

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

## ВЛИЯНИЕ ИМПАКТНЫХ СОБЫТИЙ НА БЕЗОПАСНОСТЬ ГЕОЛОГИЧЕСКОГО ХРАНИЛИЩА РАДИОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ

Розглянуто вплив імпульсних подій на довготривалу безпеку системи геологічного захоронення радіоактивних відходів (РАВ), а також дано оцінку ймовірності таких впливів. Було проаналізовано й узагальнено дані про частоту імпульсних подій і процесів в геологічному середовищі і біосфері, які супроводжують утворення імпульсних структур; масштаби прояву цих процесів залежно від енергії космічних тіл, які зіштовхуються із Землею; можливі екологічні і соціальні наслідки імпульсів. За цими даними визначено сценарії впливу імпульсних подій на безпеку сховища; оцінено ймовірності сценаріїв і граничні характеристики космічних тіл, що відповідають певним сценаріям, а також сформульовано деякі висновки щодо урахування імпульсних подій при аналізі безпеки геологічних сховищ РАВ. Зокрема, встановлено, що існує енергетичний діапазон імпульсних подій ( $10^2 \dots 10^5$  Мт), вплив яких на геологічне сховище може призвести до радіологічних наслідків, площа прояву яких перебільшуватиме площу прояву не радіологічних наслідків. Ймовірність такого сценарію низька і становить  $10^{-10} \dots 10^{-9}$  рік<sup>-1</sup>. Однак цей сценарій може призвести до значного перевищення встановлених нормами радіаційної безпеки рівнів прийнятної ризику. Тому він має розглядатися при аналізі безпеки геологічного сховища. Також надано рекомендації щодо зниження ймовірності руйнування геологічних сховищ РАВ.

The influence of impacts on the long-term safety of the radioactive waste geological disposal system was considered, and also the probability of such effects was assessed. It was analyzed and generalized information in relation to: frequencies of impacts and processes within geological environment and biosphere, which accompany formation of craters; scales of these processes depending on energy of projectiles, which encounter with the Earth; possible ecological and social consequences of impacts. Based on these data certainly scenarios of impacts influence on geological repository safety were determined; scenarios probabilities and maximum ranges of the corresponding projectile were estimated, and also some conclusions concerning the account of impacts at safety assessments of geological repositories were formulated. In particular, it was shown that there is an impacts energy class ( $10^2 \dots 10^5$  Mt), the radiological consequences of which can jeopardize greater territory than the non-radiological one. The probability of such scenario is low ( $10^{-10} \dots 10^{-9} \text{ y}^{-1}$ ). However, the risk of this scenario can exceed the level of acceptable risk determined by the radiation safety norms. Thus, such scenario should be examined at the safety analysis of geological repository. Recommendations were also given in relation to the decreasing of probability of the geological repository destruction.

### Введение

Долговременная безопасность при геологическом захоронении радиоактивных отходов (РАО) обеспечивается за счет создания многобарьерной системы инженерных и природных барьеров (далее – геологического хранилища), которая размещается на глубине нескольких сотен метров. Система захоронения считается безопасной, если будет доказано, что для любого сценария ее эволюции (в процессе деградации системы инженерных барьеров) на протяжении необходимого периода времени дозы облучения и радиологические риски для населения не превысят установленные законодательством нормы. Необходимый период обеспечения безопасности захоронения

РАО определяется скоростью снижения активности радионуклидов и составляет несколько сотен тысяч лет [22]. Поэтому безопасность геологического хранилища не может быть обеспечена только лишь инженерными барьерами – хранилище должно быть размещено в таком геологическом окружении, которое сохраняет свои барьерные функции требуемое время.

Сценарии эволюции геологического хранилища разрабатываются на основе анализа рекомендованных международными организациями списков [19]: *свойств* (характеристик) компонентов системы захоронения РАО; *процессов*, происходящих в компонентах системы и определяющих ее внутреннюю эволюцию; *внешних*, по отношению к системе, *событий*, которые могут нарушать ее "естественную" эволюцию, связанную с протеканием внутренних процессов.

© В. М. Шестопапов, А. Н. Макаренко,  
Ю. А. Шибецкий, 2012

Списки свойств, событий, процессов, которые являются важными для обоснования безопасности системы геологического захоронения РАО, включают несколько сотен позиций. Отбор таких списков для разработки сценариев производится для каждого конкретного случая размещения геологического хранилища и определяется прежде всего типом выбранной формации, поверхностными физико-географическими условиями выбранной площадки, ее геологическим строением и геологической историей региона.

Пожалуй, *единственным событием, которое может привести к полному разрушению геологического хранилища с дисперсией в окружающую среду всего содержимого радионуклидов и может проявиться на любой площадке, является падение достаточно крупного космического тела* (далее – импактное событие, или импакт).

### Постановка задачи исследования

Целью настоящей работы является анализ возможного влияния импактного события на безопасность геологического хранилища.

Традиционно влияние импактных событий на безопасность объектов по захоронению РАО (поверхностных и геологических) при определении сценариев их эволюции исключается из рассмотрения [28, 34]. При этом используется следующая мотивация, основанная на качественных оценках.

Считается, что вероятность падения крупного небесного тела (метеорита, кометного ядра), которое может нанести ущерб хранилищу РАО, является очень низкой. К примеру, согласно работе [17], из рассмотрения исключаются события, вероятность проявления которых ниже  $10^{-4}$  за 10 000 лет, т. е. не превышает  $10^{-8}$  год<sup>-1</sup>. Кроме этого, считается, что количество жертв среди населения и воздействие на биосферу, вызванное падением крупного метеорита, значительно превысит возможный радиологический ущерб [34]. Однако возникает вопрос: может ли импактное событие (а если да, то каким образом) оказать влияние на безопасность системы захоронения с частотой, превышающей указанную, при условии, что радиологические его последствия окажутся больше или соизмеримыми с нерадиологическими?

В соответствии с национальными нормами [2], при выборе площадки должны быть выявлены и проанализированы все исходные события, которые могут оказать влияние на безопасность системы геологического захоронения, если частота их проявлений превышает  $10^{-6}$  в год. Должны быть рассмотрены также и события с меньшей вероятностью, если они могут привести к превышению установленных нормами радиационной безопасности уровней приемлемого риска.

Указанные соображения определяют круг задач и рамки исследования.

Далее для оценки вероятности и степени потенциального влияния импактных событий на безопасность геологического хранилища были обобщены и проанализированы данные о:

- частоте событий и процессах в геологической среде и биосфере, которые сопровождают образование импактных структур;
- масштабах процессов и их зависимости от энергии падающих космических тел;
- возможных экологических и социальных последствиях импактных событий.

На основании этих данных установлены процессы, сопровождающие импактные события и влияющие на безопасность хранилища; определены уровни воздействия на функции компонентов системы захоронения и просчитаны сценарии указанных воздействий; оценены вероятности и предельные характеристики космических тел, соответствующие данным сценариям; сформулированы некоторые выводы об учете влияния импактных событий при анализе безопасности геологических хранилищ РАО.

### Частота импактных событий

Следы ударов космических тел о поверхность Земли представляют собой округлые геологические структуры необычного строения. Их часто называют "астроблемы", "импактные структуры", "ударные кратеры", "метеоритные кратеры". Поскольку природа кратерообразующего тела, как правило, остается невыясненной (астероид ли это или ядро кометы), для его обозначения часто пользуются термином "ударник".

Основные трудности оценки частоты образования кратеров различного диаметра заключаются в том, что земные кратеры быстро разрушаются. Причем наблюдается селективное разрушение – кратеры малых размеров разрушаются значительно быстрее. Поэтому общее число имеющихся кратеров невелико и по ним трудно судить как о действительной скорости кратерообразования, так и о реальном распределении кратеров по размерам. В этой связи предпочтительнее опираться на лунные данные, соотнося их с Землей. Но и лунные данные имеют свой недостаток – они плохо датированы. Это усложняет оценку скорости кратерообразования для относительно небольших периодов времени.

На рис.1 представлены обобщенные данные о кумулятивном количестве импактных кратеров определенного размера, которые сформировались на Луне за последние 3 млрд лет [23].

По виду кривых (рис. 1) можно оценить количество (для определенного промежутка времени), а также удельную (на 1 км<sup>2</sup> земной поверхности) и суммарную для определенной территории (например, для Украины) вероятность образования кратеров различного диаметра. Эти оценки приведены в табл. 1.

Представленные в табл. 1 оценки справедливы для предположения о постоянной интенсивности потока кратерообразующих тел на протяжении последних 3 млрд лет. Однако с высокой степенью достоверности можно утверждать, что поток довольно сильно изменялся во времени, причем просматривается определенная периодичность в этих изменениях.

Считается, что около 20–70% ударных кратеров на Земле имеют кометное происхождение [25, 30, 31]. Кометные орбиты на-

иболее подвержены влиянию внешних по отношению к Солнечной системе гравитационных возмущений. Поэтому ритмы кометных потоков могут быть вызваны гравитационными возмущениями, которые связаны с регулярными прохождениями солнечной системы через галактическую плоскость (30-миллионнолетний ритм) и через спиральные рукава Галактики (260-миллионнолетний ритм) [26].

На рис. 2 показана наблюдаемая периодичность образования кратеров на земной поверхности и ее вероятная связь с приливными воздействиями со стороны галактической плоскости. Можно видеть, что современная скорость кратерообразования в 5–6 раз выше средней за последние 100 млн лет. Также прослеживается хорошая корреляция с приливным влиянием Галактики на Солнечную систему.

Данные многих работ [1, 12, 16, 18] подтверждают оценки наиболее вероятного значения среднего ритма кратерообразования, составляющего приблизительно 30 млн лет. Точность датировки вспышек кратерообразования пока еще невелика. Но достаточно аргументированно можно утверждать, что из-за пребывания в непосредственной близости от галактической плоскости сейчас Земля находится в одной из эпох интенсивного кратерообразования, которая продлится еще несколько миллионов лет.

Возмущения кометного "банка" на окраинах Солнечной системы со стороны близких проходящих звезд и газопылевых облаков также способны привести к резкому усилению потока комет в направлении к Солнцу, а следовательно, к более частым их столкновениям с Землей. "Бомбардировка" Земли кометами может происходить относительно короткими порциями – "кометным ливнем".

Таблица 1. Вероятность образования кратеров различного размера

Диаметр кратера, км	Количество кратеров на Луне за 1 млн лет	Частота образования кратера на Луне, год <sup>-1</sup>	Удельная вероятность образования кратера на Земле, год <sup>-1</sup> ·км <sup>-2</sup>	Вероятность образования кратера на территории Украины, год <sup>-1</sup>
1... 5	300	3,0·10 <sup>-4</sup>	5,8·10 <sup>-13</sup>	3,5·10 <sup>-7</sup>
5... 10	5	5,0·10 <sup>-5</sup>	9,8·10 <sup>-15</sup>	5,8·10 <sup>-9</sup>
10... 50	2,7	2,7·10 <sup>-6</sup>	5,3·10 <sup>-15</sup>	3,1·10 <sup>-9</sup>
50... 100	0,3	3,0·10 <sup>-7</sup>	5,9·10 <sup>-16</sup>	3,5·10 <sup>-10</sup>
Более 100	Менее 0,05	5,0·10 <sup>-8</sup>	9,8·10 <sup>-17</sup>	5,8·10 <sup>-11</sup>

Примечание. Оценка выполнена, исходя из следующих допущений и условий: 1) поток кратерообразующих тел для Луны и Земли одинаков; 2) влияние земной атмосферы не учитывается; 3) площадь земной поверхности – 5,1·10<sup>8</sup> км<sup>2</sup>, Украины – 6,03·10<sup>5</sup> км<sup>2</sup>.

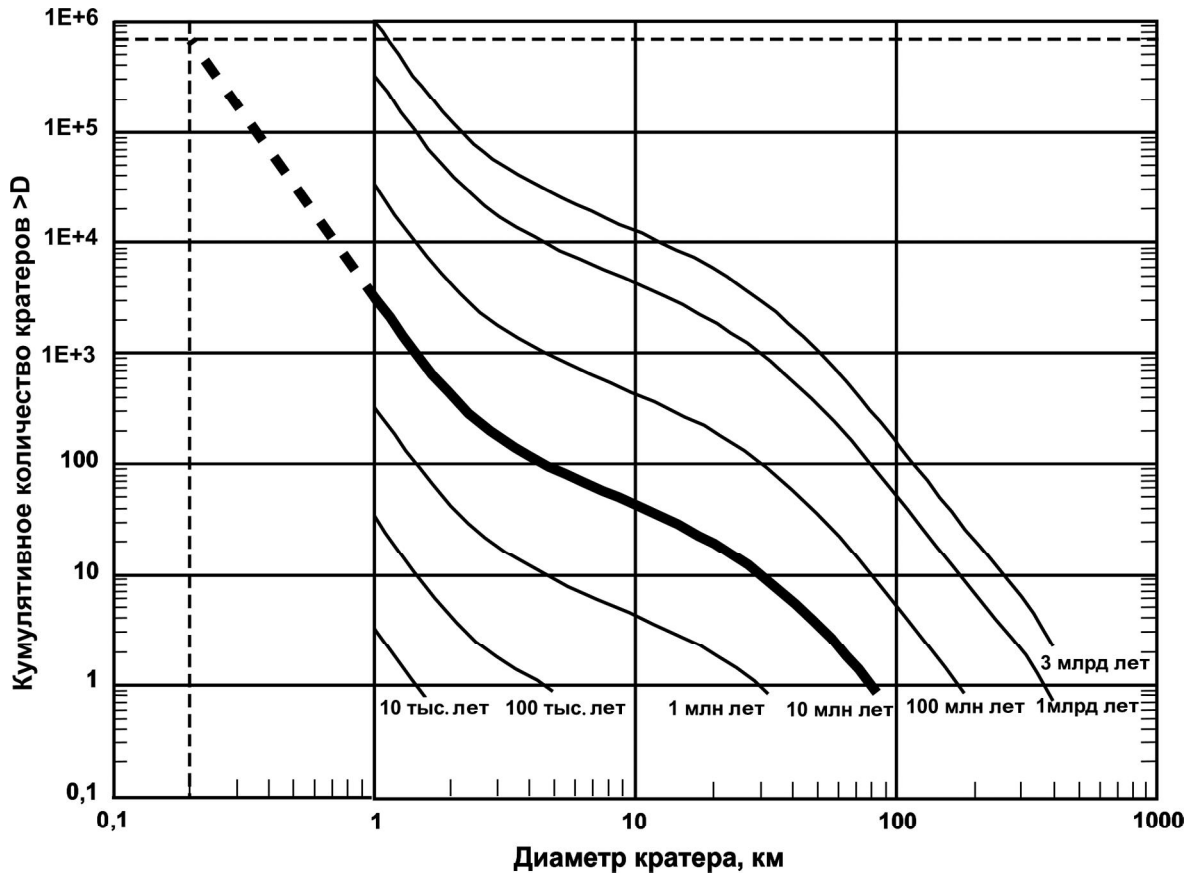


Рис. 1. Кумулятивное число импактных кратеров, образовавшихся на Луне за определенный период времени [23]

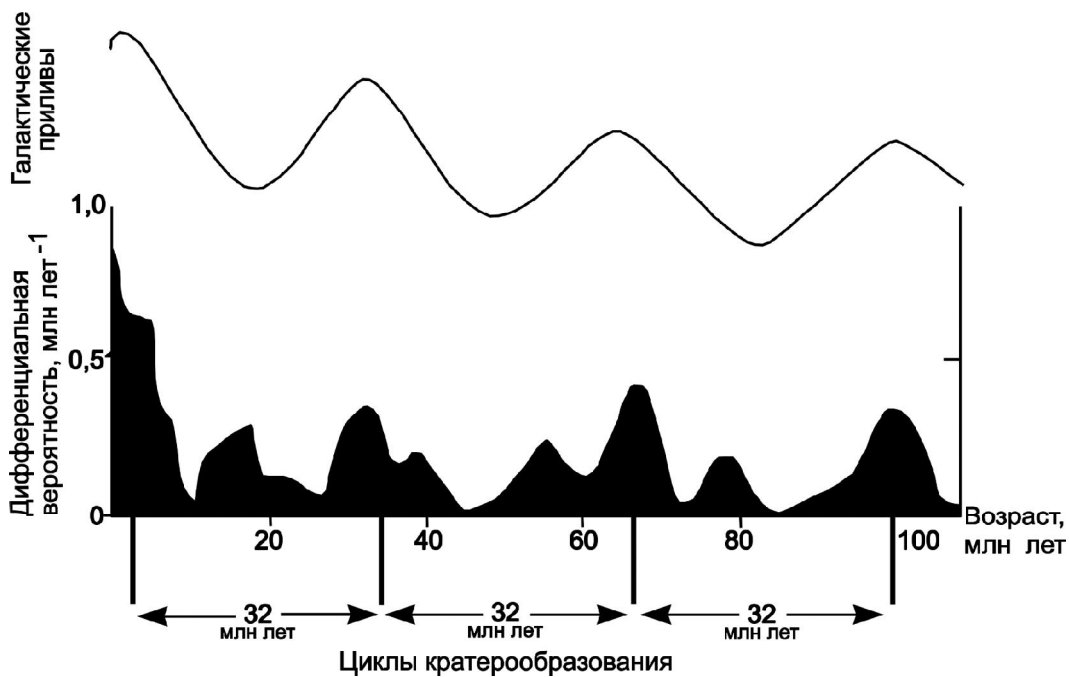


Рис. 2. Наблюдаемая вероятность кратерообразования и ее связь с галактическими приливами [26]

По данным работы [15], средняя продолжительность кометного ливня определяется временем  $(3 - 5) \cdot 10^6$  лет, а средняя интенсивность потока кометных тел на Землю составляет три–четыре кометных падения за каждые  $10^6$  лет. Однако в работе [8] интенсивность потока оценена величиной около 100 падений комет на Землю за  $10^6$  лет, что на 2 порядка превышает средние оценки. Указанная оценка основана на наблюдательных данных вероятных следов на лунной поверхности одного из недавних нерегулярных кометных ливней.

Следует также упомянуть, что широтное распределение кратеров на поверхности Земли неравномерно. Частота их образования в полярных областях приблизительно в 2 раза ниже, чем в экваториальных. Это объясняется тем, что наклоны орбит ударников к плоскости эклиптики таковы, что с большей вероятностью падения происходят в экваториальных широтах [32].

Подводя итоги оценки вероятных изменений темпов кратерообразования в геологической истории Земли, следует отметить следующее. Формирование кратеров в последние несколько сотен миллионов лет происходит примерно в 2 раза более активно (рис. 2), чем в среднем для геологической истории Земли. Земля находится на пике 30-миллионнолетнего ритма кратерообразования, что может дать увеличение потока кратерообразующих тел еще примерно в 5 раз. Появление нерегулярных всплесков кратерообразования маловероятно. Однако их проявление может привести к увеличению потока еще на 2 порядка. Таким образом, можно предположить, что с учетом только лишь периодической составляющей вероятности образования кратеров на поверхности Земли (табл. 1) следует увеличить как минимум на порядок, а при дополнительном учете нерегулярной составляющей (кометные ливни) – на 3 порядка.

### **Воздействие импактных событий на геосферу**

Размеры и особенности геологического строения астроблем зависят от многих причин, среди которых главными являются две: энергия соударения и угол встречи ударника с мишенью. Величину энергии соударения

принято выражать в мегатоннах тринитролуолового эквивалента ( $1 \text{ Мт} = 4,2 \cdot 10^{15} \text{ Дж}$ ). Диаметр кратера определяется кинетической энергией ударника. Для крупных (взрывных) кратеров он пропорционален корню четвертой степени энергии [5].

При скоростях соударения до  $3-5 \text{ км}\cdot\text{с}^{-1}$  (такие скорости возможны только для малых тел до нескольких метров в диаметре) образуются ударные кратеры (лунки, воронки, по размеру соответствующие ударнику). Породы мишени дробятся и выбрасываются из воронки, распределяясь равномерно вокруг нее при вертикальном падении или вперед по направлению падения при ударе под углом.

При больших скоростях соударения происходят взрыв и образование взрывного кратера. Энергия удара расходуется на экскавацию кратера, выброс материала вне его, испарение, плавление, нагрев горных пород, их дробление и деформацию, а также на генерацию сейсмических волн. Согласно работе [20], на нагрев в целом идет около 30% кинетической энергии, на дробление и другие деформации – примерно 20%, на экскавацию и выброс материала – около 50%. Кроме этого, значительное выделение энергии в недрах кратера может привести к возникновению гидротермальной деятельности и вулканической активности [11, 27].

Суммарная энергия, реализуемая в процессе соударения, может превышать  $10^{19}-10^{23} \text{ Дж}$ . Эта величина сопоставима с энергией катастрофических вулканических извержений (например, извержения вулкана Тамбора в 1815 г. или Кракатау в 1883 г.). Однако скорость механического деформирования пород при импактных соударениях на 17–20 порядков больше. Резкое торможение ударника при столкновении его с поверхностью планеты приводит к возникновению ударной волны сжатия, которая движется от точки столкновения вперед (в породах мишени – земной коры) и назад (в веществе ударника – космического тела). Сила сжатия при этом может составлять 100–300 ГПа, а время достижения максимальной величины сжатия измеряется первыми миллиардными долями секунды. Сжатие вызывает нагрев вещества до нескольких десятков тысяч градусов за столь же краткие промежутки времени.

Ударное сжатие сменяется разрежением (разгрузкой), которое сопровождается механическим преобразованием породы, ее дроблением и адиабатическим охлаждением вещества. Послеударная температура вещества в точке удара оказывается очень высокой, достигая 10 000–15 000°C.

В образующемся метеоритном кратере в центре (у точки удара) возникает зона испарения вещества (где породы нагреваются до многих тысяч градусов), затем располагаются зона плавления вещества (нагрев превышает 1500°C) и, наконец, зона дробления пород (в которой нагрев не превышает десятков – первых сотен градусов).

После затухания ударной волны формирование астроблемы продолжается: падают выброшенные в атмосферу обломки, оседают борта воронки, деформируется ее дно, перемешиваются в движении обломки и расплав, кристаллизуется расплав, остывают породы кратера. Это стадия переработки (модификации) метеоритного кратера. Она происходит уже намного медленнее. Если образование воронки занимает секунды (в самых крупных кратерах десятки секунд), то стадия модификации – это уже геологический процесс (по скорости протекания), который растягивается на тысячи, десятки тысяч, сотни тысяч и миллионы лет. Общая схема строения импактных структур показана на рис. 3 [3, 7].

Небольшие (диаметром до 3–4 км, изредка больше) астроблемы имеют простую чашеобразную форму. Отношение глубины кратера к его диаметру составляет примерно 0,30 – 0,33. При диаметрах воронки более 14–15 км появляются кольцевые поднятия. Иногда в кратере наблюдаются и центральное, и кольцевое поднятия одновременно. Отношение глубины к диаметру с увеличением поперечника быстро падает до 0,05 – 0,1, а полость астроблемы становится уплощенной. Вокруг кратера и под кратером располагается зона трещиноватости, которая постепенно затухает с глубиной.

Характерной чертой строения метеоритных кратеров является наличие сложной системы разрывных нарушений в толще пород мишени. Эти системы достаточно однотипны. Примером может служить система нарушений кратера Эльгыгытгын (Чукотка, радиус 9 км) [3]. Здесь установлены две

главные системы нарушений. Первая система представлена крутопадающими радиальными нарушениями, расходящимися во все стороны от кратерной воронки. Количество нарушений и их густота быстро понижаются по мере удаления от кратера. Длина отдельных нарушений составляет от 0,5–1 до 5–6 км. Вторая система представлена кольцевыми и дугообразными нарушениями, концентрически расположенными вокруг кратерной воронки. Наблюдается использование кольцевых разломов современной гидросетью. Кроме круто падающих кольцевых и радиальных нарушений, на внутренней поверхности воронки кратера наблюдаются полого падающие нарушения, плоскости смещения которых наклонены к центру кратера под углами 20–50°. Густота сети нарушений (разломы длиной от 0,5 км и более) постепенно уменьшается по мере удаления от кратера и на расстоянии 2,5 радиуса от его центра ( $R_{кр}$ ) снижается до регионального фона. Эти данные хорошо согласуются с данными по другим структурам метеоритного происхождения на поверхности Земли и Луны. Для лунных кратеров ширина зоны нарушений составляет 1,9–2,2  $R_{кр}$ . Зона более мелких разломов и трещин может занимать большую территорию.

Идентифицировать размеры зоны поверхностных разрушений, вызванных сейсмическим толчком при прохождении ударной волны в грунте, достаточно трудно. По некоторым оценкам [5], падение астероида диаметром 10 км сформирует кратер диаметром около 100 км, вызовет сейсмический толчок, который окажется разрушительным в радиусе более 500 км (10  $R_{кр}$ ). В меньшем масштабе разрушению подвергнутся районы, находящиеся, возможно, до 1500 км (30  $R_{кр}$ ) от эпицентра. В случае падения астероида меньшего радиуса площадь вызванных им разрушений будет уменьшаться приблизительно пропорционально 1/2 степени его линейных размеров. Для тела диаметром 1 км кратер будет около 10 км в диаметре, а радиус зоны разрушения – от 200 до 300 км (40–60  $R_{кр}$ ).

Существует эмпирическая зависимость [9], связывающая энергию землетрясения ( $E$ ) с его магнитудой ( $M$ ):

$$\lg E = 12,3 + 1,4M.$$

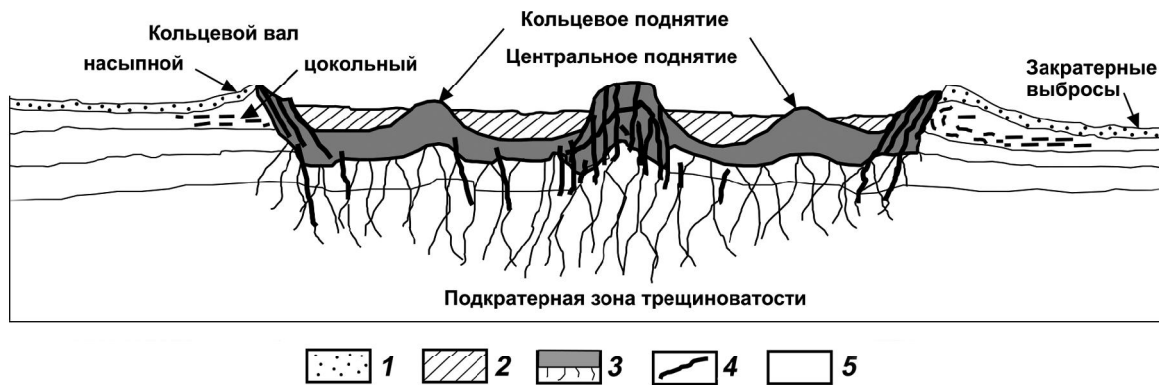


Рис. 3. Общая схема строения импактных структур (астроблем) [6, 24]

1 – аллогенные брекчии закраторных выбросов; 2 – аллогенные брекчии и расплавные импактиты (тагамиты, стекла, шлаки) внутри астроблемы; 3 – аутигенные брекчии; 4 – разрывные нарушения; 5 – породы мишени

Используя эту зависимость, можно показать, что энергия Тунгусского феномена эквивалентна землетрясению с магнитудой  $M = 7,7$ , а энергия образования 25 км кратера –  $M = 10,5$  (с учетом того, что на генерирование сейсмических волн расходуется 30% энергии импакта). Землетрясения значительной силы сопровождаются образованием сети трещин в земной коре. Трещины достигают ширины от 20–50 см до 10–15 м и тянутся иногда на многие километры, а видимая глубина их доходит до 10 м. Трещины, образовавшиеся при первом ударе, иногда закрываются при следующих, но часто смыкаются медленно или остаются открытыми. Таким образом, можно предположить, что на расстоянии 30–60  $R_{кр}$  от центра ударного кратера могут формироваться зоны повышенной трещиноватости пород мишени.

Отметим также, что в тектонически активных регионах региональное влияние удара космического тела может проявиться в разрядке напряженного состояния недр. Этот удар может явиться спусковым (триггерным) механизмом и обусловить серию землетрясений или подвижек по долгоживущим разломам.

Возникшее в ходе импактного события естественное понижение рельефа сопровождается вскрытием водоносных горизонтов, соответствующим увлажнением местности или даже образованием внутрикратерных озер. Внутрикратерные озера могут иметь простую или сложную конфигурацию в зависимости от топографии кратера и степени

обводненности территории. Структурные нарушения в породах, изменения их пористости и проницаемости, связанные с образованием кратера, могут повлиять и на режим подземных вод в кратере и его окрестностях. В окрестностях кратера формируется зона повышенного водообмена, а сам кратер становится зоной разгрузки подземных вод.

В окрестностях недавно сформированного кратера может возникнуть термальная аномалия, являющаяся результатом двух эффектов:

- нагрева горных пород непосредственно в момент удара (на это расходуется около 30% кинетической энергии ударника), что может привести к формированию линз расплава в импактных породах кратера;
- экскавации верхних слоев земной коры до глубин в несколько сотен и более метров, что вызывает увеличение потока тепла из земных глубин к поверхности.

Расчеты теплопереноса показывают, что в случае достаточно крупного кратера (около 10 км в диаметре) на полное остывание расплава может потребоваться до 40 тыс. лет [6]. Охлаждение будет осуществляться за счет теплопроводности вышележащих горных пород, вследствие радиационного охлаждения горных пород поверхности, но главным образом посредством тепловой конвекции содержащихся внутри кратера подземных вод [24]. Таким образом, в случае падения крупного космического тела и достаточной обводненности горных пород в месте падения в недрах кратера может возникнуть гидротермальная деятельность.

Таким образом, непосредственное воздействие крупного импактного события на геологическую среду приведет к образованию взрывного кратера; выбросу пород вне его; испарению, плавлению и нагреву горных пород, их дроблению и деформации; к генерации сейсмических волн. Отдаленными последствиями могут стать формирование термальной аномалии, образование гидротермальной деятельности, возникновение внутрикратерного озера и изменение гидрогеологического режима подземных вод. Падение малых тел (до нескольких метров в диаметре) не оказывает заметного влияния на геологическую среду. Следствием таких импактных событий является образование ударных кратеров небольших размеров, а также дробление и выброс пород мишени.

### **Возможные экологические и социальные последствия импактных событий**

Было показано [4], что при рассмотрении мощных взрывных процессов применим принцип подобия. Согласно этому принципу, картина происходящих явлений сохраняет свои общие черты во всех масштабах энергии. Поэтому влияние столкновения Земли с крупным астероидом на атмосферу и климат (наиболее важное с точки зрения глобального воздействия на биосферу планеты и цивилизацию) сходно со сценариями ядерной войны и крупнейшими вулканическими извержениями. Масштабы же явлений в определяющей степени зависят от энергии столкновения.

Импактные события, приводящие к образованию взрывных кратеров, являются биологически "переустанавливающими". Выделяют три фазы развития импактных экосистем, или реколонизации [14]. Фаза термальной биологии (1) ассоциируется с кратковременной локальной термальной аномалией, произведенной импактным событием. Фаза импактной сукцессии (2), или последовательной смены во времени видов животных и растений, характеризуется множественностью первичных и вторичных событий последовательной смены населяющих кратер и его окрестности видов, обитающих как в водной среде (импактные кратерные озе-

ра), так и в сухой местности (колонизация палеоозерных отложений и/или генерированного импактом субстрата). Эти процессы продолжают, пока не наступит устойчивое равновесие. Завершается процесс реколонизации фазой экологической ассимиляции (3), т. е. полным стиранием различий между импактной экосистемой и вмещающими ее экосистемами.

Отмечается сходство процессов импактной сукцессии с аналогичными явлениями, следующими за другими "возмутителями" экосистем, такими как вулканическая активность. По аналогии с темпами восстановления биосферы в районах, пораженных последствиями вулканической деятельности, можно предположить, что и восстановление биосферы на месте импактного события происходит в масштабах десятилетий.

Со временем в кратерах, возникших в засушливых, пустынных местах или в местах с арктическим климатом, развиваются "оазисы жизни". На территории кратеров и в их окрестностях часто формируются условия, более пригодные для ведения сельского хозяйства. Кратеры также привлекают людей из-за благоприятного микроклимата, доступности воды (в пустынных ландшафтах), возможности ведения туристического бизнеса и т. п.

Масштаб социальных последствий (экономический ущерб и человеческие потери) импакта будет зависеть не только от энергии события, но и от распределения экономической инфраструктуры и населения на поверхности планеты. Согласно работе [29], наиболее уязвимыми в отношении экономических последствий являются территории Северной Америки и Западной Европы, а в отношении человеческих потерь – Индии, Зондского архипелага и восточного побережья Китая. Было также показано, что экологические и социальные последствия импактного события, приводящего к образованию 50 км кратера (энергия падения порядка  $10^6$  Мт), могут вызвать гибель современной цивилизации [13].

В табл. 2 описаны проявления основных экологических эффектов и социальных последствий, сопровождающих падение космических тел различного диаметра.

Анализ табл. 2, показывает, что переход от локальных (в масштабах небольшой стра-



Таблица 2. Уровни экологических и социальных последствий импактных событий (на основании обобщения данных работ [13, 21, 23, 33, 35])

Характеристика события					
Диаметр ударника, км	~ 0,03	~ 0,3	~ 1	~ 2	10... 15
Вероятность события на Земле, год <sup>-1</sup>	~ 10 <sup>-2</sup>	~ 10 <sup>-4</sup>	~ 10 <sup>-5</sup>	~ 10 <sup>-7</sup>	~ 10 <sup>-8</sup>
Энергия события, Мт	~ 10 <sup>1</sup>	~ 10 <sup>3</sup>	~ 10 <sup>5</sup>	~ 10 <sup>6</sup>	~ 10 <sup>8</sup>
Площадь опустошения, км <sup>2</sup>	Несколько тысяч	Несколько десятков тысяч	Несколько сотен тысяч	Несколько миллионов	–
Экологические последствия					
Тотальные разрушения в зоне кратера, км	Уничтожение лесов на ограниченной площади	~ 5... 10	~ 20... 25	~ 50	Несколько сотен
Пожары, вызванные воздействием огненного шара	Возможно возникновение локальных очагов возгорания	Локальные в окрестностях кратера	Локальные в окрестностях кратера	На расстоянии сотен километров от места удара	Глобальные пожары; глобальный огненный шторм
Стратосферная пыль, снижающая освещенность поверхности Земли	Нет	Количество пыли незначительно	Количество пыли меньше катастрофического уровня	Глобальная угроза сельскому хозяйству из-за летних заморозков	Глобальная ночь. Жестокая многолетняя «ядерная зима»
Землетрясение	Нет	Локальное	Локальное	Средней степени разрушения на расстоянии сотен километров от места удара	Умеренные и средней степени разрушения по всему земному шару
Цунами	Нет	Сопоставимы с последствиями наблюдавшихся в истории цунами	Сопоставимы с последствиями наблюдавшихся в истории цунами	Океанические побережья затоплены на несколько десятков километров в глубину суши	Океанические побережья затоплены на несколько сотен километров в глубину суши
Социальные последствия					
Количество «прямых» жертв	Несколько сотен тысяч	Несколько миллионов	Несколько десятков миллионов	Несколько сотен миллионов	Практически все население Земли
Масштаб социальных последствий	Последствия отсутствуют или сопоставимы с последствиями паводков, ураганов, землетрясений	Локальный: опустошение небольшой страны	Региональный: опустошение континента или побережья отдельного океана	Глобальный: угроза гибели современной цивилизации	Глобальный: массовое вымирание растений и животных. Возможна гибель вида Homo sapiens

ны) к региональным (в масштабах континента) последствиям импактного события может произойти при его энергии свыше 10<sup>3</sup> Мт. Переход от региональных к глобальным последствиям произойдет при энергии импакта более 10<sup>5</sup> Мт. Эти события могут быть вызваны столкновением Земли с космическими телами диаметром около 0,3 и 1 км соответственно. В первом случае возникнет кратер диаметром 5–10 км и глубиной до 1 км, во втором – кратер диаметром 20–25 км и глубиной 1,5–2 км.

В обоих случаях прямое попадание ударника в геологическое хранилище спо-

собно вызвать полное его разрушение с дисперсией содержимого. Так, согласно работе [4], наземный ядерный взрыв мощностью 10 Мт приведет к подъему радиоактивной пыли в стратосферу (высота подъема не менее 24 км) и ее рассеиванию на территории площадью в несколько десятков тысяч км<sup>2</sup>. Для сопоставления: площадь разрушений при импактном событии такой энергии составит приблизительно 2000 км<sup>2</sup> [21]. Поэтому при энергиях импактных событий до 10<sup>5</sup> Мт их радиологические последствия могут оказаться транснациональными и даже трансконтиненталь-

ными, в то время как экологические и социальные последствия проявятся в масштабах отдельной страны или части континента.

### Сценарии и вероятность воздействия импактных событий на геологическое хранилище РАО

Обобщение данных о частоте проявления импактных событий и характере их воздействия на геологическую среду позволяет определить несколько сценариев воздействия указанных событий на долговременную безопасность геологического хранилища. Указанные сценарии отличаются масштабом радиологических последствий. Параметры сценариев (вероятность реализации, масштаб) определяются не только ключевыми характеристиками импактных событий (их вероятность и энергия), но и общей активностью РАО в хранилище, глубиной размещения упаковок отходов, проектными решениями системы инженерных барьеров в отношении сейсмоустойчивости, механическими свойствами вмещающей хранилище геологической формации, т. е. концепцией системы захоронения.

В зависимости от удаления хранилища относительно центра кратера (рис. 4) возможна реализация следующих сценариев влияния импактного события:

- **сценарий 1:** минимальные радиологические последствия или их отсутствие;
- **сценарий 2:** локальные радиологические последствия, сопоставимые со сценариями непреднамеренного вмешательства;
- **сценарий 3:** глобальные радиологические последствия, многократно превышающие последствия Чернобыльской катастрофы.

В табл. 3 приводится более детальное описание указанных сценариев.

Для оценки вероятности реализации того или иного сценария был использован ряд предположений, а также некоторые эмпирические зависимости, следующие из обобщения информации, представленной в предыдущих разделах.

Предполагается, что геологическое хранилище будет расположено на глубине 500 м. Это позволяет установить предельные размеры кратеров, образование кото-

рых может привести к реализации определенного сценария (рис. 5). При этом учитывались также особенности воздействия импакта на геологическую среду и эмпирические зависимости глубины кратера, размеров зоны подкратерных разломов и зоны потенциального сейсмического влияния импакта от диаметра кратера (рис. 4). К примеру, при выбранной глубине размещения хранилища сценарий 3 (экскавация содержимого хранилища) возможен при формировании кратера диаметром около 2 км и более, так как для таких размеров кратера его глубина составит приблизительно 0,3 диаметра. Сценарий 2 (разрушение инженерных барьеров подкратерными разломами) будет реализован при образовании кратера диаметром 0,5 км и более, поскольку глубина проникновения разломов приблизительно равна диаметру кратера. Для сценария 1 сложно обоснованно определить минимально значимый диаметр кратера в силу относительно слабого воздействия сейсмического толчка на хранилище (в расчетах вероятности эта величина принималась равной 0,2 км).

Предполагается, что геологическое хранилище будет расположено в кристаллических породах. Эти породы, по сравнению с другими типами потенциальных вмещающих пород (глины, соли), обладают повышенной уязвимостью в отношении индуцированных импактом хрупких деформаций (сценарий 2). Деформации в солях и глинах будут иметь преимущественно пластический характер, а возникшие разломы и трещины будут относительно быстро залечены. Поэтому предположение о захоронении РАО в кристаллических породах увеличивает консервативность оценок влияния импактного события на безопасность геологического хранилища.

Вероятность ( $P_{c_i}$ ) сценария  $c_i$  может быть оценена по формуле:

$$P_{c_i} = \sum_n P_n \frac{S_{n,c_i}}{S},$$

где  $n$  – диапазон диаметров кратеров;  $P_n$  – средняя для Земли вероятность образования кратера в данном диапазоне диаметров;  $S_{n,c_i}$  – площадь зоны проявления сценария  $c_i$ ;  $S$  – площадь земной поверхности.

Использованные для оценок относительные размеры зон проявления сценариев указаны на рис. 4. При этом считалось, что кратерообразующие тела не будут попадать в одну точку поверхности Земли. Результаты расчета вероятности реализации различных сценариев представлены в табл. 4. Максимальная и минимальная оценки вероятности получены из предположения, что размер всех кратеров данного диапазона является соответственно максимальным или минимальным.

При оценке вероятностей сценариев не рассматривались импактные события с энергией свыше  $10^5$  Мт (диаметр кратера более 25 км), так как для подобных событий нерадиологические последствия практически однозначно будут превышать радиологические (см. предыдущий раздел).

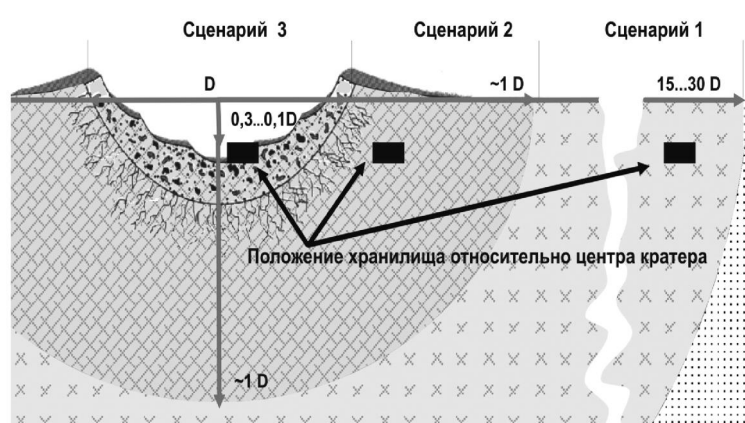


Рис. 4. К определению сценариев предполагаемого влияния импактного события на систему захоронения РАО. Здесь D – диаметр кратера

Основные неопределенности оценки вероятностей сценариев связаны с неопределенностью исходных данных. Оценки количества кратеров выполнены на основании наблюдения лишенной атмосферы Луны. Земная атмосфера может существенно уменьшить воздействие на поверхность тел малого диаметра и кометных ядер.

Таблица 3. Сценарии последствий влияния импактного события на безопасность геологического хранилища

Сценарий	Факторы воздействия	Влияние на функции безопасности барьеров хранилища	Радиологически значимые процессы
1 – минимальные последствия	Сейсмический толчок, формирование зон повышенной трещиноватости, возможно увеличение гидравлического градиента и формирование новой зоны разгрузки подземных вод (кратер)	Незначительное нарушение изолирующей и удерживающей функций природных барьеров. Инженерные барьеры сохраняют целостность	Незначительное ускорение и сокращение путей миграции радионуклидов за счет влияния возможных зон повышенной трещиноватости пород и изменившегося режима движения подземных вод (влияние кратера)
2 – локальные последствия	Те же. Дополнительно: формирование разломов, пересекающих хранилище; формирование термальной аномалии; возможно – возникновение гидротермальной деятельности	Полное нарушение изолирующей функции природных и инженерных барьеров, существенное снижение удерживающих свойств природных барьеров	Ускоренная мобилизация радионуклидов за счет возросшего притока обогащенных кислородом (возможно нагретых) подземных вод через разрушенные инженерные барьеры. Существенное ускорение и сокращение путей миграции радионуклидов по возникшим разломным зонам. В долгосрочной перспективе – изменение состава критической группы населения вследствие последующего хозяйственного освоения территории импакта
3 – глобальные последствия	Взрывная экскавация содержимого хранилища	Полное нарушение функций безопасности всех барьеров	Выброс радионуклидов в атмосферу, рассеивание радионуклидов на значительной территории. Сценарии облучения населения как при глобальной ядерной аварии или при воздействии радиоактивных осадков, являющихся следствием глобальной ядерной войны

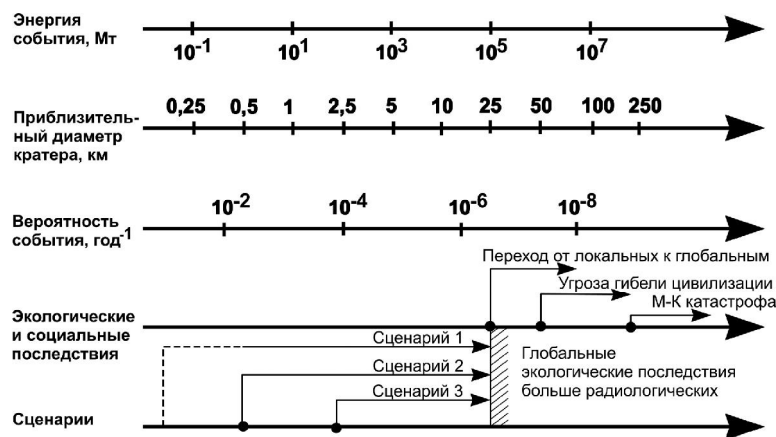


Рис. 5. Исходные данные и граничные условия для оценки вероятностей сценариев предполагаемого влияния импактного события на систему захоронения РАО. Примерная корреляция между верхними шкалами установлена на основании работ [13, 33]. Вероятность импактного события (центральная шкала) определена в целом для Земли. М-К катастрофа – импактное событие, которое произошло 65 млн лет назад на рубеже мезозоя и кайнозоя и привело к вымиранию динозавров

Скорее всего, импактные события в диапазоне энергий  $10^{-1} - 10^1$  Мт, которые могут привести к возникновению кратеров диаметром 0,2–1 км (рис. 5), следует относить к переходному классу. Характер эффектов будет определяться вещественным составом и плотностью космического тела. В

этом энергетическом диапазоне событие может проявиться как вспышка света, атмосферный взрыв [35], привести к образованию ударного кратера (для тел диаметром 0,5...20–30 м) [10] или к формированию взрывного кратера. Вероятно, минимальный размер взрывного кратера составит около 500 м (или даже 1000 м), а минимальный размер соответствующего космического тела 30 (50) и более метров. Другими словами, характер воздействия импакта на поверхность Земли и геологическую среду для данного энергетического класса является труднопрогнозируемым. К примеру, энергии падения

Аризонского метеорита и Тунгусского феномена (взрыв кометного ядра) сопоставимы по порядку величины (примерно 10 Мт). Падение Аризонского метеорита привело к образованию 1,2 км кратера. Вследствие Тунгусского события была лишь уничтожена тайга на площади около 2000 км<sup>2</sup> и не оста-

Таблица 4. Вероятность сценариев воздействия импактного события на безопасность геологического хранилища и основные характеристики соответствующего импактного события

Вероятность реализации сценария				
Диаметр кратера, км	Количество кратеров за 1 млн лет	Вероятность, год <sup>-1</sup>		
		Сценарий 3	Сценарий 2	Сценарий 1
0,2... 0,5 (*)	67000 (*)	0	0	$9,2 \cdot 10^{-10} \dots 5,8 \cdot 10^{-9} (?)$
0,5... 1,0	2700	0	$2,3 \dots 9,3 \cdot 10^{-12}$	$2,3 \dots 9,3 \cdot 10^{-10}$
1,0... 2,0	260	0	$9,0 \cdot 10^{-13} \dots 3,6 \cdot 10^{-12}$	$9,0 \cdot 10^{-11} \dots 3,6 \cdot 10^{-10}$
2,0... 5,0	32	$1,9 \cdot 10^{-13} \dots 1,2 \cdot 10^{-12}$	$4,4 \cdot 10^{-13} \dots 2,7 \cdot 10^{-12}$	$4,4 \cdot 10^{-11} \dots 2,7 \cdot 10^{-10}$
5,0... 10,0	4,8	$1,9 \dots 7,4 \cdot 10^{-13}$	$4,2 \cdot 10^{-13} \dots 1,6 \cdot 10^{-12}$	$4,2 \cdot 10^{-11} \dots 1,6 \cdot 10^{-10}$
10,0... 25,0	2,7	$4,1 \cdot 10^{-13} \dots 2,6 \cdot 10^{-12}$	$9,3 \cdot 10^{-13} \dots 5,8 \cdot 10^{-12}$	$9,3 \cdot 10^{-11} \dots 5,8 \cdot 10^{-10}$
Характеристика соответствующего сценария импактного события				
Радиологические последствия	Глобальные	Локальные	Минимальные	
Суммарная вероятность реализации сценария (с учетом кратеров всех диаметров), год <sup>-1</sup>	$7,9 \cdot 10^{-13} \dots 4,5 \cdot 10^{-12}$	$5,0 \cdot 10^{-12} \dots 2,3 \cdot 10^{-11}$	$1,4 \dots 8,1 \cdot 10^{-0}$	
Энергия события, Мт	$10^2 \dots 10^5$	$10^1 \dots 10^5$	$10^{-1} (?) \dots 10^5 (*)$	
Приблизительный диаметр кратера, км	Более 2	Более 0,5	Более 0,2 (?)	

\* Количество кратеров определено по лунным данным. Из-за наличия атмосферы равное количество соударений Земли и Луны с космическими телами того же размера приведет к образованию на Земле меньшего количества кратеров в данном диапазоне диаметров (см. также пояснения в тексте).

лось заметных следов его влияния на геологическую среду. Исходя из этих соображений, количество кратеров диаметром от 0,2 до 1,0 км (табл. 4) определялось путем экстраполяции кривой, определяющейкумулятивное количество кратеров разного диаметра, сформировавшихся в течение 10 млн лет (рис. 1).

Анализ полученных результатов (табл. 4) показывает, что вероятность реализации сценариев воздействия импакта на геологическое хранилище ( $10^{-12}$  ...  $10^{-8}$  год<sup>-1</sup>) значительно ниже нормативных требований в отношении предельной частоты исходных событий (более  $10^{-6}$  год<sup>-1</sup>), которые должны учитываться в анализе безопасности. Однако эти оценки получены для усредненных данных по величине потока кратерообразующих тел – без учета периодических и нерегулярных пиков кратерообразования. Учет этих пиков приведет к увеличению вероятности на 3 порядка (см. раздел 2). Это означает, что сценарий 1 следовало бы рассматривать в рамках выполнения анализа безопасности. Однако радиологические последствия этого сценария будут, скорее всего, незначительными. Более того, они могут быть эффективно предотвращены проектными решениями в отношении повышения сейсмоустойчивости конструкции хранилища, что следует учитывать при его проектировании.

Сценарии 2 и особенно 3 могут привести к превышению установленных законодательством доз и рисков облучения при вероятности ниже  $10^{-6}$  год<sup>-1</sup> (даже с учетом периодических и нерегулярных пиков кратерообразования). Можно представить теоретическую возможность минимизации последствий сценария 2 (эвакуация населения, геотехнические мероприятия). Минимизировать (и особенно локализовать) последствия сценария 3 весьма сложно (примером являются последствия Чернобыльской катастрофы). Однако существуют способы снизить вероятность сценария путем увеличения глубины размещения отходов или при выборе площадки в полярных широтах (при соответствующем географическом положении страны). Так, при увеличении глубины хранилища от 100 до 1000 м вероятность реализации сценария 3 уменьшится приблизительно в 3 раза. В 2 раза

снизится вероятность сценария и при размещении хранилища в высоких широтах. В любом случае вопрос – следует или нет рассматривать сценарии 2 и 3 при выполнении анализа безопасности – требует дополнительного изучения и обсуждения.

Необходимо также отметить, что поверхностные радиационно-опасные объекты (АЭС, предприятия по обогащению урана, промежуточные хранилища отработавшего ядерного топлива, заводы по переработке ядерного топлива, исследовательские реакторы и др.) являются гораздо более уязвимыми при импактном событии по сравнению с геологическим хранилищем. Они могут быть разрушены при падении любого космического тела, способного достичь земной поверхности, или даже при его атмосферном взрыве. Поэтому вероятность реализации сценария глобальных радиологических последствий импактного события на поверхностные объекты будет значительно выше, чем для геологического хранилища.

## Выводы

На основании изложенного можно утверждать следующее.

Существует энергетический диапазон импактных событий ( $10^2$ ... $10^5$  Мт), воздействие которых на геологическое хранилище может привести к радиологическим последствиям, которые проявятся на более обширных территориях, чем нерадиологические. Особенно, если геологическое хранилище будет размещено на малозаселенной территории, удаленной от океанических побережий. Вероятность реализации такого сценария невелика и составляет  $10^{-10}$ ... $10^{-9}$  год<sup>-1</sup> (консервативная оценка с учетом роста потока кратерообразующих тел на 3 порядка событий за счет периодической и нерегулярной составляющих). Однако этот сценарий может привести к значительному превышению установленных нормами радиационной безопасности уровней приемлемого риска. Поэтому, следуя формально требованиям национальных нормативных документов, он должен рассматриваться в анализе безопасности геологического хранилища.

Основные неопределенности в оценке вероятностей и сценариев воздействия импакт-

ных событий на безопасность связаны с неопределенностями оценки вероятности исходных событий, а также с влиянием атмосферы Земли на космические тела малого размера.

Конечно, если на территории страны произойдет импактное событие с энергией  $10^2 \dots 10^5$  Мт, одним из следствий которого будет разрушение геологического хранилища, то для такой страны прямые жертвы среди населения и экономический ущерб от воздействия огненного шара, воздушной ударной волны и сейсмических толчков однозначно превысят возможный ущерб от дополнительного облучения. Однако следует помнить, что восстановление экосистем на пострадавшей от импакта территории произойдет в течение нескольких десятков лет, а в случае дополнительного ее загрязнения радионуклидами она может быть выведена из использования на сотни и тысячи лет.

Снижение вероятности разрушения геологических хранилищ может быть достигнуто путем:

- размещения этих объектов в относительно безопасных регионах (полярные широты и незаселенные территории);

- создания международных хранилищ (это позволит увеличить глубину размещения отходов за счет привлечения средств нескольких наций, а также уменьшить площадь "мишени" за счет минимизации количества хранилищ);

- сокращения срока промежуточного хранения наиболее опасных РАО в поверхностных хранилищах перед их захоронением в геологическом хранилище.

В заключение хотелось бы отметить следующее.

При приоритете национальной безопасности отдельно взятой страны, принимающей решения о создании радиационно-опасных объектов, можно согласиться с исключением импактных событий из рассмотрения при выполнении анализа безопасности. Мотивация – прямой ущерб превысит ущерб радиологический. Ситуация может измениться, если во главу угла поставить приоритет глобальной безопасности современной цивилизации и оценивать возможный ущерб именно с позиции "выживания" цивилизации, т. е. не в масштабе страны, а в масштабах региона, континента или земного шара.

При этом возникает несколько достаточно острых этических вопросов. В какой мере нации, развивающие ядерную энергетику, ответственны за возможный трансграничный ядерный ущерб, сопутствующий импактным событиям? Должны ли эти нации расходовать ресурсы на мероприятия по снижению возможного ядерного ущерба импактного события при условии, что сама нация может быть уничтожена?

## Список литературы

1. Вальтер А. А., Финкель Л. С. Проблема периодичности метеоритной бомбардировки Земли // Астрон. вестн. – 1996. – Т. 30, № 1. – С. 37–42.
2. Вимоги до вибору майданчика для розміщення сховища для захоронення радіоактивних відходів. – Наказ ДКЯРУ від 14.11.2008 № 188.
3. Геология астроблем. – Л.: Недра, 1980. – 231 с.
4. Действие ядерного оружия. – М.: Воениздат, 1965. – 680 с.
5. Лустынский В. Последствия падения на Землю крупных астероидов. – 1999. – <http://www.meteorite.narod.ru/proba/stati/stati58.htm>.
6. Рябенко В. А., Вальтер А. А., Гуров Е. П. и др. Геология и петрология взрывных метеоритных кратеров. – Киев: Наук. думка, 1982. – 228 с.
7. Фельдман В. И. Астроблемы – звездные раны Земли // Соросовский образоват. журн. – 1999. – № 9. – С. 67–74.
8. Шевченко В. В. Диффузные структуры на Луне как следы кометного ливня // Астрон. вестн. – 1996. – Т. 30, № 1. – С. 59–73.
9. Шейдеггер А. Е. Физические аспекты природных катастроф. – М.: Недра, 1981. – 232 с.
10. Шустов Б., Рихлова Л. Астероїдно-кометна небезпека: нові підходи // Світогляд. – 2010. – № 1. – С. 26–31.
11. Abbot D. H., Isley A. E. Extraterrestrial influences on mantle plume activity // Earth Planet sci. Lett. – 2002. – Vol. 205. – P. 53–62.
12. Alvarez W., Muller R. A. Evidence from crater ages for periodic impacts on the Earth // Nature. – 1984. – Vol. 308. – P. 718–720.
13. Chapman C. R., Durda D. D., Gold R. E. The Comet/Asteroid Impact Hazard: A Systems Approach. – SwRI White Paper. – 2001. – [www.boulder.swri.edu/clark/neowp.html](http://www.boulder.swri.edu/clark/neowp.html).

14. *Cockell C. S., Lee P.* The Biology Of Impact Craters – A Review. – Cambridge Philosophical Society, Biol. Rev. – 2002. – Vol. 77. – P. 279–310.
15. *Delsemme A. H.* Cometary evidence for a solar companion? // The Galaxy and the Solar System. – Tucson: Univ. Arizona Press, 1986. – P. 173–203.
16. *Devis M., Hut P., Muller R. A.* Extinction of species by periodic comet showers // Nature. – 1984. – Vol. 308. – P. 715–718.
17. *DOC.20041108.0002:* Features, Events and Processes: Disruptive Events. – USA, Las Vegas: Bechtel SAIC Company, 2004. – 195 p.
18. *Durrheim R. J., Reimold W. U.* Evidence For 36 M.Y. And 90 M.Y. Periodicities In The Terrestrial Cratering Record. // Lunar and Planetary Science Conf. Abstracts. – 1987. – Vol. 18. – P. 250–251.
19. *Features, Events and Processes (FEPs) for Geologic Disposal of Radioactive Waste.* – NEA/OECD, Paris, 2000. – 89 p.
20. *Gault D. E., Horz F., Hartung G. B.* Effects On Microcratering On The Lunar Surface // Shock Metamorphism Of Natural Materials. – Baltimore, 1968. – P. 87–99.
21. *Paine M.* Tsunami from Asteroid/Comet Impacts. – <http://users.tpg.com.au/users/tps-seti/spacegd7.html#steel>.
22. *IAEA-TRS No.413.* Scientific and Technological Basis for the Geological Disposal of Radioactive Waste. – IAEA, Vienna, 2003. – 80 p.
23. *Ivanov B. A., Melosh H. J.* Large Scale Impacts And Triggered Volcanism. – 2003. – <http://www.lpi.usra.edu/meetings/largeimpacts2003/pdf/4062.pdf>.
24. *Melosh H. J.* Impact Cratering: A Geologic Process. – N.-Y.: Oxford University Press, 1989. – 245 p.
25. *Muller R. A., Hut P., Davis M., Alvarez W.* Cometary showers and unseen solar companions (reply) // Nature. – 1984. – Vol. 312. – 381 p.
26. *Rampino M. R., Caldeira K.* Episodes Of Terrestrial Geologic Activity During The Past 260 Million Years: A Quantitative Approach // Celestial Mechanics and Dynamical Astronomy. – 1992. – Vol. 54, no. 1–3. – P. 143–159.
27. *Rogers G. C.* Oceanic Plateaus As Meteorite Impact Signatures // Nature. – 1982. – Vol. 299. – P. 341–342.
28. *Safety assessment methodologies for near surface disposal facilities* // IAEA, Vienna. – 2004. – Vol. 1. – 408 p.
29. *Shiga D.* China And US At Highest Risk Of Damage From Asteroids. – 2007. – <http://space.newscientist.com/article/dn11467-china-and-us-at-highest-risk-of-damage-from-asteroids.html>.
30. *Shoemaker E. M., Weissman P. R., Shoemaker C. S.* The Flux Of Periodic Comets Near Earth // Hazards Due To Comets And Asteroids / Ed. Gehrels T. Tucson. – London, Univ. Arizona Press, 1994. – P. 313–335.
31. *Shoemaker E. M., Wolfe R. F., Shoemaker C. S.* Asteroid And Comet Flux In The Neighborhood Of Earth // Global catastrophes in Earth history / Eds Sharpton V.L., Ward P.D. // Geol. Soc. of America Special Paper. – 1990. – Vol. 247. – P. 155–170.
32. *Thackrey S. N. D., Walkden G. M., Dunn G.* Geological Aspects Of Terrestrial Impact Cratering Rates: Simulating The Processes And Effect Of Crater Removal. – 2006. – <http://cluster.esa.int/science-e/www/object/doc.cfm?fojectid=40224>.
33. *Toon O. W., Zahnle K., Morrison D., Turco R. P. & Covey C.* Environmental Perturbations Caused by the Impacts of Asteroids and Comets // Reviews of Geophysics. – 1997. – Vol. 35. – P. 41–78.
34. *TR-06-20:* FEP report for the safety assessment SR-Can. – Sweden, Stockholm, SKB, 2006. – 232 p.
35. *Workshop on Near Earth Objects: Risks, Policies and Actions: Final Report* // OECD Global Science Forum, Frascati, Italy, January 20–22, 2003. – [www.oecd.org/dataoecd/39/40/2503992.pdf](http://www.oecd.org/dataoecd/39/40/2503992.pdf).

НИЦ РПИ НАН України,  
Київ  
E-mail: shybetsky@hydrosafe.kiev.ua

Статья поступила  
26.07.12