

В. М. Шестопапов, Ю. А. Шибецкий,
А. Н. Макаренко

Научно-инженерный центр радиогидрогеоэкологических
полигонных исследований НАН Украины, г. Киев, Украина

Импактные события и безопасность поверхностных ядерных объектов

Приведены оценки вероятности разрушения поверхностных ядерно- и радиационно-опасных объектов вследствие возможного соударения Земли с астероидом или кометой. Показано, что такие объекты являются более уязвимыми, чем это традиционно считается. Сделан вывод о необходимости дополнительного обоснования исключения импактных событий из перечня исходных событий при обосновании безопасности поверхностных ядерных объектов.

Ключевые слова: импактные события, ядерные объекты, безопасность.

В. М. Шестопапов, Ю. О. Шибецкий, О. М. Макаренко

Импактні події і безпека поверхневих ядерних об'єктів

Наведено оцінки ймовірності руйнування поверхневих ядерно- і радіаційно-небезпечних об'єктів внаслідок можливого зіткнення Землі з астероїдом чи кометою. Показано, що зазначені об'єкти є більш вразливими, ніж це традиційно вважається. Зроблено висновки про доцільність додаткового обґрунтування вилучення імпактних подій з переліку вихідних подій в обґрунтуванні безпеки поверхневих ядерних об'єктів.

Ключові слова: імпактні події, ядерні об'єкти, безпека.

© В. М. Шестопапов, Ю. А. Шибецкий, А. Н. Макаренко, 2015

В последние 30 лет угроза для земной цивилизации, связанная с катастрофическими последствиями столкновения Земли с крупным астероидом или кометой, стала предметом беспокойства научных и правительственных организаций. Значимость импактных событий для эволюции жизни на Земле была продемонстрирована Л. Альваресом и его коллегами [1]. Они показали, что причиной массового вымирания пресмыкающихся и последующего бурного развития млекопитающих на рубеже мезозоя и кайнозоя, иными словами — глобальной общепланетарной катастрофы, стало падение астероида диаметром около 10 км. Приблизительно в то же время (1980 год) Национальное аэрокосмическое агентство США начало пропагандировать необходимость изучения астероидной угрозы для земной цивилизации [2].

Вероятности, масштабы экологических и социальных последствий столкновения с Землей космических тел, технологии изменения их орбит и возможности уменьшения последствий столкновений неоднократно обсуждались на международных конференциях и обобщены в ряде докладов [2–5].

Примечательно, что при анализе последствий столкновения космического тела с Землей (далее — импактного события или импакта) принималось во внимание лишь его прямое воздействие (разрушения в зоне кратера, пожары, атмосферные эффекты, цунами, сейсмический толчок) и не учитывались последствия техногенных катастроф, которые могут быть инициированы воздействием импакта (разрушение дамб крупных водохранилищ, химических заводов, ядерных объектов).

Задачи исследования. Целью настоящей работы является оценка вероятности и анализ потенциального влияния столкновения космического тела с Землей на безопасность поверхностных ядерных и радиационно-опасных объектов.

В настоящее время влияние импактных событий на безопасность АЭС, предприятий по обогащению урана, промежуточных хранилищ отработанного ядерного топлива (ОЯТ), заводов по переработке ядерного топлива, исследовательских реакторов, поверхностных хранилищ для захоронения РАО исключается из рассмотрения [6–8]: считается, что вероятность импактного события, которое может привести к тяжелой аварии, пренебрежимо низкая. Согласно нормам радиационной безопасности Украины [9], игнорируются критические события, вероятность которых не превышает $5 \cdot 10^{-7}$ год⁻¹. В соответствии с международными рекомендациями [10], падение метеорита не рассматривается в качестве экстремального внешнего события, так как вероятность такого события ниже 10^{-7} год⁻¹.

Хотя импактные события и не включены в перечень возможных внешних воздействий при оценке пригодности площадок для размещения АЭС и хранилищ ОЯТ [6, 8], они могут инициировать целый комплекс как внешних (землетрясение, наводнение, экстремальные метеорологические явления), так и внутренних (ударная волна, летящие предметы) воздействий, которые обязательно учитываются при оценке последствий аварий.

Кроме этого, в соответствии с [8] при выборе площадки должны быть выявлены и проанализированы все исходные события, которые могут оказать влияние на безопасность хранилища для захоронения РАО, если частота их проявлений превышает 10^{-6} год⁻¹. Должны быть рассмотрены также и события с меньшей вероятностью, если они могут привести к превышению установленных нормами радиационной безопасности уровней приемлемого риска.

Таблица 1. Частота, энергия и степень угрозы импактных событий [14]

Диаметр ударника, м	Энергия события, Мт	Частота, год ⁻¹	Характеристика события: место и масштаб проявления эффектов, степень угрозы
> 1	1·10 ⁻⁴	40	Взрыв болида в верхней атмосфере. По яркости взрыв сопоставим с Солнцем. Опасности не представляет
> 10	1·10 ⁻¹	6·10 ⁻²	Ослепляющий взрыв в верхней атмосфере. На поверхности — разбитые окна
> 30	2	4·10 ⁻³	Разрушительный стратосферный взрыв. Ударная волна разрушает деревянные конструкции, ломает деревья. Возможны пожары на расстоянии 5 км от эпицентра. Возможны многочисленные жертвы, если событие произойдет над густозаселенной территорией
> 100	80	1·10 ⁻⁴	Маловысотный или поверхностный взрыв (в зависимости от плотности импактора), который по мощности превышает самый мощный испытанный термоядерный заряд. Формирование взрывного кратера диаметром 1—2 км. Возможны локальные разрушения (опустошение части страны)
> 300	2·10 ³	2·10 ⁻⁵	Формирование взрывного кратера диаметром 5—10 км. Опустошение территории небольшой страны или беспрецедентные цунами
> 1000	8·10 ⁴	2·10 ⁻⁶	Формирование взрывного кратера диаметром 10—20 км. Разрушения охватывают территорию континента или океанического побережья целого океана (пожары, ударная волна, землетрясения, цунами). Возникновение некоторых глобальных атмосферных эффектов
> 3000	1,5·10 ⁶	2·10 ⁻⁷	Формирование взрывного кратера диаметром 30—50 км. Разрушения охватывают всю поверхность Земли (огненный шторм, ударная волна, землетрясения, цунами). Глобальная многолетняя климатическая и экологическая катастрофа. Гибель цивилизации (возврат в доисторические времена)
> 10000	1·10 ⁸	1·10 ⁻⁸	Массовое вымирание видов (включая Homo sapiens)

Поэтому возникает несколько вопросов. Может ли импактное событие (и если да, то каким образом) оказать влияние на безопасность поверхностного ядерно- или радиационно-опасного объекта (далее — ЯО) с вероятностью, превышающей указанные выше значения? Насколько новые данные о вероятности импактных событий могут изменить наше представление о необходимости их учета при анализе безопасности поверхностных ядерных объектов?

Для ответа на эти вопросы далее анализируются и обобщаются данные о результатах изучения потенциально опасных космических объектов; о частоте импактных событий различной энергии; об опасных процессах, которые сопровождают импактные события; о масштабах угрозы и рисках смерти, которые ассоциируются с импактными событиями и разными факторами их воздействия.

Импактные события и индивидуальные риски. Объекты, сближающиеся с Землей (далее — ОСЗ), определяются как космические тела (астероиды и кометы), перигелий которых меньше 1,3 астрономической единицы (а.е.). Те ОСЗ, орбиты которых приближаются к Земной орбите на расстояние менее 0,05 а.е., отнесены к потенциально опасным объектам (далее — ПОО) [11]. Диаметры известных ПОО изменяются от 3 до 1200 м, а скорости движения относительно Земли — от 1 до 32 км·с⁻¹ [12]. Основное количество ПОО составляют углистые хондриты. Металлические астероиды считаются редкими (около 7 % общего количества), а количество комет среди ПОО оценивается 1 % [11]. Как правило, ПОО с диаметром более 200 м имеют неконсолидированное, рыхлое строение.

К настоящему времени обнаружено более 7100 ОСЗ различного диаметра, из которых 815 считаются потенциально опасными [12]. В ближайшие 20 лет могут быть обнаружены

еще приблизительно 20 000 ОСЗ диаметром более 140 м и приблизительно 100 000 — диаметром более 50 м [4].

Вероятности столкновения известных ПОО с Землей изменяются в диапазоне 10⁻⁹...10⁻² [13]. Оценки вероятности столкновения ПОО с Землей не дают представления о степени опасности (рисках) такого столкновения: степень опасности события определяется не только его вероятностью, но и энергией.

Величину энергии импактного события оценивают в мегатоннах тринитротолуолового эквивалента. Она определяется массой астероида или кометы (далее — ударника или импактора) и скоростью столкновения с Землей. Суммарная реализуемая энергия соударения может достигать 10⁸ Мт [1]. Энергия импакта расходуется на формирование кратера на поверхности Земли и генерацию сейсмических, приливных (цунами) и воздушных ударных волн.

В табл. 1 обобщены данные о частоте и энергии импактных событий, а также о степени их угрозы для современной цивилизации [14]. Приведенные частоты импактных событий определены на основании оценок темпов кратерообразования на поверхности наблюдаемых с Земли космических тел (Луна, Марс, Меркурий) — усреднением данных о количестве кратеров, образовавшихся за определенный период времени. Здесь не учтена изменчивость потока кратерообразующих тел во времени.

Энергия импакта расходуется на экскавацию кратера, на выброс материала вне его, на испарение, плавление, нагрев горных пород, их дробление и деформацию, а также на генерацию сейсмических волн. Согласно [15], на нагрев в целом идет около 30 % кинетической энергии, на дробление и другие деформации — порядка 20 %, на экскавацию и выброс материала — около 50 %.

Таблица 2. Риски смерти от природных катастроф и техногенных аварий [19]

Регион, страна	Природа катастрофы или аварии	Риск смерти, $\times 10^{-6}$ год $^{-1}$
США, Канада	Автокатастрофы	160
Бангладеш	Наводнение	50
Китай	Наводнение, землетрясение	25
Япония	Землетрясение	15
Карибы, Центральная Америка	Шторм, землетрясение, вулканизм	10
США, Канада	Пожары	10
Европа	Шторм	1
США, Канада	Авиакатастрофы	1
Весь мир	Глобальное импактное событие (диаметр тела ≥ 2 км)	1
США, Канада	Торнадо	0,1
Весь мир	Региональное событие (300 м < диаметр тела < 2 км)	0,1
Весь мир	Локальное событие (50 м < диаметр тела < 300 м)	0,01
США, Канада	Ядерные аварии (целевое значение риска)	< 0,01

Резкое торможение ударника при столкновении его с поверхностью планеты приводит к возникновению ударной волны сжатия. Сжатие вызывает нагрев вещества до нескольких десятков тысяч градусов. Это становится причиной образования огненного шара и ударной воздушной волны, движущейся с большой скоростью и распространяющейся на значительные расстояния, а также причиной подъема пыли на значительную высоту. К примеру, в результате самого мощного термоядерного взрыва (приблизительно 60 Мт), произведенного в СССР в 1962 году, возник огненный шар диаметром около 5 км. Ударная волна от взрыва трижды обогнула земной шар, а пылевое облако поднялось на высоту 65 км [16].

Важным аспектом является оценка минимального размера космического тела, которое: 1) достигнет земной поверхности и 2) приведет к формированию взрывного кратера. В соответствии с [13, 14], диаметр такого тела должен превышать 30 м или, согласно [17], — 65 м. В общем случае для импактных событий в энергетическом диапазоне $10^{-1} \dots 10^1$ Мт характер наблюдаемых эффектов будет определяться вещественным составом (плотностью) космического тела. Соответственно, в этом энергетическом диапазоне событие может проявиться как атмосферный взрыв [5], привести к образованию ударного кратера (для тел диаметром единицы — первые десятки метров) [17] или к формированию взрывного кратера. Вероятно, минимальный размер взрывного кратера составит около 500—1000 м. Другими словами, характер воздействия импакта на поверхность Земли и геологическую среду для данного энергетического класса является трудно прогнозируемым.

Согласно [18], приблизительно 15 % энергии импактного события в океане расходуется на образование цунами. Цунами способны эффективно переносить энергию на большие расстояния — тысячи и десятки тысяч километров со скоростью, которая в глубоких частях океана достигает

500 км/ч и более. Моделирование падения космических тел в океан [18] показало, что для типичной точки океанического побережья с углом раскрытия 180° и протяженностью акватории 6000 км (например для Нью-Йорка или Токио) вероятность воздействия цунами высотой 2, 5 и 25 м составляет $7 \cdot 10^{-5}$, $3 \cdot 10^{-5}$ и $3 \cdot 10^{-6}$ год $^{-1}$, соответственно.

В общем случае [18], индивидуальный риск гибели от непосредственного воздействия импакта ниже, чем риски, связанные с их непрямыми воздействиями (землетрясения, пожары, наводнения, глобальные атмосферные эффекты).

В табл. 2 сопоставлены риски смерти от импактных событий с рисками от природных катастроф (для различных регионов мира) и промышленных аварий (для США и Канады).

Сопоставление рисков смерти от импактных событий с другими рисками показывает, что первые невелики по сравнению с привычными, повседневными рисками гибели в автокатастрофах и промышленных авариях. Эти риски сопоставимы с рисками от некоторых природных катастроф — штормов и торнадо. В общем случае риски, ассоциирующиеся с импактными событиями, близки к пороговым значениям пренебрегаемых рисков.

Сценарии воздействия импактных событий на поверхностные объекты. Импактные события могут инициировать комплекс как внешних (землетрясение, наводнение, экстремальные метеорологические явления), так и внутренних (ударная волна, летящие предметы) событий, воздействующих на безопасность поверхностных ЯО. Нагрузки, связанные с индуцированными импактом явлениями, могут существенно превышать нагрузки, которые характерны для региона размещения ЯО. Например, даже в малосейсмичном регионе существует вероятность катастрофического землетрясения и цунами, порожденных импактным событием.

Таблица 3. Сценарии воздействия импактного события

Группа	Название группы сценариев	Нагрузки	Ущерб для барьеров безопасности	Радиологические последствия
I	Полное разрушение	Превышают максимально возможные	Полный отказ всех барьеров	Дисперсия всех накопленных радионуклидов
II	Запроектные аварии	Одновременное воздействие нескольких максимально возможных	Отказ части барьеров	Выход части радионуклидов
III	Проектные аварии	Не превышают учтенных в проекте	Возможен отказ одного или нескольких барьеров	Незначительные или отсутствуют

Отличительной особенностью воздействия импакта на ЯО является комплексность такого воздействия. Поверхностный объект в зависимости от близости к эпицентру события, его энергии и своего географического расположения испытывает воздействие высоких температур (огненный шар), затем — сейсмического толчка и, наконец, — воздушной волны, а возможно, и цунами. Совместное воздействие нескольких факторов может оказаться чрезвычайно опасным даже в случае, когда соответствующие нагрузки учитывались при проектировании. Примером радиологических последствий совместного воздействия нескольких факторов (землетрясение, а затем цунами) служит недавняя авария на АЭС «Фукусима-1».

Сценарии воздействия импакта на поверхностный ЯО могут быть разделены на качественном уровне на три группы (табл. 3). К сожалению, на данном этапе исследования весьма сложно определить минимальные размеры космического тела и, соответственно, максимальную вероятность импактного события, которые являются пороговыми для реализации каждой из групп сценариев.

Вероятность разрушения поверхностных объектов (сценарии и группы). Вероятность P_{c_i} сценария c_i может быть оценена по формуле

$$P_{c_i} = \sum_n P_n \frac{S_{n,c_i}}{S}, \quad (1)$$

где n — диапазон энергии события; P_n — средняя для Земли вероятность импактного события в данном диапазоне энергий; S_{n,c_i} — площадь зоны проявления сценария c_i ; S — площадь земной поверхности.

При расчете последствий взрывов различной энергии применим принцип подобия [20]. Согласно этому принципу,

картина происходящих явлений сохраняет свои общие черты во всем возможном диапазоне выделения энергии. Поэтому для оценки влияния импакта на поверхностные объекты могут быть использованы данные по воздействию ядерных взрывов определенной энергии.

Для оценки вероятности разрушения поверхностного объекта вследствие импактного события используем эмпирические данные о радиусе действия поражающих факторов ядерного взрыва мощностью 1 Мт. Согласно источнику [20], при взрыве такой мощности радиус огненного шара составляет 1,6 км, а радиус поражения железобетонных сооружений ударной волной (избыточное давление около 100 кПа) — 3,5 км. Далее используем также допущение о том, что радиус разрушительного воздействия сейсмического толчка составит приблизительно 10 радиусов кратера.

Расчет радиусов поражения для событий различной энергии (табл. 4) выполнен на основании зависимости [20]

$$R = R_{1\text{Мт}} \cdot \sqrt[3]{E}, \quad (2)$$

где R — радиус зоны поражения импактного события с энергией E [Мт]; $R_{1\text{Мт}}$ — радиус зоны поражения ядерным взрывом мощностью 1 Мт.

Для расчетов вероятности разрушения поверхностного объекта были использованы данные [21] о частоте импактных событий различной энергии и о зависимости диаметра кратера от энергии события. Результаты расчетов, выполненных по формуле (1), приведены в табл. 5. Их анализ показывает следующее.

Усредненная для поверхности суши Земли вероятность разрушения импактом поверхностного радиационно-опасного объекта находится в диапазоне $6 \cdot 10^{-10} \dots 4 \cdot 10^{-9} \text{ год}^{-1}$.

Таблица 4. Радиус разрушения поверхностного объекта вследствие действия различных поражающих факторов импактного события

Энергия импактного события, Мт	Частота события, год ⁻¹	Минимальный радиус разрушения, км			
		Зона кратера	Огненный шар	Ударная волна	Сейсмический толчок
1	$7,0 \cdot 10^{-3}$	—	—	3,5	—
10	$8,0 \cdot 10^{-4}$	0,5	3	8	5
10^2	$1,0 \cdot 10^{-4}$	1,3	7	16	13
10^3	$2,0 \cdot 10^{-5}$	2,5	16	35	25
10^4	$2,0 \cdot 10^{-6}$	5	34	75	50
10^5	$4,0 \cdot 10^{-7}$	13	74	162	125

Примечание: импактное событие с энергией порядка 1 Мт в 93 % случаев проявится как атмосферный взрыв.

Таблица 5. Суммарная вероятность разрушения поверхностного объекта

Энергия импактного события, Мт	Частота события, год ⁻¹	Вероятность разрушения, год ⁻¹		
		Огненный шар	Ударная волна	Сейсмический толчок
1	$7,0 \cdot 10^{-3}$	—	$1,8 \cdot 10^{-9}$	—
10	$8,0 \cdot 10^{-4}$	$2,0 \cdot 10^{-10}$	$9,6 \cdot 10^{-10}$	$4,2 \cdot 10^{-10}$
10^2	$1,0 \cdot 10^{-4}$	$1,2 \cdot 10^{-10}$	$5,6 \cdot 10^{-10}$	$3,3 \cdot 10^{-10}$
10^3	$2,0 \cdot 10^{-5}$	$1,1 \cdot 10^{-10}$	$5,1 \cdot 10^{-10}$	$2,6 \cdot 10^{-10}$
10^4	$2,0 \cdot 10^{-6}$	$5,0 \cdot 10^{-11}$	$2,4 \cdot 10^{-10}$	$1,0 \cdot 10^{-10}$
10^5	$4,0 \cdot 10^{-7}$	$4,6 \cdot 10^{-11}$	$2,2 \cdot 10^{-10}$	$1,3 \cdot 10^{-10}$
Суммарная вероятность, год⁻¹		$5,8 \cdot 10^{-10}$	$4,2 \cdot 10^{-9}$	$1,3 \cdot 10^{-9}$

Наибольший вклад в вероятность разрушения поверхностных объектов дают низкоэнергетические события (энергия 1...100 Мт) — следствие соударения Земли с космическим телом диаметром 30...200 м.

Наибольшие неопределенности оценок вероятности разрушения поверхностного объекта также связаны с телами малого диаметра. Для них сложно предсказать тип импактного события: произойдет ли атмосферный взрыв или будет образован кратер? Орбиты таких тел наиболее подвержены слабым воздействиям: гравитационное влияние, световое давление и т. п.

Дискуссия. Полученные оценки вероятности основаны на усредненных данных для больших отрезков времени (сотни миллионов лет) и являются, скорее всего, оптимистичными. Они не учитывают различия плотности размещения объектов на поверхности земной суши. Так, плотность размещения радиационно-опасных объектов на территории Украины превышает среднеземную плотность в 10 раз, а на территории Франции — в 30 раз. Не учитывалась также периодическая и нерегулярная изменчивость плотности потока кратерообразующих тел. Радиус разрушающего воздействия воздушной ударной волны был рассчитан для избыточного давления на фазе сжатия 100 кПа, а, согласно [22], отказ некоторых элементов конструкции АЭС может происходить при избыточном давлении 10...40 кПа. Указанные факторы могут увеличить вероятность разрушения поверхностного ЯО:

Группа факторов

Коэффициент кратности

1. Факторы, влияющие на изменчивость плотности потока кратерообразующих тел
 - 1.1. Географическое расположение ЯО 2
 - 1.2. Тенденция увеличения скорости кратерообразования за последние несколько сотен миллионов лет 2
 - 1.3. Периодические изменения плотности потока космических тел, связанные с галактическими приливами 5
 - 1.4. Кометные ливни 10—100
2. Факторы, увеличивающие вероятность разрушения ЯО
 - 2.1. Неопределенности, связанные со степенью сейсмического и теплового воздействия импакта на ЯО 2—5
 - 2.2. Колебания плотности размещения ЯО в отдельных странах относительно среднеземной 1—30
 - 2.3. Расположение ЯО на открытом морском берегу ≥ 10

Одни из перечисленных факторов характеризуют пространственную изменчивость вероятности разрушения ЯО (факторы 1.1, 2.2 и 2.3), другие — изменчивость во времени (1.2, 1.3 и 1.4). При этом факторы 1.2 и 1.3 отражают регулярную составляющую, а фактор 1.4 — нерегулярную составляющую изменчивости вероятности разрушения ЯО. Учет совокупного влияния всех факторов показывает, что диапазон неопределенности оценок вероятности разрушения ЯО может достигать трех — пяти порядков.

Отметим, что по консервативным соображениям «среднеземную» вероятность разрушения ЯО (табл. 5) следовало бы увеличить на два-три порядка (учет совместного влияния факторов 1.1, 1.2, 1.3, 2.2 и 2.3). Напомним также, что для некоторых районов Земли вероятность цунами 25-метровой высоты, вызванного падением астероида, превышает 10^{-6} год⁻¹. Поэтому «консервативная» оценка вероятности разрушения ЯО для некоторых «неблагополучных» регионов Земли может составить 10^{-7} ... 10^{-6} год⁻¹. Таким образом, если формально следовать нормативным требованиям в отношении граничной частоты исходных событий, которые необходимо рассмотреть при выполнении анализа безопасности, то нужно дополнительно обосновать оправданность исключения импактных событий из рассмотрения.

Аргументом в пользу рассмотрения импактных событий при анализе безопасности ЯО является масштаб возможных радиологических последствий.

Для низкоэнергетических событий (энергия события — 10^0 ... 10^2 Мт) дополнительное радиационное воздействие разрушенного импактом объекта существенно увеличит риски смерти для населения. Согласно оценкам [19], персональный риск гибели вследствие импактного события энергетического класса Тунгусского феномена (15 Мт) составляет 10^{-8} год⁻¹. Такое событие может привести к полному разрушению АЭС и поверхностного хранилища ОЯТ, а в окружающую среду может быть выброшено количество радионуклидов, эквивалентное сотням (разрушение АЭС) и тысячам тонн ОЯТ (разрушение промежуточного хранилища). Дополнительные риски, связанные с выбросом радионуклидов, могут быть оценены на основании анализа последствий Чернобыльской катастрофы. Вследствие аварии на ЧАЭС в окружающую среду были выброшены порядка 10 т ОЯТ и практически все летучие радионуклиды, которые содержались приблизительно в 200 т ОЯТ. Согласно [23], на территории Украины, Белоруссии и России с плотностью загрязнения цезием-137 более



Рис. 1. Европейская часть траектории предполагавшегося падения астероида Апофис, определенная на начальной стадии изучения его орбиты [26]

1 Ки·км⁻², где проживает 6,8 млн человек, может произойти до 4600 смертельных случаев раковых заболеваний в течение 95 лет. Реальный риск смерти от запроектной радиационной аварии только от раковых заболеваний составит $7 \cdot 10^{-6}$ год⁻¹, что, как минимум, на два порядка превышает риск смерти от прямого воздействия импакта.

Радиологические последствия импактного события в энергетическом диапазоне $10^2 \dots 10^5$ Мт будут иметь уже глобальный характер. В то же время считается, что глобальные нерадиологические последствия будут вызваны лишь импактом с энергией, превышающей 10^5 Мт.

Подтверждением этому может послужить анализ возможных последствий импактного события с энергией в 10^3 Мт, что удобно сделать на примере гипотетического столкновения с Землей астероида Апофис.

Начальная оценка вероятности его столкновения с Землей (на 2004 год) составила $2,7 \cdot 10^{-2}$ год⁻¹ [24], что послужило основанием для присвоения астероиду 4-го класса опасности по Туринской шкале [25]. При этом предполагаемая траектория падения пересекала ряд европейских стран с развитой ядерной энергетикой (рис. 1). В дальнейшем, на основании уточнения орбиты Апофиса, класс его опасности был снижен до 0 (вероятность столкновения $2 \cdot 10^{-5}$ год⁻¹) и были определены другие даты и траектории возможных столкновений.

Нерадиологические последствия импакта такой энергии могут иметь следующие особенности: полному опустошению подвергнется площадь в несколько десятков тысяч квадратных километров (падение на сушу); опустошительные цунами обрушатся на побережья стран Северной и Западной Европы (при падении Апофиса в Атлантический океан), а также всех черноморских стран (при падении в Черное море); количество жертв от непосредственного воздействия импакта составит десятки миллионов человек. Расстояние от эпицентра события с полным разрушением ЯО может составить 100–350 км. В табл. 6 обобщены данные о количестве ЯО, которые подвергнутся опасности полного или частичного разрушения (I и II группы сценариев) при падении астероида Апофис по траектории, показанной на рис. 1.

Из табл. 6 видно, что в результате импактного события мощностью 10^3 Мт в окружающую среду может быть выброшено количество радионуклидов, эквивалентное их содержанию в сотнях и, возможно, тысячах тонн отработавшего ядерного топлива. Если учесть, что в результате взрыва указанной мощности пыль поднимется

на десятки километров в атмосферу, а ударная волна несколько раз обогнет земной шар, то радиологические последствия, несомненно, будут иметь глобальный характер. Радиационному загрязнению подвергнется как минимум северное полушарие. Как и при отсутствии радиологических последствий, экосистемы восстановятся достаточно быстро, однако огромные территории Европы и Азии (и, возможно, Америки) будут заражены радионуклидами и на многие тысячелетия останутся незаселенными.

Таблица 6. Ядерные объекты Европы, которые могут быть разрушены или частично повреждены при падении астероида Апофис

Страна	Количество ЯО в зоне воздействия	Факторы воздействия
Великобритания	16 реакторов, завод по переработке ОЯТ	Т, У, С, Ц
Венгрия	4 реактора	Т, У, С
Германия	3 реактора	Т, У, С,
Нидерланды	2 реактора	Т, У, С, Ц
Румыния	2 реактора	У, С
Словакия	2 реактора	Т, У, С
Украина	3 реактора	С, Ц (?)
Франция	Завод по переработке ОЯТ	Ц
Чехия	6 реакторов	Т, У, С

Примечание. Т — действие высоких температур, У — ударная волна, С — сейсмический толчок; Ц — цунами.

Таким образом, в энергетическом диапазоне импактных событий $10^0 \dots 10^2$ Мт радиологические риски на два порядка выше нерадиационных, а в диапазоне $10^2 \dots 10^5$ Мт радиологические последствия (в отличие от нерадиологических) приобретут глобальный характер.

Выводы

Поверхностные ядерно- и радиационно-опасные объекты более уязвимы в случае импактного события, чем это традиционно считается. Их разрушение может произойти при событиях, энергия которых превышает 10^0 Мт. По самым неблагоприятным (консервативным) оценкам вероятность их разрушения составляет $10^{-7} \dots 10^{-6}$ год⁻¹. По сути, любое космическое тело, способное достичь поверхности Земли, может вызвать серьезную аварию или даже полное разрушение ЯО. Тяжесть радиологических последствий такой аварии будет определяться суммарной активностью радиоактивных веществ, находящихся на объекте, и метеорологических факторами. Наиболее опасны (вероятны) низкоэнергетические события ($1 \dots 100$ Мт). Они могут произойти при соударении Земли с космическим телом диаметром 30...200 м. При этом риск смерти от прямого воздействия импакта данной энергии приблизительно на два порядка ниже риска смерти при дополнительном радиологическом воздействии разрушенного объекта. В диапазоне энергий $10^2 \dots 10^5$ Мт радиологические

последствия импактных событий (в отличие от нерадио-логических) будут иметь глобальный характер.

На наш взгляд, это является серьезным аргументом для включения импактных событий в перечень возможных внешних воздействий при оценке пригодности площадок для размещения АЭС и хранилищ отработавшего ядерного топлива. При выполнении анализа безопасности указанных объектов следует учитывать комплексность воздействия поражающих факторов (высокие температуры, ударная волна, сейсмический толчок, цунами), а также тот факт, что нагрузки, связанные с индуцированными импактом явлениями, будут зависеть от его энергии и могут существенно превышать нагрузки, которые характерны для региона размещения объекта.

Список использованной литературы

1. Extraterrestrial Cause for the Cretaceous-Tertiary Extinction / Alvarez L. W., Alvarez W., Asaro F., Michel H. V. // *Science* : New Series. — 1980. — Vol. 208. — No. 4448. — P. 1095–1108.
2. *Chapman C. R.* The Comet/Asteroid Impact Hazard: A Systems Approach / Chapman C. R., Durda D. D., Gold R. E. — 2001. [Электронный ресурс]. — Режим доступа : www.boulder.swri.edu/clark/neowp.html
3. Near-Earth Object Survey and Deflection Study. — NASA HQ, 2006. — 272 p.
4. White Paper: Summary and Recommendations. Planetary Defense Conference. — 2007. [Электронный ресурс]. — Режим доступа : <http://www.aero.org/conferences/planetarydefense/2007papers/WhitePaperFinal.pdf>
5. Workshop on Near Earth Objects: Risks, Policies and Actions: Final Report // OECD Global Science Forum, Frascati, Italy. — January 20–22, 2003. [Электронный ресурс]. — Режим доступа : www.oecd.org/dataoecd/39/40/2503992.pdf
6. *НП 306.2.144–2008*. Вимоги з безпеки до вибору майданчика для розміщення атомної станції // Офіційний вісник України. — 2008. — № 39.
7. *НП 306.2.1412–008*. Загальні положення безпеки атомних станцій // Офіційний вісник України. — 2008. — № 95.
8. *НП 306.2.105–2004*. Основні положення забезпечення безпеки проміжних сховищ відпрацьованого ядерного палива сухого типу // Офіційний вісник України. — 2004. — № 52 (част. 1).
9. Норми радіаційної безпеки України, доповнення: Радіаційний захист від джерел потенційного опромінення (НРБУ-97/Д-2000). Державні гігієнічні нормативи : ДГН 6.6.1-6.5.061–2000. [Электронный ресурс]. — Режим доступа : http://www.uazakon.com/documents/date_ck/pg_gbnooc/index.htm
10. Extreme external events in the design and assessment of nuclear power plants. — Vienna : IAEA, 2003. — (IAEA-TECDOC-1341). — ISBN 92–0–102003–1; ISSN 1011–4289. — 109p.
11. *Chapman C. R.* The hazard of near-Earth asteroid impacts on Earth / Chapman C. R. // *Earth and Planetary Science Letters*. — 2004. — № 222. — P. 1–15.
12. Near-Earth Asteroid Discovery Statistic. [Электронный ресурс]. — Режим доступа : <http://neo.jpl.nasa.gov/stats/>
13. Impact Risk. [Электронный ресурс]. — Режим доступа : <http://neo.jpl.nasa.gov/risk/>
14. *Chapman C. R.* How a Near-Earth Object Impact Might Affect Society. [Электронный ресурс]. — Режим доступа : www.oecd.org/dataoecd/18/40/2493218.pdf
15. *Gault D. E.* Effects On Microcratering On The Lunar Surface / Gault D. E., Horz F., Hartung G. B. // In: *Shock Metamorphism Of Natural Materials*. — Baltimore, 1968. — P. 87–99.
16. *Big Ivan*. The Tsar Bomba (“King of Bombs”). [Электронный ресурс]. — Режим доступа : <http://nuclearweaponarchive.org/Russia/TsarBomba.html>
17. *Шустов Б.* Астероїдно-кометна небезпека: нові підходи / Шустов Б., Рихлова Л. // *Світогляд*. — 2010. — № 1. — С. 26.
18. *Ward S., Asphaug E.* Asteroid Impact Tsunami: A Probabilistic Hazard Assessment. [Электронный ресурс]. — Режим доступа : <http://www.es.ucsc.edu/~ward/papers/W+A.pdf>
19. *Morrison D.* Asteroid and Comet Impact Hazards. [Электронный ресурс]. — Режим доступа : <http://impact.arc.nasa.gov/downloads/ImpactsDMFH101200forweb.ppt>
20. The effects of nuclear weapons / Samuel Glasstone : Editor. — Revised Edition Reprinted February 1964. — Published by the U.S. Atomic Energy Commission. April 1962. [Электронный ресурс]. — Режим доступа : <http://www.osti.gov/scitech/servlets/purl/972902>
21. *Шестопалов В.* Влияние импактных событий на безопасность геологического хранилища радиоактивных отходов / Шестопалов В., Макаренко А., Шибецкий Ю. // *Геолог. журнал*. — 2012. — № 4. — С. 7–21.
22. Учет внешних событий, исключая землетрясения, при проектировании атомных электростанций // *Вена : МАГАТЭ*, 2008. — 128 с. — (Серия норм МАГАТЭ по безопасности, № NS-G-1.5).
23. Chernobyl: Looking Back to go Forward // *Proceedings of an International Conference organized by the IAEA on behalf of the Chernobyl Forum, Vienna, 6-7 September, 2005*. — Vienna : IAEA, 2008. — 247 p.
24. *Ноланд Д.* Столкновение Земли с астероидом — проблема Апофиса. [Электронный ресурс]. — Режим доступа : <http://gal-space.spb.ru/index129.html>
25. Torino impact scale. [Электронный ресурс]. — Режим доступа : http://impact.arc.nasa.gov/images/torino_plot_big.jpg
26. *Morrison D.* Cosmic Impacts and Evolution. [Электронный ресурс]. — Режим доступа : http://impact.arc.nasa.gov/downloads/Impacts_and_evolution_0906.pdf

References

1. *Alvarez, L.W., Alvarez, W., Asaro, F., Michel, H.V.* (1980), “Extraterrestrial Cause for the Cretaceous-Tertiary Extinction”, *Science*, New Series, Vol. 208, No. 4448, p. 1095–1108.
2. *Chapman, C.R., Durda, D.D., Gold, R.E.* (2001), “The Comet/Asteroid Impact Hazard: A Systems Approach”, SwRI White Paper, Available at: www.boulder.swri.edu/clark/neowp.html
3. Near-Earth Object Survey and Deflection Study, NASA HQ, 2006, 272 p.
4. White Paper: Summary and Recommendations, Planetary Defense Conference. — 2007. — <http://www.aero.org/conferences/planetarydefense/2007papers/WhitePaperFinal.pdf>
5. Workshop on Near Earth Objects: Risks, Policies and Actions: Final Report // OECD Global Science Forum, Frascati, Italy, January 20–22, 2003, Available at: www.oecd.org/dataoecd/39/40/2503992.pdf
6. *NP 306.2.144–2008*. Safety Requirements for Nuclear Power Plant Site Selection [Vymohy z bezpeky do vyboru maidanchyka dlia rozmischennia atomnoi stantsii], Official Ukrainian Bulletin, 2008, No. 39. (Ukr)
7. *NP 306.4.141–2008*. General Safety Provisions for Nuclear Power Plants [Zahalni polozhennia bezpeky atomnykh stantsii], Official Ukrainian Bulletin, 2008, No. 95. (Ukr)
8. *NP 306.2.105–2004*. Basic Safety Provisions for Dry Interim Storage Facilities of Spent Nuclear Fuel [Osnovni polozhennia zabezpechennia bezpeky promizhnykh skhovysch vidpratsiovannoho yadernoho palyva suchoho typu], Official Ukrainian Bulletin, 2004, No. 52 (Part 1). (Ukr)
9. Radiation Safety Standards of Ukraine, Supplement: Radiation Protection against Ionizing Radiation Sources (NRBU-97/D-2000). State Health and Safety Standards: DGN 6.6.1–6.5.061–2000 [Normy radiatsiinoi bezpeky Ukrainy, dopovnennia: Radiatsiyni zakhyt vid dzherel potentsiinoho oprominennia (NRBU-97/D-2000). Derzhavni hihienichni normatyvy: DGN 6.6.1–6.5.061–2000], available at: http://www.uazakon.com/documents/date_ck/pg_gbnooc/index.htm, 80 p. (Ukr)
10. *IAEA-TECDOC-1341*: Extreme External Events in the Design and Assessment of Nuclear Power Plants, IAEA, Vienna, 2003, 109 p.
11. *Chapman, C.R.* (2004), “The Hazard of Near-Earth Asteroid Impacts on Earth”, *Earth and Planetary Science Letters*, No. 222, pp. 1–15.

12. Near-Earth Asteroid Discovery Statistic, 2011, available at: <http://neo.jpl.nasa.gov/stats/>
13. Impact Risk, 2010, available at: <http://neo.jpl.nasa.gov/risk/>
14. Chapman, C.R. (2003), "How a Near-Earth Object Impact Might Affect Society", available at: www.oecd.org/dataoecd/18/40/2493218.pdf
15. Gault, D.E., Horz, F., Hartung, G.B. (1968), "Effects On Microcratering on the Lunar Surface", In: Shock Metamorphism of Natural Materials, Baltimore, pp. 87–99.
16. Big Ivan (2007), "The Tsar Bomba" ("King of Bombs"), available at: <http://nuclearweaponarchive.org/Russia/TsarBomba.html>
17. Shustov, B., Rykhlova, L. (2010), "Asteroid and Comet Hazard: New Approaches" [Asteroidno-kometna nebezpeka: novi pidkhody], Svitoglyad, No. 1, 26 p. (Ukr)
18. Ward, S., Asphaug, E. (1999), "Asteroid Impact Tsunami: A Probabilistic Hazard Assessment", available at: <http://www.es.usc.edu/~ward/papers/W+A.pdf>
19. Morrison, D. (2000), "Asteroid and Comet Impact Hazards", available at: <http://impact.arc.nasa.gov/downloads/ImpactsDMFH-101200forweb.ppt>
20. Glasston, S. "The Effects of Nuclear Weapons", available at: <http://www.osti.gov/scitech/servlets/purl/972902>
21. Shestopalov, V., Makarenko, A., Shybetzkyi, Yu. (2012), "Influence of Impact Events on Geological Repository Safety" [Vliianie impaktnykh sobytii na bezopastnost geologicheskogo khranilizchia radioaktivnykh otkhodov], Geological Journal, No. 4, pp. 7–21. (Rus)
22. External Events Excluding Earthquakes in the Design of Nuclear Power Plants: Safety Guide (Safety Standards Series, No. NSG-1.5), IAEA, Vienna, 2003, 105 p.
23. Chernobyl: Looking Back to go Forward, Proceedings of an International Conference organized by the IAEA on behalf of the Chernobyl Forum, Vienna, 6–7 September, 2005, IAEA, Vienna, 2008, 247 p.
24. Noland, D. "A Collision the Earth with an Asteroid", the Apophys Problem, available at: <http://galspace.spb.ru/index129.html>
25. Torino Impact Scale, available at: http://impact.arc.nasa.gov/images/torino_plot_big.jpg
26. Morrison, D. (2006), "Cosmic Impacts and Evolution", available at: http://impact.arc.nasa.gov/downloads/Impacts_and_evolution_0906.pdf

Получено 12.02.2015.

Шановні панове!

Повідомляємо про початок передплати періодичних видань на II півріччя 2015 року. Ви маєте можливість оформити передплату за оновленими каталогами ДП «Преса» в поштових відділеннях або на сайті www.presa.ua, а також на підставі надісланого редакцією рахунку-фактури на замовлення зацікавлених організацій та окремих осіб.

Наш передплатний індекс — 37781.

Сподіваємось бачити Вас і Ваших колег серед постійних читачів і авторів журналу.