider consequences”).

Keywords: nuclear accident, Chazhma, nuclear submarine, INES, assessment, consequences for population and territories.

Введение

Авария на АПЛ К-431 в бухте Чажма, которая произошла 10 августа 1985 г., широко не освещалась в СССР, а многие события с этим связанные были засекречены долгие годы. Первые публикации об этой аварии стали появляться только в 90-х годах прошлого века [1,2]. В последние годы появились новые возможности взглянуть на аварию на АПЛ К-431 в бухте Чажма в свете современных требований к ядерной и радиационной безопасности и новых вычислительных технологий, позволяющих провести более глубокий анализ данных, накопленных за все годы, прошедшие после аварии. В современных публикациях приводится подробное описание всех предшествующих аварии событий, протекания аварии, представлены оценки загрязнения объектов окружающей среды, дозовых нагрузок на население и ликвидации последствий аварии [3].

Однако, консолидирующая общая оценка радиационной аварии на АПЛ в бухте Чажма по Международной шкале ядерных и радиологических событий (ИНЕС) до настоящего времени, в силу недостаточности информации, не была выполнена. В рамках настоящей статьи будет проведен анализ исходных данных и выполнена оценка события «авария на АПЛ К-431 в бухте Чажма» по шкале ИНЕС. Это необходимо сделать в том числе, чтобы окончательно зафиксировать масштабы данной радиационной аварии для населения, окружающей среды, проинформировать общественность и определить место аварии на АПЛ К-431 в бухте Чажма среди известных и оценённых на сегодняшний день аварий по шкале ИНЕС.

Шкала ИНЕС

На сегодняшний день в практике аварийного реагирования для информирования общественности о важности событий, связанных с источниками радиации, используется Международная шкала ядерных и радиологических событий (шкала ИНЕС). Шкала охватывает широкий спектр видов деятельности, включая промышленную радиографию, использование источников излучения в медицинских целях, эксплуатацию объектов использования атомной энергии, а также транспортирование радиоактивных материалов.

Первая версия шкалы ИНЕС была разработана в 1990 г. В дальнейшем шкала ИНЕС была расширена с учетом возросшей необходимости в передаче информации о всех видах событий, связанных с радиационными рисками. В настоящее время используется Руководство по использованию шкалы ИНЕС, изданное в 2008 году [4], все оценки аварии на АПЛ в бухте Чажма были выполнены на основе действующей версии Руководства по использованию шкалы ИНЕС.

Методология оценки события по шкале ИНЕС

В рамках шкалы ИНЕС события классифицируются по семи уровням: на уровнях 4-7 они называются «авариями», а на уровнях 1-3 – «инцидентами». События, не значимые с точки зрения безопасности, классифицируются как «Вне шкалы/Уровень 0».

Классификация события по шкале ИНЕС проводится по следующим трем критериям: «Воздействие на человека и окружающую среду»; «Воздействие на радиологические барьеры, средства и системы управления установки»; «Воздействие на глубокоэшелонированную защиту установки». Согласно процедуре ранжирования, каждое событие должно оцениваться с точки зрения всех трех областей воздействия, указанных выше.

Воздействие на человека и окружающую среду отражает фактическое радиологическое воздействие, оказываемое на персонал, население и окружающую среду. Оценка может основываться на дозах облучения людей или на количестве радиоактивного материала, содержащегося в выбросах. События должны также оцениваться с использованием критериев, относящихся к глубокоэшелонированной защите и в соответствующих случаях с использованием критериев, относящихся к радиологическим барьерам и контролю на установках, если использование этих критериев приводит к более высокой классификационной оценке по шкале ИНЕС.

В случае серьезного инцидента или аварии на ранних стадиях события иногда невозможно точно определить полученные дозы облучения или величину выброса. Однако можно сделать первоначальную оценку и, таким образом, представить предварительную классификационную оценку.

Если оценка строится по величине выброса, тогда для верхних четырех уровней шкалы (уровни 4–7) используют определение в терминах количества активности выброса. Для этого определяют величину выброса по радиологической эквивалентности в ТБк ^{131}I . Для остальных изотопов, которые могут находиться в выбросе, используется коэффициент пересчета (коэффициент-множитель), отражающий сравнительный уровень эффективной дозы. Коэффициент-множитель для любого радионуклида можно рассчитать по методике, изложенной в разделе Дополнение I, Руководства по использованию шкалы ИНЕС [4], с использованием данных о дозовых коэффициентах [5,6]. Активность каждого радионуклида в выбросе суммируется с учётом радиологической эквивалентности. Таким образом, сумма активностей определяет общую активность всего выброса, которая определяет уровень события в соответствии со шкалой ИНЕС (менее 500 – уровень 4, от 500 до 5000 – уровень 5, от 5000 до 50000 – уровень 6, и более 50000 ТБк – уровень 7).

Если оценка основывается на дозе облучения (уровни 1-6), необходимо установить на основе имеющейся на момент оценки информации фактический уровень облучения персонала и населения во время аварии, количество облученных человек и сравнить его с критериями для уровней облучения по шкале ИНЕС, изложенными в разделе 2.3 Руководства по использованию шкалы ИНЕС [4]. Минимальная классификационная оценка, согласно определению, дается, если одно лицо подвергается облучению свыше критериев по дозе, и более высокая классификационная оценка присваивается, если большее количество лиц подвергается облучению свыше данных критериев.

Воздействие на радиологические барьеры и систему управления применимо только к событиям (уровни 2-5) на установках, имеющих официальное разрешение, граница площадки которых четко определена при лицензировании. Они применяются только для крупных объектов, на которых потенциально (пусть даже с малой долей вероятности) может произойти выброс радиоактивных материалов, который будет оценен уровнем 5 и выше [4].

Воздействие на глубокоэшелонированную защиту установки рассматривается в качестве критерия для событий (уровни 1-3), когда «фактические последствия» отсутствуют, однако происходит отказ некоторых средств обеспечения безопасности. Глубокоэшелонированная защита представляет собой совокупность консервативного проектирования, обеспечения качества, контроля, мер по смягчению последствий события и общей культуры безопасности, укрепляющей все другие средства. Безопасность населения и персонала во время использования источников излучения обеспечивается правильным проектированием, хорошо управляемой эксплуатацией, административными мерами контроля и комплексом систем защиты (например, блокировками, сигнализацией и физическими барьерами). При проектировании средств обеспечения безопасности применяется концепция глубокоэшелонированной защиты, допускающая возможность отказа оборудования, ошибок человека и незапланированного развития событий [4].

Оценка аварии на АПЛ К-431 в бухте Чажма

Проведем процедуру оценки события «Авария на АПЛ К-431 в бухте Чажма» в соответствии с методологией оценки событий по шкале ИНЕС.

Для оценки по критерию «Воздействие на человека и окружающую среду» будем использовать два подхода: по величине выброса и дозы. Для оценки по величине выброса будем использовать результаты оценки радионуклидного состава выброса, основанные на расчетных исследованиях и результатах мониторинга загрязнения окружающей среды, приведенных в [3] и [7]. В табл. 1 приведен исходный радионуклидный состав выброса, активность (погрешность 40-50 %), коэффициенты-множители, рассчитанные на основе методики [4] и активность, пересчитанная с учетом радиологической эквивалентности.

Величина суммарного радиологически эквивалентного выброса в результате аварии составляет ~ 660 ТБк по ^{131}I , что соответствует уровню 5 по шкале ИНЕС. Основной вклад в суммарную активность вносят: продукты коррозии ^{60}Co (98,7 %), ^{54}Mn (1,03 %), ^{55}Fe (0,1 %); ^{63}Ni (0,04 %); продукты деления $^{131,132,133,134,135}\text{I}$ (0,08%); ядерное топливо $^{235,238}\text{U}$ (0,03%) и прочие - около 0,02%.

Для оценки по величине доз, полученных лицами из числа персонала и населения в результате данного события, будем использовать данные по человеческим потерям и ущербу, нанесённому здоровью людей и окружающей среде [3].

Достоверно установлено, что двое человек из числа персонала скончались через несколько лет от детерминированных эффектов. Данный факт, согласно Руководству по использованию шкалы ИНЕС [4], соответствует уровню облучения «Возникновение летальных детерминированных эффектов в результате облучения всего тела...», что оценивается как уровень 4 по шкале ИНЕС. Однако с учетом того, что таких лиц было как минимум двое [3], уровень оценки такого события может быть увеличен до 5 по шкале ИНЕС. Структура доз, полученных участниками ликвидации последствий аварии [3], позволяет предположить возникновение или вероятное возникновение нелетальных детерминированных эффектов у нескольких десятков и более человек, что также позволяет классифицировать событие уровнем 5.

Исходные данные для оценки по величине выброса

Радионуклид	Активность*, Бк	Коэффициент- множитель	Активность с учетом радиологической эквивалентности, ТБк
³ H	9,8E+06	0,02	<0,001
¹⁴ C	1,1E+10	0,05	0,001
⁶⁰ Co**	1,3E+13	50	650
⁵⁴ Mn	1,7E+12	4	6,8
⁵⁵ Fe	6,1E+12	0,12	0,7
⁵⁹ Ni	2,6E+11	0,03	0,007
⁶³ Ni	2,1E+12	0,11	0,231
⁹³ Mo	1,2E+08	0,25	<0,001
⁸⁹ Sr	3,4E+09	0,86	0,003
⁹⁰ Sr**	6,0E+07	20	0,001
⁹⁵ Zr	3,7E+09	4	0,015
⁹⁹ Tc	1,3E+07	0,86	<0,001
¹⁰³ Ru	2,7E+09	1,1	0,003
¹⁰⁶ Ru	4,6E+07	6	<0,001
¹³² Te	6,4E+10	0,3	0,019
¹³⁴ Cs	6,7E+03	3	<0,001
¹³⁶ Cs	1,0E+08	1,3	<0,001
¹³⁷ Cs**	3,0E+08	40	0,012
¹²⁹ I	4,6E+01	22	<0,001
¹³¹ I**	4,0E+10	1	0,040
¹³² I**	6,0E+10	0,02	0,001
¹³³ I**	6,0E+11	0,19	0,114
¹³⁴ I**	1,7E+13	0,01	0,170
¹³⁵ I**	3,6E+12	0,06	0,216
¹⁴⁰ Ba	1,2E+10	1,47	0,018
¹⁴⁰ La	1,3E+10	0,34	0,004
¹⁴⁴ Ce	7,7E+08	6,27	0,005
²³⁷ Np	1,8E+00	5108	<0,001
²³⁹ Np	8,9E+09	0,14	0,001
²³⁵ U**	1,3E+08	1000	0,130
²³⁸ U**	7,4E+07	900	0,067
²³⁸ Pu	5,3E-10	7960	<0,001
²³⁹ Pu	4,3E+04	10000	<0,001
²⁴⁰ Pu	3,6E-07	9650	<0,001
²⁴¹ Pu	4,6E-16	194	<0,001
Инертные радиоактивные газы (Xe, Kr, Ar и др.)	0	0***	0,0

Примечания

*- исходные данные из [7], увеличенные с учетом числа делений при СЦР равным $5 \cdot 10^{19}$, что согласуется с международными оценками [8,9,10];

** - новые данные по активности, полученные авторами;

*** - для ИРГ коэффициент-множитель равен 0, т.к. оценка радиологической эквивалентности других нуклидов к ¹³¹I строится на отношении дозовых коэффициентов для внешнего облучения от поверхности и внутреннего облучения при ингаляции. Если дозовый коэффициент радионуклида больше чем у ¹³¹I, то и коэффициент-множитель больше во столько же раз, и наоборот. Для любых ИРГ дозовые коэффициенты для внешнего облучения от поверхности и внутреннего облучения при ингаляции равны нулю [5], [6].

Структура доз, полученных населением в населенных пунктах, расположенных на побережье Уссурийского залива, территории Приморья и Китая, позволяет предположить, что годовые дозы облучения населения не превысили 0,02 мЗв, что свидетельствует о не превышении годового предела дозы для населения в 1 мЗв. Следовательно, по дозам для населения оценка события находится на уровне 0 шкалы ИНЕС, что является не существенным для безопасности.

Таким образом, с учетом консервативности оценки по шкале ИНЕС по критерию «Воздействие на человека и окружающую среду» на основе двух подходов к оценке по величине выброса и дозы событие «Авария на АПЛ К-431 в бухте Чажма» классифицируется уровнем 5 шкалы ИНЕС.

Для оценки по критерию «Воздействие на радиологические барьеры и систему управления» будем использовать данные по описанию протекания аварии и формированию аварийного выброса [3,7]. Данная область воздействия применима к событиям, в результате которых происходит существенное повреждение основных барьеров, предотвращающих крупный выброс. В событии «Авария на АПЛ К-431 в бухте Чажма» все барьеры безопасности были разрушены [3]. Поэтому по критерию «Воздействие на радиологические барьеры и систему управления», рассмотренное событие классифицируется максимальным уровнем для данного критерия - уровнем 5 шкалы ИНЕС.

Для оценки по критерию «Воздействие на глубокоэшелонированную защиту установки» будем использовать данные по описанию состояния аварийной установки (ядерного реактора на АПЛ и всей АПЛ в целом) [3]. Очевидно, что в результате события «Авария на АПЛ К-431 в бухте Чажма» наступили «фактические последствия», выраженные в: разрушении барьеров безопасности установки; выбросе радиоактивных веществ в атмосферу; детерминированных летальных и нелетальных эффектах у персонала [3]. Поэтому событие «Авария на АПЛ К-431 в бухте Чажма» по критерию «Воздействие на глубокоэшелонированную защиту установки» находится вне шкалы ИНЕС по этому критерию.

Заключение

Анализ исходных данных, накопленных за почти 35 лет с момента аварии, по протеканию и последствиям радиационной аварии на АПЛ К-431 позволил выполнить комплексную оценку события «авария на АПЛ К-431 в бухте Чажма» по шкале ИНЕС.

Классификация события была выполнена по трем критериям: «Воздействие на человека и окружающую среду»; «Воздействие на радиологические барьеры, средства и системы управления установки»; «Воздействие на глубокоэшелонированную защиту установки». С учетом консервативного подхода общая оценка события «авария на АПЛ К-431 в бухте Чажма» с учетом всех критериев соответствует уровню 5 шкалы ИНЕС (Авария с широкими последствиями).

Однако необходимо отметить, что если оценивать реальные последствия для населения, без учета состояние ядерного реактора на АПЛ и дозовых нагрузок для персонала, то оценка события находится на уровне 0 шкалы ИНЕС, что является не существенным для безопасности, что совпадает с оценками японских исследователей для дальней зоны (более 100 км от источника выброса) [8].

Оценка аварии на АПЛ К-431 в бухте Чажма (1985) по шкале ИНЕС на уровне 5 ставит эту аварию в один ряд с авариями на АЭС Три-Майл-Айленд, США (1979) и Уиндскейле, Великобритания (1957), которые характеризовались большими выбросами радиоактивных веществ атмосфере, выходом из строя реакторных установок, последствиями для персонала и минимальными или отсутствием последствий для населения.

В настоящее время в МАГАТЭ происходит формирование новой редакции шкалы ИНЕС, в связи с этим авторы статьи выражают надежду на то, что представленный материал будет полезен как разработчикам, так и пользователям шкалы ИНЕС во всем мире.

Литература

1. Арутюнян Р.В., Данилян В.А., Высоцкий В.Л. и др. Анализ и оценка радиозоологических последствий ядерной аварии в бухте Чажма. М.: Препринт № ИВРАЭ-98-09, 1998.
2. Сивинцев Ю.В., Высоцкий В.Л., Данилян В.А. Радиозоологические последствия радиационной аварии на атомной подводной лодке в бухте Чажма // Атомная энергия. - 1994. Т. 76(2). С. 158–160.
3. Саркисов А.А., Высоцкий В.Л. Ядерная авария на атомной подводной лодке в бухте Чажма - Вестник РАН. - 2018, т. 88, № 7, с. 599–618
4. Международное агентство по атомной энергии, Международная шкала ядерных событий (ИНЕС), Руководство для пользователей. Издание 2008 года, МАГАТЭ, Вена (2008).
5. Международные основные нормы безопасности для защиты от ионизирующих излучений и безопасного обращения с источниками излучения, Серия изданий по безопасности, № 115, МАГАТЭ, Вена, (1997).
6. Международное агентство по атомной энергии, Общие инструкции оценки и реагирования на радиологические аварийные ситуации, IAEA-TECDOC-1162/R, МАГАТЭ, Вена (2004).
7. Сивинцев Ю.В., Вакуловский С.М., Высоцкий В.Л. и др. Техногенные радионуклиды в морях, омывающих Россию. Радиозоологические последствия удаления радиоактивных отходов в арктические и дальневосточные моря («Белая книга-2000»). М. ИздАТ. - 2005-624 с.
8. Takano M. et al. Reactivity Accident of Nuclear Submarine near Vladivostok - J. of Nucl. Science and Technology. - 2001. V. 38. № 2. p. 143–157.
9. Compton K.L., Novikov V.N., Parker F.L., Sivintsev Yu.V. The Radioactive Legacy of the Russian Pacific Fleet Operations and Its Potential Impact on Neighboring Countries. Austria, Laxenburg: International Institute for Applied Systems Analysis, Final Review Draft. - 2002.
10. NATO/CCMS Pilot Study: Cross-Border Environmental Problems Emanating from Defence-Related Installations and Activities, Phase 11: 1995–1998, Final Report, v. 4, Environmental Risk Assessment for Two Defence-Related Problems, Report No. 227, NATO. - 1998.

Сведения об авторах

Припачкин Дмитрий Александрович - научный сотрудник ИБРАЭ РАН, тел. (495) 955-23-50, e-mail: prad@ibrae.ac.ru.

Шикин Александр Васильевич - старший научный сотрудник ИБРАЭ РАН, 115191, г. Москва, тел. (495) 955-23-63, e-mail: shi@ibrae.ac.ru.

Высоцкий Валентин Леонидович - заведующий лабораторией ИБРАЭ РАН, тел. (495) 955-22-61, e-mail: vvl@ibrae.ac.ru.

Красноперов Сергей Николаевич - научный сотрудник ИБРАЭ РАН, тел. (495) 955-23-38, e-mail: rnk@ibrae.ac.ru.

Дьяков Сергей Вячеславович - заместитель заведующего отделом ИБРАЭ РАН, тел. (495) 276-20-00, доб. 412, e-mail: dsv@ibrae.ac.ru.