



УДК: 504.064.3

DOI: 10.26277/SECNRS.2022.106.4.004

© 2022. Все права защищены.

УЧЕТ ТЕХНОГЕННЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ ПРИ АНАЛИЗЕ БЕЗОПАСНОСТИ ПЛОЩАДОК АЭС

Кишкина С. Б.*,**, канд. физ.-мат. наук (kishkina@secnrs.ru),
Бугаев Е. Г.* д-р техн. наук (bugaev@secnrs.ru),
Лободенко И. Ю.*, канд. геол.-минерал. наук (lobodenko@secnrs.ru)

Статья поступила в редакцию 29 ноября 2022 г.

Аннотация

В статье представлен краткий обзор современных данных о техногенной сейсмичности. Прежде всего речь идет о достаточно крупных землетрясениях, появление которых способно изменить оценку безопасности площадки АЭС. Основное внимание уделено оценке возможного расстояния от места проведения работ по добыче полезных ископаемых или глубокого подземного объекта до АЭС и оценке глубины потенциального источника (разлома). Полученные параметры могут быть использованы для учета возможности возникновения техногенных землетрясений при оценке безопасности площадок АЭС.

Рассмотрены подходы к анализу техногенных землетрясений в российских и международных нормативных документах, в том числе планируемых к изданию. Главным образом это могут быть триггерные события, основную роль в возникновении которых играет наличие тектонической нагрузки в массиве, а техногенное воздействие является лишь инициирующим механизмом. Для получения объективных оценок сейсмической безопасности АЭС в случае крупных техногенных землетрясений достаточно использовать все накопленные знания и достижения, разработанные для естественной сейсмичности, принимая во внимание области расположения предприятий или инженерных объектов, которые могут стать потенциальными инициаторами таких событий.

► **Ключевые слова:** безопасность АЭС, площадка АЭС, сейсмичность, техногенное землетрясение, разлом.

* Федеральное бюджетное учреждение «Научно-технический центр по ядерной и радиационной безопасности», Москва, Россия.

** Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт динамики геосфер Российской академии наук имени академика М. А. Садовского (ИДГ РАН), Москва, Россия.

ACCOUNTING OF TECHNOGENIC EARTHQUAKES IN THE NPP SITE SAFETY ANALYSIS

Kishkina S. B.*,**, Ph. D.,
Bugayev E. G.*, D. Sc.,
Lobodenko I. Yu.*, Ph. D.

Article is received on November 29, 2022

Abstract

A brief overview of current data on technogenic seismicity is presented in the paper. First of all, this refers to moderate and strong earthquakes, which occurrence can change the safety assessment of the NPP site. The main attention is paid to the assessment of the possible distance from the potential source of technogenic earthquake and the assessment of its depth. The obtained parameters can be used to assess the safety of NPP sites in the vicinity of which mining operations are underway or planned, construction of a deep underground facility is possible, etc. Approaches to the analysis of technogenic earthquakes in Russian and IAEA safety standards, including those planned for publication, are considered.

The results of the review indicate the need to take into account and assess the possibility of large technogenic earthquakes during NPP site safety analysis. These can be trigger events, a leading part in their occurrence is played by the presence of tectonic load in the array, and technogenic impact is only an initiating mechanism. Based on the current trends, to obtain the seismic safety of NPP objective assessments in case of large technogenic earthquakes, it is sufficient to use all the accumulated knowledge and achievements developed for natural seismicity, taking into account the areas of the location of enterprises or engineering facilities that can become potential initiators of such events.

► **Keywords:** *NPP safety, NPP site, seismicity, technogenic earthquake, fault.*

* Scientific and Engineering Centre for Nuclear and Radiation Safety, Moscow, Russia.

** Sadovsky Institute of Geosphere Dynamics, Russian Academy of Sciences (IDG RAS), Moscow, Russia.

Введение

На современной стадии развития человечество тесно связано с огромными масштабами добычи энергии и, соответственно, с активным вмешательством в геологическую среду. Причем в таких масштабах, которые требуют доступа к глубоким и труднодоступным залежам. При этом увеличиваются не только извлекаемые объемы полезных ископаемых, но и все риски, связанные с добычей. Одна из существенных проблем – возникновение или рост уже существующего уровня сейсмичности в районе проведения работ.

Крупные энергетические проекты часто обеспечиваются системами мониторинга, и с развитием цифровой техники возможности таких систем существенно выросли. В результате за последние 20–30 лет в мире был получен огромный объем новых данных о техногенных землетрясениях. При этом все больше размывается грань между источниками техногенных и природных тектонических землетрясений.

В российской практике при проведении инженерных изысканий и исследований района и площадки размещения АЭС требуется рассматривать землетрясение любого генезиса, как природного, так и техногенного, вызванного деятельностью человека и способного оказать влияние на безопасность АЭС (п. 2.1 НП-064-17 [1]). В проекте АЭС должен быть выполнен анализ влияния на безопасность АЭС взаимосвязанных или взаимообусловленных процессов и явлений природного и техногенного происхождения (п. 2.9 и приложение № 4 к НП-064-17 [1]). Например: активизация геодинамической и сейсмической активности, проявления деформаций поверхности земли, землетрясений и наведенной сейсмичности, связанных с откачиванием нефти, газа, добычей полезных ископаемых, в том числе угля, каменной соли, закачиванием промышленных отходов и заполнением водохранилищ, быстрым сбросом воды в водохранилищах и т. п.

В работе представлен краткий обзор современных данных о техногенной сейсмичности и сделаны выводы о необходимости более подробного учета возможности появления таких событий при анализе безопасности площадок АЭС.

Коротко о техногенных землетрясениях

В последние десятилетия техногенную сейсмичность разделяют на наведенную (возбужденную, индуцированную) сейсмичность, которая возникает

в результате техногенной деятельности человека, и триггерную (иницированную), когда деятельность человека служит лишь спусковым механизмом (триггером) для землетрясения, которое уже «подготовлено» природой. В первом случае основную роль в возможности возникновения сейсмического события играет именно человеческая деятельность, которая явилась причиной существенного изменения напряжений или энергии. Тогда как во втором случае основную роль играет наличие тектонической нагрузки в массиве, а техногенное воздействие является лишь инициирующим механизмом. Например, слабые землетрясения, которые сопровождают во времени и пространстве работы в шахтах, – это наведенные события, в то время как землетрясения, источники которых приурочены к разломным зонам за пределами шахтных полей, – это события триггерные.

В научной литературе используются термины «наведенное» землетрясение, «иницированное или индуцированное», «техногенное», «горно-тектонический удар», «техногенно-тектоническое» [2–4]. Академиком В. В. Адушкиным введен термин «природно-техногенное» землетрясение: подразумевается антропогенная причина возникновения события при естественном источнике энергии деформации [5].

В контексте анализа сейсмической безопасности АЭС нас, в первую очередь, интересуют достаточно сильные события с магнитудами $M \geq 4,5$ –5, способные вызвать разрушения на поверхности и проявляющиеся в современном рельефе поверхности. Оставив нюансы в стороне, будем для них использовать общий термин «техногенное землетрясение», подразумевая, что в той или иной степени к его возникновению причастна человеческая активность. Отметим также, что здесь и далее, если не указана магнитуда конкретного землетрясения, будем использовать общее обозначение M , поскольку разница между разными категориями магнитуд в свете темы статьи для нас несущественна.

В 2018 г. была опубликована база данных [6], содержащая информацию о более 700 землетрясений с магнитудами от $M \sim 2$ до $M 7,3$, которые, как предполагается, были вызваны антропогенной деятельностью. При этом очаги некоторых из них расположены на весьма значительной глубине – от 3 до 20 км, то есть практически вне зоны интенсивного антропогенного воздействия. База охватывает период с 1868 по 2016 гг. Авторы [6] отметили, что в настоящее время невозможно с абсолютной уверенностью определить, какие землетрясения

определенно вызваны деятельностью человека, а какие нет, так что база включает в себя все последовательности землетрясений, которые, как «предполагается на научных основаниях», были вызваны человеком, независимо от достоверности. На сегодняшний день число событий в этом списке, несомненно, увеличилось [7–9 и многие другие].

В качестве инженерной деятельности, которая может быть причастна к появлению землетрясений, в научной литературе фигурируют: формирование водохранилищ, разработка шахт и карьеров, добыча грунтовых вод, газа, нефти и геотермальных жидкостей, закачка жидкости или газа в подземные резервуары (в пласт для утилизации отходов или для повышения нефтеотдачи, гидроразрыв пласта, затопление заброшенных шахт), строительство туннелей, возведение высотных зданий и береговая инженерия. Фактически можно говорить об извлечении материала из недр или обратном процессе, а также о крупных перемещениях материала по земной поверхности. На рис. 1 (по данным [7]) наглядно показано соотношение числа техногенных землетрясений, вызванных или спровоцированных разными видами деятельности человека. В категории «закачка/откачка» жидкости учитывались события, отнесенные к добыче углеводородов, землетрясения на геотермальных источниках, события, связанные с технологией гидроразрыва и пр. В категорию «разное» отнесены события, зарегистрированные при проведении ядерных взрывов, а также слабые землетрясения, которые были искусственно спровоцированы в ходе научных исследований. Хорошо видно, что абсолютное лидерство имеют предприятия по извлечению природных ресурсов: горные работы и работы, связанные с закачкой/откачкой жидкости из недр Земли.

Абсолютное большинство техногенных землетрясений представляет собой сейсмические события с небольшими магнитудами, не превышающими M 4. Но интересующих нас достаточно сильных событий происходит не мало: в уже упоминавшейся базе фигурирует 136 событий с $M \geq 4,5$, в том числе 30 землетрясений с магнитудами $M \geq 5$, из них половина с магнитудой $M > 6$. В качестве иллюстрации на рис. 2 представлен график регистрации техногенных землетрясений, вызванных или спровоцированных разными видами деятельности человека, цветом выделены события, произошедшие на территории России. График составлен по данным [6–10]. Видно, что частота появления техногенных землетрясений растет, что, вероятно, связано с ростом количества предприятий и интенсивности добычи

природных ресурсов, а также с ростом числа систем сейсмического мониторинга по всему миру.

По данным, полученным в последние десятилетия, можно с уверенностью говорить, что сильные техногенные землетрясения приурочены к уже существующим разломам, их очаги могут располагаться как в непосредственной близости от ведущих работ, так и на некотором расстоянии от них; могут происходить со значительными задержками относительно «провоцирующих» действий. Доказательства связи между техногенными землетрясениями и установленными разломами были получены в огромном количестве исследований, как с использованием высокоточных систем наблюдения, так и при оценке непосредственно в очаговых районах [6 и ссылки там, 9, 11–14].

Один из наиболее ярких современных примеров техногенной сейсмичности – повышение уровня сейсмичности в 2009–2015 гг. в среднеконтинентальной части США, связанное с добычей углеводородов [15–17 и др.]. В 1973–2008 гг. в центральных и восточных областях США в среднем происходило 24 сейсмических события в год с магнитудой $M \geq 3$. За следующие пять лет количество таких землетрясений выросло до 193 в год. А в течение только 2014 г. было зарегистрировано 688 землетрясений с магнитудой $M \geq 3$. В Оклахоме и южном Канзасе в 2015 г. сейсмичность $M \geq 3$ увеличилась более чем в 450 раз по сравнению с фоновым уровнем в этом районе [18]. Наряду с общим увеличением количества сейсмических событий произошли и достаточно сильные землетрясения с магнитудами вплоть до M 5,7–5,8. Их возникновение связали именно с добычей углеводородов [16, 18]. Для большинства подобных землетрясений характерна глубина в интервале 2–6 км, а их источники могут быть удалены на десятки километров от скважин [9]. Самое большое на сегодняшний день землетрясение, вызванное инъекцией флюида, имело магнитуду M_w 5,8 (2016 г., Оклахома, США) [9, 19]. В последние годы появились научно обоснованные предположения, что активное бурение нефтяных скважин – которое часто называют «нефтяной бум в районе большого Лос-Анджелеса» – сыграло свою роль в исторических землетрясениях начала XX века в Южной Калифорнии. В том числе стало триггером печально известного землетрясения M 6,4 1933 г. в Лос-Анджелесе [20].

Обзор событий, вызванных гидроразрывом пласта [8] на территории США, Британии, Канады и Китая, показывает, что максимальные магнитуды землетрясений, вызванных такой технологией добычи,

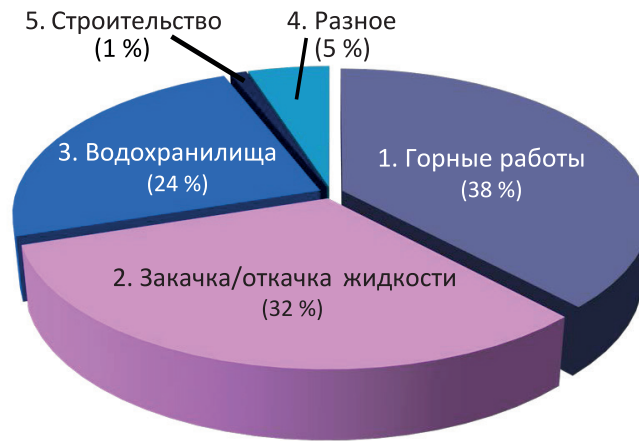


Рис. 1. Соотношение числа техногенных землетрясений, вызванных или спровоцированных разными видами деятельности человека
 [Fig. 1. The ratio of the number of earthquakes triggered or induced by different types of human activity]

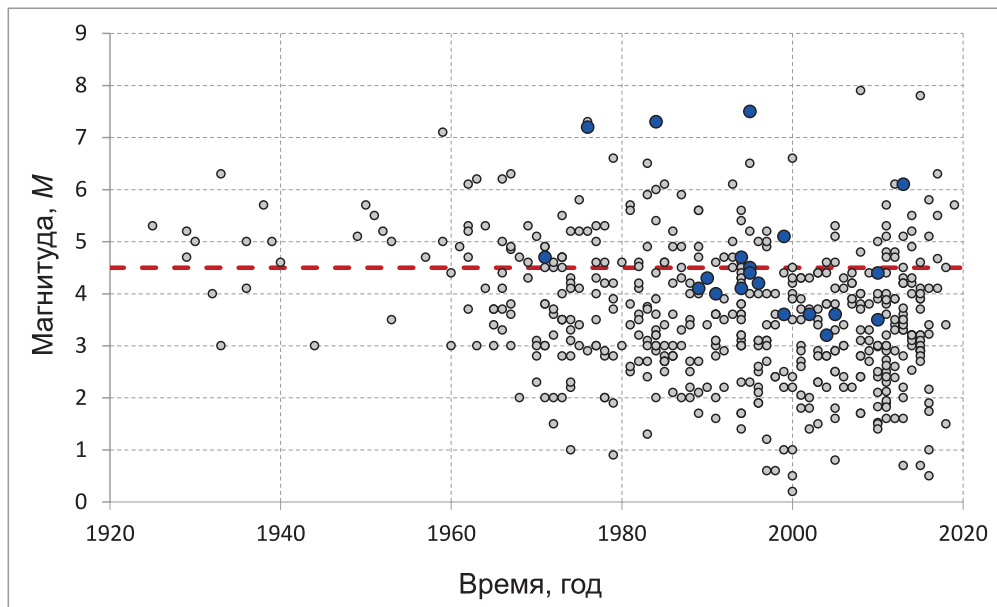


Рис. 2. Техногенные землетрясения, вызванные или спровоцированные разными видами деятельности человека. Синими точками отмечены события, произошедшие на территории России. Красная штриховая линия отмечает величину M 4,5, выбранную нами в качестве уровня «сильных» техногенных землетрясений
 [Fig. 2. Earthquakes triggered or induced by different types of human activity.

The blue dots mark the events that took place on the Russia territory.
 The red dashed line marks the magnitude of 4.5 M , which we have chosen as the lower level of “strong” induced earthquakes]

достигали M 5,7 и происходили в радиусе около 1,5 км от места проведения работ.

В восточной Колумбии, через семь лет после начала масштабного проекта по закачке отработанной жидкости в пласт на двух соседних нефтяных месторождениях Рубиалес (Rubiales) и Кифа (Quifa), значительно возросла сейсмичность [21]: в 2015 г. наблюдалось в среднем шесть событий $M \geq 3$ в день. Землетрясения происходили на расстояниях до 20 км от нагнетательных скважин, постепенно достигая глубин около 10–12 км. Сильные события с магнитудами $M \geq 4$ отмечены на глубине около 1 км

(самым крупным стало землетрясение M 4,5), при этом большинство очагов землетрясений было приурочено к уже известным разломам [21].

В Корее, в районе прибрежного города Пхохан (Pohang), 15.11.2017 произошло землетрясение M_w 5,5: на данный момент это самое крупное землетрясение, связанное с работой геотермальной системы. Очаг располагался на глубине ~ 4 км, на расстоянии около 1 км от нагнетательных скважин. Землетрясение активировало не нанесенный ранее на карту разлом [7].

Землетрясение магнитудой M 6,0, произошедшее 17.06.2019, является крупнейшим событием в Сычуаньском бассейне, который относится к основным ресурсам газа и нефти в Китае. Многие месторождения этого бассейна уже были зарегистрированы как места техногенных сейсмических событий, происходящих на глубинах 3–6 км. До 2019 г. землетрясения не превышали магнитуд M 5,0, но эксперты не исключали появления событий с магнитудой M 6,0. Таким событием и стало землетрясение 17 июня 2019 г., произошедшее на глубине около 4 км, на расстоянии нескольких километров от скважин добычи соли. Разрыв произошел вдоль ранее неизвестного разлома, неоптимально ориентированного относительно регионального поля напряжений. Анализ природы события продолжается, среди наиболее вероятных причин – повышение порового давления из-за предыдущих закачек вод. При этом авторы [10] отметили, что для этого района важной особенностью становятся неглубокие потенциально активные разломы, еще не нанесенные на карту.

Самые сильные техногенные землетрясения, вызванные добычей углеводородов, произошли на территории Советского Союза. Это хорошо известные Газлийские землетрясения (1976 и 1984 гг.) с магнитудой до M 7,2–7,3, природа которых, после долгих споров, признана техногенной (триггерной) [22].

Еще один класс техногенной сейсмичности – это землетрясения, связанные с заполнением водохранилищ [23–25]. Такие события стали появляться в середине прошлого века в связи с активным строительством больших водохранилищ. Сейсмическая активность в период заполнения и эксплуатации крупных водохранилищ зарегистрирована более чем в ста регионах мира [24, 26].

Например, в Замбии, в районе плотины Кариба, два землетрясения $M \sim 6,0$ произошли в сентябре 1963 г. вскоре после того, как водохранилище впервые достигло максимальной глубины. Очаги оцениваются как неглубокие (в каталогах стоит оценка $d < 10$ км) непосредственно под водохранилищем, хотя точного определения глубины нет в связи с недостаточной точностью сейсмических данных.

Самое большое и одно из самых известных событий такого рода было зарегистрировано в Индии: это землетрясение с M 6,5, вызванное заполнением водохранилища на р. Койна (Коуна) в 1967 г. [24]. Этому событию посвящено множество работ, отметим только несколько моментов. До начала строительства плотины район считался асейсмичным. Активность началась сразу после быстрого заполнения водохранилища Койна в 1961 г., это

инициировало установку сейсмических станций, которые стали регистрировать слабые землетрясения в районе плотины. В 1967 г. было зарегистрировано несколько сильных землетрясений с магнитудой до M 5,5, а следом и известное катастрофическое событие с M 6,5. Потом сейсмические события (в том числе и с магнитудами выше M 5) стали распространяться на юг и концентрироваться в районе создающегося водохранилища Варна (1993 г.). Сегодня район Койна–Варна на западе Индии известен как район внутриплитной сейсмичности, где на ограниченной территории площадью приблизительно 500 км² уже около 60 лет регулярно происходят землетрясения с магнитудой более M 4,0 [26]. Очаги фиксируются на расстояниях до 15 км от водохранилищ, на глубине до 13 км; значительная доля сейсмических событий в районе резервуара Варна происходит на глубинах около 2-х км, а вокруг резервуара Койна – на глубине 5–7 км [26]. Реакция среды на изменение уровня воды в водохранилищах меняется во времени: в первые годы усиление сейсмичности фиксировалось при ускорении роста нагрузки (скорости заполнения водохранилища), в марте 2015 г. слабая сейсмичность активизировалась при разгрузке. В районе ведутся сейсмические, геофизические и геодезические измерения, тем не менее вопросы о расположении и строении региональных активных разломов до сих пор остаются. Возможно, что долина р. Койна глубиной в 500–600 м, которая не следует направлению основных геоморфологических структур района, выработана по разломной зоне [24, 26].

Удалось убедительно доказать связь между резким ростом сейсмичности и заполнением водохранилища Нурекской ГЭС. Хотя водохранилище находится в регионе относительно высокой естественной сейсмичности, его влияние было четко задокументировано как выраженное повышение сейсмичности в непосредственной близости от водохранилища, поскольку до начала строительства плотины в течение 15 лет в районе уже велись сейсмические наблюдения [27]. Крупнейшими техногенными землетрясениями в Нуреке были два события M 4,5 (сразу за первым заполнением до уровня 100 м) в 1972 г. Большой всплеск активности был также связан с началом второй стадии заполнения, до 200 м в 1976 г. Землетрясения в Нуреке происходили чаще всего под основным телом водохранилища или вблизи него на глубине менее 8 км.

В Китае, в районе водохранилища Лунтаньской ГЭС (Longtan) глубиной 190 м,

регистрировались землетрясения с магнитудами до $M_L 4,2$ [28].

Одно из самых больших в Бразилии техногенных землетрясений с магнитудой $m_b = 4,2$ произошло менее чем через год после заполнения двух близкорасположенных резервуаров (Porto Colombia & Volta Grande). Причем глубина водохранилищ небольшая: 35 и 37 м [29].

Отметим также заметное землетрясение с магнитудой $M_s 4,7$ (глубина $d = 15$ км), которое было зарегистрировано в районе водохранилища Зейской ГЭС 17.06.2008 (по местному времени ранним утром 18.06.2008). К сожалению, анализа и подробных оценок этого события в литературе нам найти не удалось.

Сейсмичность, вызванная заполнением крупных резервуаров, демонстрирует два типа отклика: почти немедленное проявление (или увеличение уровня) сейсмичности вслед за первым заполнением резервуара и «отложенный» на несколько лет рост числа сейсмических событий [25, 29]. Немедленный отклик на заполнение водохранилища связывают с ростом порового давления в результате роста нагрузки на ложе водохранилища, а отложенный – с диффузией давления поровой жидкости вне водохранилища вдоль разломных зон. При первом типе возникают события небольшой магнитуды, расположенные близко к водохранилищу. Второй тип, как правило, это события, имеющие более высокие магнитуды, их очаги глубже, расположены дальше от водохранилища и приурочены к пересекающим его разломным зонам [30]. Есть оценки, что расстояния, на которых могут быть спровоцированы землетрясения, соизмеримы с протяженностью водохранилища [31].

Известны случаи возникновения сейсмичности при строительстве глубоких тоннелей в скальных породах. Как, например, в ходе строительства тоннеля для гидроэлектростанции Цзиньпин II (Jinping II) в провинции Сычуань, Китай [32–35].

В горном деле техногенные землетрясения чаще всего ассоциируются с подземными горными работами, проводящимися на больших глубинах в массивах со значительной тектонической составляющей поля напряжений. Одно из первых документально подтвержденных крупных ($M_L 5,3$) землетрясений такого рода произошло в Австралии 18.12.1925 [6]. При этом основная масса событий, связываемых с шахтами, это слабые события с магнитудами в диапазоне $M 0–1$, фактически сопровождающие разработку во времени и в пространстве: они продвигаются вслед за фронтом работ [12].

Более заметные землетрясения с магнитудами $M 3–4,5$ тоже происходят достаточно часто. Например, согласно [6], в 2007 г. более 100 шахт в Китае сообщили о сейсмических событиях магнитудой $M > 4,0$. Возникновение таких событий не всегда однозначно сопоставимо с параметрами проведения работ. Такие события могут совпадать с началом или завершением добычи; происходить, когда добыча ведется непрерывно в течение нескольких лет; их число может вырасти, а потом снижаться несмотря на рост добычи и т. д. [36].

В отличие от слабых событий, которые возникают в самой ближней окрестности выработки, более сильные события чаще всего приурочены к уже существующим разломным зонам в окрестности нескольких километров от ведущихся горных работ, а модели механизмов их очагов в абсолютном большинстве случаев представляют собой сдвиг [12, 13, 37].

В работе [37] на примере конфигурации шахты им. Губкина (АО «Комбинат КМАруда») было смоделировано влияние горных выработок, расположенных вблизи разломов, на возможность возникновения крупных сейсмических событий. Результаты подтвердили, что разветвленная сеть выработок в окрестности тектонического разлома может оказать заметное влияние на эффективную жесткость массива и, как следствие, на возможность возникновения динамических подвижек. Показано, что подземные горные работы могут вызвать землетрясение $\sim M 3–4$ даже в сейсмически неактивной зоне из-за изменения упругих свойств вмещающей породы вблизи тектонического разлома. При этом, в случае закладки камер разрушенной породой, вероятность возникновения землетрясения существенно снижается (по сравнению с массивом, содержащим незаполненные выработки).

Землетрясения, ассоциированные с выемкой породы в карьерах, относятся к категории довольно редких проявлений техногенной сейсмичности. Тем не менее самое крупное сейсмическое событие, инициированное горными работами, связано именно с добычей угля открытым способом. Это землетрясение с магнитудой $M_L 6,1$, которое произошло 18.06.2013 в Кузбассе, в непосредственной окрестности Бачатского угольного разреза. По оценкам [39] очаг находился на глубине около 4 км под карьером. Интенсивность колебаний в эпицентральной зоне землетрясения составила $I_0 = 7$ баллов. В 5-балльную зону попали города Кузбасса, землетрясение ощущалось и за пределами Кемеровской области [39].

На примере выработки с параметрами, близкими к размерам Бачатского карьера, в работах [38–41] была проведена количественная оценка изменения в результате выемки породы напряженного состояния на плоскости будущего разрыва техногенного землетрясения, а также рассчитаны изменения поля напряжений в окрестности выемки. В результате аналитического и численного моделирования, а также анализа данных сейсмологических наблюдений было показано, что наиболее вероятным фактором инициирования динамической подвижки в очаге является извлечение и перемещение горной породы из карьера такого масштаба, как Бачатский. При этом важно, что размер зоны, в которой выполняются геомеханические критерии инициирования (близость величины кулоновских напряжений на плоскости разлома к локальному пределу прочности; выполнение условия разупрочнения фрикционного контакта с ростом скорости скольжения и относительного перемещения бортов; выполнение определенного соотношения между жесткостью вмещающего массива и скоростью снижения фрикционного сопротивления), существенно больше критического размера зоны нуклеации для землетрясений с магнитудой $M \sim 6,0$ [41]. Зона нуклеации – это участок, на котором скорость разрыва возрастает до динамического значения, то есть фактически – зона зарождения землетрясения.

В самом общем случае открытые горные работы едва ли могут стать причиной крупного техногенного землетрясения. Они способны только приблизить момент такого события, уже подготовленного естественной эволюцией коры, то есть при сложившихся обстоятельствах (наличие напряженного разлома, региональное поле напряжений, большой размер зоны антропогенного воздействия и пр.) способны послужить спусковым крючком, триггером. Оценки возможности прямого инициирования крупного землетрясения сейсмическими колебаниями от массовых короткозамедленных взрывов продемонстрировали, что такое развитие событий едва ли возможно [41].

Не рассматривая подробно причины возникновения техногенных землетрясений, обобщим только те их параметры, которые известны для уже зарегистрированных событий и могут быть важны при анализе безопасности площадок АЭС.

Для землетрясений, связанных с водохранилищами, максимальные магнитуды достигают $M 6,5$ (Койна) и $M 7,9$ (Веньчуаньское), очаги, как правило, находятся или в непосредственной близости от водохранилища, но могут и располагаться на расстоянии

вплоть до 15–20 км, глубина составляет несколько километров. Время возможного возникновения по отношению к строительству и наполнению водохранилища не определено (во время заполнения, при достижении максимального уровня, при увеличении скорости заполнения, через несколько лет после заполнения, в связи с сезонными вариациями уровня и пр.). Однозначной связи с размерами водохранилища и его глубиной также не выявлено.

Для землетрясений, связанных с подземными горными работами, характерны магнитуды $M \sim 4,5–5,5$. Очаги могут располагаться на глубинах до 4–9 км, на удалении нескольких километров от места проведения работ. Время возникновения не определено. Однозначной связи с параметрами разработки месторождений (толщина вскрышных пород, рельеф поверхности, геологическая сложность, прочность пород, планы и методы разработки, скорости извлечения и пр.) не установлено, для каждой шахты оценки должны проводиться индивидуально. К этой же группе можно отнести и события, связанные со строительством глубоких тоннелей.

Продемонстрирована возможность инициирования техногенной деятельностью динамической подвижки по крупному разлому и для открытых горных работ. Самое большое землетрясение, произошедшее в районе Бачатского карьера, имело магнитуду $M 6,0$, очаг определен на глубине 4 км в непосредственной близости от карьера.

Среди событий, связанных с закачкой и откачкой жидкости (к этой категории относятся работы по добыче углеводородов – в том числе путем гидро-разрыва пласта – и все связанные с этим процессы, а также работы на геотермальных месторождениях и пр.), самыми сильными считаются Газлийские землетрясения $M 7,3$. В категорию сильных техногенных событий сейчас относят и землетрясения в Лос-Анджелесе 1933 г. (Лонг Бич, $M_w 6,4$). Очаги находились на удалении не более нескольких километров от скважины, их глубина в среднем находится в интервале 1–5 км.

Практически для всех категорий техногенных землетрясений отмечают и глубины очагов более 10 км, однако степень достоверности таких оценок пока не ясна.

Работы последних десятилетий позволили определить условия, в которых может реализоваться достаточно крупное техногенное землетрясение. Одно из них – наличие напряженной разломной зоны по крайней мере в радиусе нескольких километров от места воздействия [8, 9, 12, 40–41].

Помимо этого, для районов горных работ показано, что скольжение может возникнуть при выполнении определенных соотношений между механическими свойствами разлома и вмещающего массива горных пород [4]. При этом важна вариация напряженного состояния именно в области предполагаемого зарождения разрыва, поскольку размер зоны зарождения разрыва является важнейшим параметром с точки зрения инициирования динамического процесса [4, 41]. В качестве критерия принято оценивать потенциальное изменение величины кулоновских напряжений [9, 10, 41]. Помимо изменения параметров поля напряжений обычно выделяют изменение гидрогеологического режима и изменение порового давления в массиве. Эти параметры играют существенную роль при оценке условий возникновения крупного техногенного события в районе водохранилищ или в районе работ по закачке жидкости [9, 18].

Оценка опасности АЭС и техногенная сейсмичность

Согласно нормативным документам должны быть выявлены/идентифицированы и оценены все потенциальные источники внешних воздействий (НП-064-17, п. 2.1 [1]), в том числе и внешние воздействия, связанные с антропогенным фактором (НП-064-17, п. 2.9 и Приложение № 4 [1]; DS520, п. 2.16 [46]).

При выполнении инженерных изысканий и исследований района и площадки размещения АЭС в пределах платформенной территории рекомендуется выявлять и оценивать характеристики зон вероятных очагов землетрясений (зон возникновения очагов землетрясения) с $M \leq 4,5$ и иметь в виду, что при мелкофокусных (глубина очага менее 5 км) землетрясениях, плейстосейстовая область которых невелика, интенсивность сотрясений может достигать 6–7 баллов на средних грунтах даже при небольших магнитудах. Например, при магнитуде $M 2,0$ и глубине очага 1 км интенсивность в эпицентре может достигать 6 баллов на средних грунтах (РБ-019-18, п. 34 [47]). В пределах платформенной территории отсутствуют представительные статистические данные о землетрясениях, но возможно проявление сильных и ощутимых сейсмических событий. Поэтому оценку долговременной и текущей сейсмической опасности рекомендуется выполнять с учетом геодинамических и сейсмо-тектонических данных согласно рекомендациям РБ-019-18 (разделы V, VII) [47].

В руководстве по технике безопасности DS520 [46] внешние воздействия, связанные с антропогенным фактором, сгруппированы по следующим категориям: внешний выброс опасных материалов, взрывы, пожары, авиакатастрофы и другие внешние транспортные события. Все остальные возможные внешние события, которые могут повлиять на безопасность АЭС и связаны с деятельностью человека, отнесены к категории «другие внешние события». Необходимо заметить, что в этом перечне существует еще одна категория событий, которая заслуживает отдельного упоминания и более подробного обсуждения, – это техногенные землетрясения (Human-induced Earthquakes). В нормативных документах МАГАТЭ (SSG-18 [48], DS520 [46]) упоминается сейсмичность, возникающая в результате строительства водохранилищ (Reservoir-induced Seismicity). В нормах безопасности МАГАТЭ SSR-1 (п. 5.34) [49] указано на необходимость учитывать «деятельность человека, которая может повлиять на тип или степень опасности стихийных бедствий, такая как добыча ресурсов или другие существенные изменения контуров земной поверхности или водоемов, а также сейсмичность, вызванную водохранилищами». Однако это только один вид подобных событий и по статистике известных на сегодня техногенных землетрясений [6], сейсмичность, связанная с водохранилищами, лишь на втором месте среди наиболее распространенных техногенных землетрясений. Первое место среди «антропогенных» причин землетрясений занимает совокупный класс «добыча полезных ископаемых». Именно предприятия по добыче полезных ископаемых распространены практически повсеместно, в отличие от крупных водохранилищ. Так что горные предприятия, а также строительство крупных инженерных объектов (таких как строительство глубоких туннелей, например) также могут оказаться потенциальными источниками техногенной сейсмичности [6, 43 и др.]. Водоохранилище может вызвать как общее повышение сейсмичности в районе его строительства/запуска в эксплуатацию, так и стать причиной достаточно сильного землетрясения с магнитудой вплоть до $M 6,5$. Однако горные работы также способны быть не только причиной повышения слабой сейсмичности непосредственно в районе работ, но и стать триггером достаточно сильного события.

Согласно SSR-1 (пп. 4.12 и 4.13) [49] район/регион, в котором расположена площадка АЭС, должен быть обследован на предмет инженерных объектов или инженерной деятельности, которые потенциально могут представлять угрозу для ядерной

установки в течение всего срока ее службы. В перечень таких инженерных объектов должны входить не только предприятия, способные, например, стать источниками выброса опасных материалов и пожаров, но и предприятия, связанные с добычей полезных ископаемых. Несомненно, наличие крупного нефтехимического объекта, на котором хранится очень большое количество опасных материалов, в случае аварии может потенциально повлиять на большую область. Но помимо этого, нефте- и газодобывающее предприятие может стать причиной техногенного землетрясения, которое или произойдет раньше, чем при естественном развитии геологических процессов, или вовсе будет спровоцировано там, где не должно было бы произойти. Это относится и к предприятиям горной промышленности.

Анализ безопасности площадки АЭС должен быть выполнен с учетом максимальных значений интенсивности и вероятности внешних воздействий и безопасного расстояния источников внешних воздействий от АЭС (НП-064-17, п. 3.3) [1].

Размер исследуемого района/региона должен быть определен для каждой из внешних техногенных опасностей, вызванных деятельностью человека (НП-032-19, раздел V [50]; SSR-1, п. 4.14 [49]). С учетом требований нормативных документов, в случае анализа потенциальной опасности возникновения техногенного землетрясения, это должна быть как минимум территория ближнего района и ближайших окрестностей площадки размещения атомного объекта (НП-032-19, раздел V [50]).

Необходимо учитывать, что с течением времени могут появиться новые предприятия (или инженерные объекты), потенциально способные спровоцировать техногенное землетрясение. Или уже существующие предприятия могут быстро развиваться, расширяя площади воздействия на геологическую среду и повышая риск, который ранее мог быть признан отсутствующим или незначительным. Следовательно, по возможности нужно иметь прогноз потенциального развития региона в течение всего предполагаемого срока службы ядерного объекта. Несомненно, технологии добычи и строительства могут быстро меняться. Соответственно увеличение объемов и интенсивности добычи, глубина и площадь горных выработок, тоннелей и т. п. могут меняться быстрее всех намеченных планов и прогнозов, что может повысить риски возникновения сильных техногенных землетрясений.

Следует также рассмотреть деятельность по гидроразрыву пласта и другие способы добычи

природного газа, поскольку они аналогичны деятельности по добыче полезных ископаемых в том, что могут вызывать колебания грунта, просадку, разрушение грунта (SSR-1, 4.20 [49]). Более того, помимо колебаний и просадки грунта они могут вызвать достаточно значимое землетрясение с магнитудой вплоть до M 6–6,5 и все сопутствующие этому проблемы.

Пример развития сейсмической активности, вызванной технологиями гидроразрыва пласта, приведен на рис. 3. По данным [8] показано сравнение развития естественной и техногенной сейсмичности, приуроченной к крупнейшим нефте- и газодобывающим районам Канады – Дюверне (Duvernay) и Монтни (Montney). Видно, что после 2014 г. рост техногенной сейсмичности становится весьма активным.

В данном случае рисунок носит иллюстративный характер, поскольку здесь фигурируют землетрясения с магнитудами $M_L > 2,0$, а самые сильные зарегистрированные события имели M_w 3,9 (2015 г.), M_w 4,1 (2016 г.) и M_w 3,7 (2019 г.), то есть формально не достигали порога интересующих нас событий. Однако рисунок наглядно демонстрирует, что рост техногенной сейсмичности может происходить достаточно быстро, и это необходимо учитывать при анализе безопасности. Как показывают данные рассмотренных выше работ, при определенных обстоятельствах дальнейшая разработка месторождений может привести и к возникновению сильных событий.

При оценке безопасности площадки следует учитывать не только существующие, но и планируемые размеры карьеров или горных выработок (общая площадь, глубина), увеличение интенсивности добычи углеводородов на существующих предприятиях, оценивать возможное строительство крупных инженерных сооружений. Необходимо учитывать расстояние предприятий от площадки АЭС, наличие/отсутствие слабой сейсмичности в окрестности работ, местоположение и параметры разломных зон в окрестности нескольких километров. Следует оценить, что экономичнее: проводить тщательный анализ наличия и уточнения местоположения потенциальных разломных зон в окрестности предприятия или в ходе анализа считать максимально вероятным наличие неглубокого активного разлома, еще не нанесенного на карту в исследуемом регионе.

Фактически при анализе техногенной сейсмической опасности традиционные алгоритмы могут практически не измениться. Необходимо только

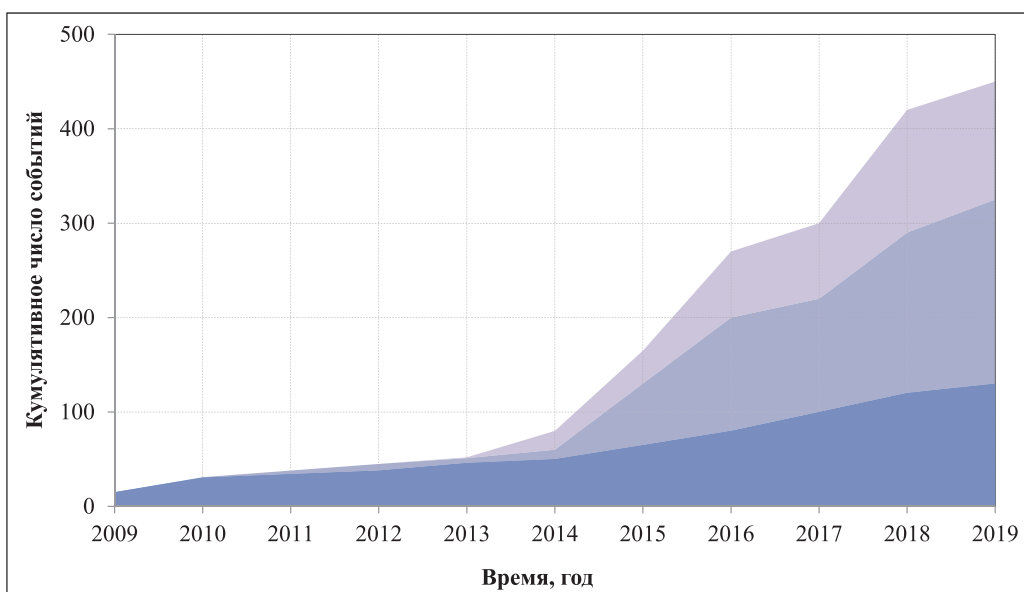


Рис. 3. Рост техногенной сейсмичности по сравнению с фоновым уровнем тектонической сейсмичности в районах сланцевых месторождений Дюверне (1) и Монтни (2), Канада
 [Fig. 3. Growth of technogenic seismicity compared to the background level of tectonic seismicity in the areas of the Duvernay (1) and Montney (2) shale deposits, Canada]

дополнительно учитывать потенциальную опасность разломов, расположенных в зоне ответственности предприятий добычи (обычно это несколько километров от нагнетательной скважины, глубокого тоннеля или шахты, например, и около 10 км от крупного карьера), если такие предприятия находятся в районе расположения АЭС. При этом следует обратить внимание на оценку и частоту максимальной магнитуды $M_{\text{макс}}$. Изменение ее оценки возможно, если в анализ будут включены ранее не рассматриваемые разломные зоны, находящиеся в среднем в радиусе около 10 км от предприятий, или если изменятся оценки периода сильного события, поскольку антропогенное влияние может приблизить срок землетрясения. В остальном оценка потенциального источника техногенного землетрясения, очевидно, ничем не отличается от оценок естественных событий.

Отметим, что практика учета техногенных землетрясений при анализе сейсмической опасности уже существует. Так, например, Геологическая служба США в 2016 г. начала включать учет опасности возникновения техногенных землетрясений в краткосрочные прогнозы [44]. При этом в случае анализа потенциального развития техногенной сейсмичности важно обращать внимание на условия, необходимые для возникновения крупных техногенных событий, и сопоставлять их с реальной обстановкой в исследуемом районе [18, 41]. Результаты такой работы будут гораздо надежнее оценок, основанных на статистике.

Заключение

За последние десятилетия вопросу техногенной сейсмичности стало уделяться много внимания и со стороны специалистов, и со стороны общественности. Растет обеспокоенность по поводу сейсмичности, вызванной деятельностью человека, когда небольшое повышение напряжения приводит к подвижке по тектонически нагруженным разломам. Примеры такой деятельности включают добычу полезных ископаемых, накопление воды, стимулирование геотермальных полей, добычу углеводородов, а также откачку/закачку воды и газа в пласты и подземные резервуары. Благодаря современным системам сейсмических наблюдений, знания о техногенной сейсмичности значительно продвинулись за последние десятилетия.

Закономерности распределения крупных техногенных событий во времени и пространстве пока не ясны, они носят региональный характер, не связанный непосредственно с ведущимися человеком работами, и, по всей видимости, реагируют на общее изменение напряжений в пределах района добычи. Такие события вызваны разрушениями при сдвиге по уже существующему разлому в окрестности нескольких километров от карьера, выработки или скважины, и вплоть до 15–20 км от крупного водохранилища. Большинство техногенных землетрясений не слишком велики: обычно их магнитуды не более $M 4,0$. Однако уже зарегистрированы техногенные землетрясения с магнитудами

M 6–6,5. Причем источники таких событий находятся на небольшой глубине ($d < 5–6$ км), что может вызывать серьезные разрушения, в том числе на поверхности.

Работы последних лет не находят заметных различий ни в механизмах, ни в излучении энергии и, следовательно, в наземных движениях при техногенных и естественных землетрясениях [45]. Большинство авторов склоняется к тому, что фундаментальных различий между техногенными и естественными событиями на сегодняшний день не найдено. Это подтверждается и долгими спорами по поводу природы того или иного крупного события. Например, о техногенной природе Бачатского землетрясения до сих пор встречаются альтернативные мнения. А землетрясения начала XX века в Калифорнии, наоборот, спустя почти столетие получили оценку «техногенные».

Поскольку на сегодняшний день можно принять, что с точки зрения оценки последствий для АЭС принципиальных различий между крупными техногенными и естественными событиями нет, учет возникновения техногенного землетрясения практически не изменит алгоритм оценки сейсмической безопасности площадок АЭС. Но по мере включения в анализ сеймотектонических условий в районах предприятий могут появиться дополнительные/не учитываемые в настоящий момент источники возникновения очагов землетрясения, могут быть изменены характеристики уже известных разломных зон и, соответственно, может быть

изменена/увеличена оценка частоты и/или величины $M_{\text{макс}}$. Существует ли предел максимального размера для техногенных землетрясений, до сих пор не ясно. Вероятнее всего, техногенная сейсмичность не может превышать ожидаемую (вероятную) максимальную величину естественного землетрясения для анализируемого разлома. При этом возможно сокращение сроков возникновения такого события, то есть антропогенная деятельность может ускорить естественные геологические процессы.

Вполне вероятно, что даже протяженные сейсмоактивные разломы в исследуемом регионе могут быть еще не выявлены, но потенциальное существование таких структур в непосредственной близости от крупных предприятий добычи, протяженных тоннелей или от водохранилищ должно предполагаться и учитываться при оценке сейсмической опасности.

Таким образом, при анализе сейсмической безопасности площадок АЭС необходимо учитывать возможность возникновения крупного техногенного землетрясения в исследуемом районе. Исходя из современной оценки, для получения объективных оценок сейсмической безопасности АЭС в случае крупных техногенных землетрясений достаточно использовать все накопленные знания и достижения, разработанные для естественной сейсмичности, просто расширив зону внимания на области расположения предприятий или инженерных объектов, которые могут стать потенциальными провокаторами таких событий.

Литература

1. Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии. Учет внешних воздействий природного и техногенного происхождения на объекты использования атомной энергии. НП-064-17: утв. приказом Ростехнадзора от 30.11.2017 № 514.
2. Шемякин Е. И., Курленя М. В., Кулаков Г. И. К вопросу о классификации горных ударов // ФТПРПИ. 1986. № 5. С. 3–11.
3. Ловчиков А. В. Сильнейшие горно-тектонические удары и техногенные землетрясения на рудниках России // ФТПРПИ. 2013. № 4. С. 68–73.
4. Кочарян Г. Г. Геомеханика разломов. – М.: ГЕОС. – 2016. – С. 424.
5. Адушкин В. В. Тектонические землетрясения техногенного происхождения // Физика Земли. 2016. № 2. С. 22–44.
6. Foulger G. R., Wilson M. P., Gluyas J. G., Julian B. R., Davies R. J. Global review of human-induced earthquakes. *Earth-Sci Rev.* 2018; 178:438-514. URL: <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2017.07.008> (дата обращения: 08.12.2022).
7. Ellsworth W. L., Giardini D., Townend J., Ge, S. & Shimamoto T. Triggering of the Pohang, Korea, earthquake (M_w 5.5) by enhanced geothermal system stimulation. *Seismological Research Letters* 2019. 90 (5), 1844–1858. URL: <https://doi.org/10.1785/0220190102> (дата обращения: 08.12.2022).
8. Schultz R., Skoumal R. J., Brudzinski M. R., Eaton D., Baptie B. & Ellsworth W. Hydraulic fracturing-induced seismicity. *Reviews of Geophysics*, 2020. 58, e2019RG000695. URL: <https://doi.org/10.1029/2019RG000695> (дата обращения: 08.12.2022).

9. Ge S. & Saar M. O. Review: Induced seismicity during geoenery development – A hydromechanical perspective. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2022. 127, e2021JB023141. URL: <https://doi.org/10.1029/2021JB023141> (дата обращения: 08.12.2022).
10. Liu J., Zahradník J. The 2019 M_w 5.7 Changning earthquake, Sichuan Basin, China – a shallow doublet with different faulting styles. 2020. *Geophysical Research Letters* 2020. 47 (4). DOI:10.1029/2019GL085408.
11. Сырников Н. М., Тряпицин В. М. О механизме техногенного землетрясения в Хибинах / Доклады АН СССР. 1990. Т. 314. № 4. С. 830–833.
12. Gibowicz S. J., Kijko A. An introduction to mining seismology, San Diego, Academic Press Inc., 1994. 622 p.
13. Heesakkers V., Murphy S., Reches Z. Earthquake rupture at focal depth, part I: structure and rupture of the pretorius fault, TauTona Mine, South Africa. *Pure Appl Geophys* 2011; 168:2395-2425. URL: <https://doi.org/10.1007/s00024-011-0354-7> (дата обращения: 08.12.2022).
14. Hager B. H., Dieterich J., Frohlich C., Juanes R., Mantica S., Shaw J. H., Bottazzi F., Caresani F., Castineira D., Cominelli A., Meda M., Osculati L., Petroselli S., Plesch A. A process-based approach to understanding and managing triggered seismicity. *Nature* 2021. Vol. 595. Pp. 684–707. URL: <https://doi.org/10.1038/s41586-021-03668-z> (дата обращения: 08.12.2022).
15. Ellsworth W. L., Llenos A. L., McGarr A. F. et al. Increasing seismicity in the U. S. midcontinent: Implications for earthquake hazard // *The Leading Edge; Special Section: Injection-induced seismicity*. 2015. Pp. 618–626. URL: <http://dx.doi.org/10.1190/tle34060618.1> (дата обращения: 08.12.2022).
16. Weingarten M., Ge S., Godt J. W., Bekins B. A. and Rubinstein J. L. High-rate injection is associated with the increase in U. S. mid-continent seismicity. *Science*, 2015, 348 (6241), pp. 1336–1340. DOI: 10.1126/science.aab1345.
17. Rubinstein J. L. and Mahani A. B. Myths and facts on wastewater injection, hydraulic fracturing, enhanced oil recovery, and induced seismicity, *Seismol. Res. Lett.*, 2015, 86, no. 4, pp. 1060–1067. DOI: 10.1785/0220150067.
18. Rubinstein J. L., Barbour A. J. & Norbeck J. H. Forecasting induced earthquake hazard using a hydromechanical earthquake nucleation model. *Seismological Research Letters*, 2021, 92, pp. 2206–2220. URL: <https://doi.org/10.1785/0220200215> (дата обращения: 08.12.2022).
19. Manga M., C.-Y. Wang and M. Shirzaei. Increased stream discharge after the 3 September 2016 M_w 5.8 Pawnee, Oklahoma earthquake, *Geophysical Research Letters*, 2016, 43, pp. 11588–11594.
20. Hough S. E., Morgan Page M. Potentially Induced Earthquakes during the Early Twentieth Century in the Los Angeles Basin. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2016, no. 106 (6), pp. 2419–2435. URL: <https://doi.org/10.1785/0120160157> (дата обращения: 08.12.2022).
21. Molina I., Vel'asquez J. S., Rubinstein J. L., Garcia-Aristizabal A., Dionicio V. Seismicity induced by massive wastewater injection near Puerto Gait'an, Colombia. *Geophys. J. Int.*, 2020, vol. 223, pp. 777–791.
22. Grasso, J.-R. Mechanics of seismic instabilities induced by the recovery of hydrocarbons. *Pure and applied geophysics*, 1992, vol. 139, pp. 507–534.
23. Мирзоев К. М., Негматуллаев С. Х. Возбужденная сейсмичность в зонах водохранилищ на примере района Нурекской ГЭС / Сб. Советско-Американских работ по прогнозу землетрясений. Т. 2, кн. 1. Душанбе-Москва: Дониш. 1979. С. 124–151.
24. Gupta H. K. Reservoir induced earthquakes. Elsevier. 1992. 364 p.
25. Simpson D. W., Leith W. S., Scholz C. H. Two types of reservoir-induced seismicity. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1988, vol. 78, no. 6, pp. 2025–2040.
26. Михайлов В. О., Арора К., Пономарев А. В., Шринагеш Д., Смирнов В. Б., Чадда Р. Наведенная сейсмичность в районе водохранилищ Койна и Варна, Индия: Обзор современных данных и гипотез // *Физика Земли*. 2017. № 4. С. 28–39.
27. Simpson D. W. and Negmatullaev S. K. (1981). Induced seismicity at Nurek Reservoir, *Bull. Seismol. Soc. Am.* 71, 1561–1586.
28. Hua Wei, Chen Zhangli, Zheng Sihua. Source Parameters and Scaling Relations for Reservoir Induced Seismicity in the Longtan Reservoir Area. *Pure Appl. Geophys*, 2012. DOI: 10.1007/s00024-012-0459-7.
29. Assumpcao M., Marza V., Barros L., Chimpliganond C., Soares J. E., Carvalho J., Caixeta D., Amorim A., Cabral E. Reservoir-induced seismicity in Brazil. *Pure and Applied Geophysics*, 159 (2002), pp. 597–617.
30. Смирнов В. Б., Пономарёв А. В. Физика переходных режимов сейсмичности. – М.: РАН, 2020. – 412 с.

31. Негматуллаев С. Х., Старков В. И. Влияние водохранилища на прилегающие территории / Доклады Академии наук республики Таджикистан // Геофизика. 2006, том 49, № 3.
32. Zhang C., Feng X., Zhou H., Qiu S., Wu W. A Top Pilot Tunnel Preconditioning Method for the Prevention of Extremely Intense Rockbursts in Deep Tunnels Excavated by TBMs. *Rock Mech Rock Eng.*, 2012, vol. 45, pp. 289–309. DOI: 10.1007/s00603-011-0199-5.
33. Feng G.-L., Feng X.-T., Chen B., Xiao Y.-X., Yu Y. A Microseismic Method for Dynamic Warning of Rockburst Development Processes in Tunnels. *Rock Mech Rock Eng.*, 2015, vol. 48, pp. 2061–2076. DOI: 10.1007/s00603-014-0689-3.
34. Yu Qun, Tang Chun-An, Li Liancong, Cheng GuanWen and Tang Lie-Xian. Study on Rockburst Nucleation Process of Deep-Buried Tunnels Based on Microseismic Monitoring // *Shock and Vibration*. Volume 2015 (2015), Article ID 685437, 17 pages. URL: <http://dx.doi.org/10.1155/2015/685437> (дата обращения: 08.12.2022).
35. He Ben-Guo, Zeling Ravit, Hatroz Yossef H., Feng Xia-Ting. Rockburst Generation in Discontinuous Rock Masses. *Rock Mech Rock Eng.*, 08 Jan. 2016. DOI: 10.1007/s00603-015-0906-8.
36. Arabasz W. J. and Pechmann J. C. (2001). Seismic characterization of coal-mining seismicity in Utah for CTBT monitoring, Technical Report UCRL-CR-143772, Lawrence Livermore National Laboratory, Livermore, California, LLNL Research Agreement No. B344836, 120 pp. URL: <https://quake.utah.edu/wp-content/uploads/LLNLRept.pdf> (дата обращения: 08.12.2022).
37. Маловичко А. А., Маловичко Д. А. Оценка силовых и деформационных характеристик очагов сейсмических событий // *Методы и системы сейсмодеформационного мониторинга техногенных землетрясений и горных ударов* / отв. ред. Н. Н. Мельников. Новосибирск, 2010. Т. 2. С. 66–92.
38. Кочарян Г. Г., Будков А. М., Кишкина С. Б. Об иницировании тектонических землетрясений при подземной отработке месторождений // *ФТПРПИ*. 2018. № 4. С. 34–44.
39. Еманов А. Ф., Еманов А. А., Фатеев А. В., Лескова Е. В. Техногенное Бачатское землетрясение 18.06.2013 ($M_L = 6,1$) в Кузбассе – сильнейшее в мире при добыче твердых полезных ископаемых // *Вопросы инженерной сейсмологии*. 2016. Т. 43. № 4. С. 34–60.
40. Кочарян Г. Г., Кишкина С. Б. Об иницировании тектонических землетрясений горными работами. Выемка и перемещение породы при открытых горных работах // *ФТПРПИ*. 2018, № 5. С. 45–53.
41. Кочарян Г. Г., Кишкина С. Б., Будков А. М., Иванченко Г. Н. О генезисе Бачатского землетрясения 2013 года. *Геодинамика и тектонофизика*. 2019; 10(3):741-759. URL: <https://doi.org/10.5800/GT-2019-10-3-0439> (дата обращения: 08.12.2022).
42. Davis S. D., Frohlich C. Did (or will) fluid injection cause earthquakes? – criteria for a rational assessment. *Seismol. Res. Lett.* 1993. 64, 207–224.
43. Qian Y., Chen X., Luo H., Wei S., Wang T., Zhang Z. & Luo X. An extremely shallow M_w 4.1 thrust earthquake in the eastern Sichuan Basin (China) likely triggered by unloading during infrastructure construction. *Geophysical Research Letters*. 2019. DOI:10.1029/2019gl085199.
44. Mueller C. S. (2017). Earthquake catalogs for the 2017 Central and Eastern U. S. short-term seismic hazard model: U. S. Geological Survey data release. URL: <https://doi.org/10.5066/F7KP80B9> (дата обращения: 08.12.2022).
45. Huang Y., Ellsworth W. L., Beroza G. C. Stress drops of induced and tectonic earthquakes in the central United States are indistinguishable. *Sci. Adv.* 2017; 3:e1700772.
46. Проект норм безопасности МАГАТЭ DS520. Учет внешних опасностей техногенного происхождения при оценке площадок для ядерных установок. МАГАТЭ, Вена, 2022.
47. Руководство по безопасности при использовании атомной энергии. Оценка исходной сейсмичности района и площадки размещения объекта использования атомной энергии при инженерных изысканиях и исследованиях. РБ-019-18: утв. приказом Ростехнадзора от 02.03.2018 № 90.
48. Нормы безопасности МАГАТЭ. Метеорологические и гидрологические опасности при оценке площадки ядерной установки. МАГАТЭ, SSG-18, Вена, 2011.
49. Серия норм безопасности МАГАТЭ. Оценка площадок для ядерных установок. Конкретные требования безопасности. МАГАТЭ, № SSR-1, Вена, 2019.
50. Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии. Площадка атомной станции. Требования безопасности. НП-032-19: утв. приказом Ростехнадзора от 19.07.2019 № 287.

References

1. Federal'nye normy i pravila v oblasti ispol'zovaniya atomnoi energii "Uchet vneshnikh vozddeistvii prirodnogo i tekhnogenogo proiskhozhdeniya na ob"ekty ispol'zovaniya atomnoi energii" (NP-064-17) [Federal rules and regulations in the field of atomic energy use "Accounting of external natural and human-induced impacts on nuclear facilities" (NP-064-17)]. 2017.
2. Shemyakin E. I., Kurlenya M. V., Kulakov G. I. K voprosu o klassifikatsii gornyx udarov [On the classification of mountain impacts]. FTPRPI – Fiziko-Tekhnicheskie Problemy Razrabotki Poleznykh Iskopaemykh, 1986, no. 5, pp. 3–11. [in Russian].
3. Lovchikov A. V. Sil'neishie gorno-tektonicheskie udary i tekhnogennye zemletryaseniya na rudnikakh Rossii [The strongest mining-tectonic shocks and man-made earthquakes in the mines of Russia]. FTPRPI – Fiziko-Tekhnicheskie Problemy Razrabotki Poleznykh Iskopaemykh, 2013, no. 4, pp. 68–73. [in Russian].
4. Kocharyan G. G. (2016). Geomekhanika razlomov [Geomechanics of faults]. Moscow: GEOS, p. 424. [in Russian].
5. Adushkin V. V. Tektonicheskie zemletryaseniya tekhnogenogo proiskhozhdeniya [Tectonic earthquakes of anthropogenic origin]. Fizika Zemli – Physics of the Solid Earth, 2016, vol. 52, no. 2, pp. 173–194. [in Russian].
6. Foulger G. R., Wilson M. P., Gluyas J. G., Julian B. R., Davies R. J. Global review of human-induced earthquakes. Earth-Sci Rev. 2018; 178:438-514. URL: <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2017.07.008> (reference date: 08.12.2022).
7. Ellsworth W. L., Giardini D., Townend J., Ge S. & Shimamoto T. Triggering of the Pohang, Korea, earthquake (M_w 5.5) by enhanced geothermal system stimulation. Seismological Research Letters 2019. 90 (5), 1844–1858. URL: <https://doi.org/10.1785/0220190102> (reference date: 08.12.2022).
8. Schultz R., Skoumal R. J., Brudzinski M. R., Eaton D., Baptie B. & Ellsworth W. Hydraulic fracturing-induced seismicity. Reviews of Geophysics, 2020. 58, e2019RG000695. URL: <https://doi.org/10.1029/2019RG000695> (reference date: 08.12.2022).
9. Ge S. & Saar M. O. Review: Induced seismicity during geoenery development – A hydromechanical perspective. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 2022. 127, e2021JB023141. URL: <https://doi.org/10.1029/2021JB023141> (reference date: 08.12.2022).
10. Liu J., Zahradnik J. The 2019 M_w 5.7 Changning earthquake, Sichuan Basin, China – a shallow doublet with different faulting styles. 2020. Geophysical Research Letters 2020. 47 (4). URL: <https://doi.org/10.1029/2019GL085408> (reference date: 08.12.2022).
11. Symikov N. M., Tryapitsyn V. M. O mekhanizme tekhnogenogo zemletryaseniya v Khibinakh: doklady AN SSSR [About the mechanism of a man-made earthquake in the Khibiny: reports of the USSR Academy of Sciences]. 1990. Vol. 314. No. 4. Pp. 830–833. [in Russian].
12. Gibowicz S. J., Kijko A. An introduction to mining seismology, San Diego, Academic Press Inc., 1994. 622 p.
13. Heesakkers V., Murphy S., Reches Z. Earthquake rupture at focal depth, part I: structure and rupture of the pretorius fault, TauTona Mine, South Africa. Pure Appl Geophys 2011; 168:2395-2425. URL: <https://doi.org/10.1007/s00024-011-0354-7> (reference date: 08.12.2022).
14. Hager B. H., Dieterich J., Frohlich C., Juanes R., Mantica S., Shaw J. H., Bottazzi F., Caresani F., Castineira D., Cominelli A., Meda M., Osculati L., Petroselli S., Plesch A. A process-based approach to understanding and managing triggered seismicity. Nature 2021. Vol. 595. Pp. 684–707. URL: <https://doi.org/10.1038/s41586-021-03668-z> (reference date: 08.12.2022).
15. Ellsworth W. L., Llenos A. L., McGarr A. F. et al. Increasing seismicity in the U. S. midcontinent: Implications for earthquake hazard. The Leading Edge; Special Section: Injection-induced seismicity. 2015. Pp. 618–626. <http://dx.doi.org/10.1190/tle34060618.1> (reference date: 08.12.2022).
16. Weingarten M., Ge S., Godt J. W., Bekins B. A. and Rubinstein J. L. High-rate injection is associated with the increase in U. S. mid-continent seismicity. Science, 2015. 348 (6241), pp. 1336–1340. URL: <https://doi.org/10.1126/science.aab1345> (reference date: 08.12.2022).
17. Rubinstein J. L. and Mahani A. B. Myths and facts on wastewater injection, hydraulic fracturing, enhanced oil recovery, and induced seismicity, Seismol. Res. Lett., 2015. 86, no. 4, pp. 1060–1067. URL: <https://doi.org/10.1785/0220150067> (reference date: 08.12.2022).

18. Rubinstein J. L., Barbour A. J. & Norbeck J. H. Forecasting induced earthquake hazard using a hydromechanical earthquake nucleation model. *Seismological Research Letters*, 2021, 92, pp. 2206–2220. URL: <https://doi.org/10.1785/0220200215> (reference date: 08.12.2022).
19. Manga M., C.-Y. Wang and M. Shirzaei. Increased stream discharge after the 3 September 2016 M_w 5.8 Pawnee, Oklahoma earthquake, *Geophysical Research Letters*, 2016. 43, pp. 11588–11594.
20. Hough S. E., Morgan Page M. Potentially Induced Earthquakes during the Early Twentieth Century in the Los Angeles Basin. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2016, no. 106 (6), pp. 2419–2435. URL: <https://doi.org/10.1785/0120160157> (reference date: 08.12.2022).
21. Molina I., Velásquez J. S., Rubinstein J. L., Garcia-Aristizabal A., Dionicio V. Seismicity induced by massive wastewater injection near Puerto Gaitán, Colombia. *Geophys. J. Int.*, 2020, vol. 223, pp. 777–791.
22. Grasso, J.-R. Mechanics of seismic instabilities induced by the recovery of hydrocarbons. *Pure and applied geophysics*, 1992, vol. 139, pp. 507–534.
23. Mirzoev K. M., Negmatullaev S. H. Vozbuzhdenennaya seismichnost' v zonakh vodokhranilishch na primere raiona Nurekskoi GES: sb. Sovetsko-Amerikanskikh rabot po prognozu zemletryaseniya [Excited seismicity in reservoir zones on the example of the Nurek HPP area: collection of Soviet-American works on earthquake prediction]. Dushanbe-Moscow: Donish., 1979, vol. 2, book 1, pp. 124–151. [in Russian].
24. Gupta H. K. Reservoir induced earthquakes. Elsevier. 1992. 364 p.
25. Simpson D. W., Leith W. S., Scholz C. H. Two types of reservoir-induced seismicity. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1988, vol. 78, no. 6, pp. 2025–2040.
26. Mikhailov V. O., Aurora K., Ponomarev A. V., Shrinagesh D., Smirnov V. B., Chad R. Navedennaya seismichnost' v raione vodokhranilishch Koina i Varna, Indiya: Obzor sovremennykh dannykh i gipotez [Reservoir induced seismicity in the Koyna–Warna region, India: Overview of the recent results and hypotheses]. *Fizika Zemli – Physics of the Solid Earth*, 2017, vol. 53, no. 4, pp. 518–529. [in Russian]. DOI: 10.1134/S1069351317030041.
27. Simpson, D. W. and Negmatullaev S. K. (1981). Induced seismicity at Nurek Reservoir, *Bull. Seismol. Soc. Am.* 71, pp. 1561–1586.
28. Hua Wei, Chen Zhangli, Zheng Sihua. Source Parameters and Scaling Relations for Reservoir Induced Seismicity in the Longtan Reservoir Area. *Pure Appl. Geophys*, 2012. DOI: 10.1007/s00024-012-0459-7.
29. Assumpcao M., Marza V., Barros L., Chimpliganond C., Soares J. E., Carvalho J., Caixeta D., Amorim A., Cabral E. Reservoir-induced seismicity in Brazil. *Pure and Applied Geophysics*, 159 (2002), pp. 597–617.
30. Smirnov V. B., Ponomarev A. V. (2020). *Fizika perekhodnykh rezhimov seismichnosti* [Physics of transient modes of seismicity]. Moscow: RAS, 412 p. [in Russian].
31. Negmatullaev S. H., Starkov V. I. Vliyanie vodokhranilishcha na privileyushchie territorii: doklady Akademii nauk respubliky Tadjikistan [The influence of the reservoir on the adjacent territories: reports of the Academy of Sciences of the Republic of Tajikistan]. *Geofizika – Geophysics*, 2006, volume 49, no. 3. [in Russian].
32. Zhang C., Feng X., Zhou H., Qiu S., Wu W. A Top Pilot Tunnel Preconditioning Method for the Prevention of Extremely Intense Rockbursts in Deep Tunnels Excavated by TBMs. *Rock Mech Rock Eng.*, 2012, vol. 45, pp. 289–309. URL: <https://doi.org/10.1007/s00603-011-0199-5> (reference date: 08.12.2022).
33. Feng G.-L., Feng X.-T., Chen B., Xiao Y.-X., Yu Y. A Microseismic Method for Dynamic Warning of Rockburst Development Processes in Tunnels. *Rock Mech Rock Eng.*, 2015, vol. 48, pp. 2061–2076. URL: <https://doi.org/10.1007/s00603-014-0689-3> (reference date: 08.12.2022).
34. Yu Qun, Tang Chun-An, Li Liancong, Cheng GuanWen and Tang Lie-Xian. Study on Rockburst Nucleation Process of Deep-Buried Tunnels Based on Microseismic Monitoring. *Shock and Vibration*, 2015, vol. 2015, Article ID 685437, 17 pages. URL: <http://dx.doi.org/10.1155/2015/685437> (reference date: 08.12.2022).
35. He Ben-Guo, Zeling Ravit, Hatroz Yossef H., Feng Xia-Ting. Rockburst Generation in Discontinuous Rock Masses. *Rock Mech Rock Eng.*, 08 Jan. 2016. URL: <https://doi.org/10.1007/s00603-015-0906-8> (reference date: 08.12.2022).
36. Arabasz W. J. and Pechmann J. C. (2001). Seismic characterization of coal-mining seismicity in Utah for CTBT monitoring, Technical Report UCRL-CR-143772, Lawrence Livermore National Laboratory, Livermore, California, LLNL Research Agreement No. B344836, 120 pp. URL: <https://quake.utah.edu/wp-content/uploads/LLNLRept.pdf> (reference date: 08.12.2022).

37. Malovichko A. A., Malovichko D. A. (2010). Otsenka silovyykh i deformatsionnykh kharakteristik ochagov seismicheskikh sobyitii. Metody i sistemy seismodeformatsionnogo monitoringa tekhnogennykh zemletryaseni i gornyykh udarov (otv. red. N. N. Mel'nikov) [Assessment of force and deformation characteristics of seismic event foci. Methods and systems of seismodeformation monitoring of technogenic earthquakes and mountain impacts (ed. by N. N. Melnikov)]. Novosibirsk. Vol. 2. Pp. 66–92. [in Russian].

38. Kocharyan, G. G. Initiation of Tectonic Earthquakes during Underground Mining (Eds G. G. Kocharyan, A. M. Budkov, S. B. Kishkina). Journal of Mining Science. 2018, vol. 54, no. 4, pp. 561–568. URL: <https://doi.org/10.1134/S1062739118044014> (reference date: 08.12.2022).

39. Emanov A. F., Emanov A. A., Fateev A. V., Leskova E. V. Tekhnogennoe Bachatskoe zemletryasenie 18.06.2013 ($M_L = 6.1$) v Kuzbasse – sil'neishee v mire pri dobyche tverdykh poleznykh iskopaemykh [The technogenic Bachatsky earthquake 18.06.2013 ($M_L = 6.1$) in Kuzbass: the world strongest event during mining operation]. Voprosy inzhenernoi seismologii – Questions of engineering seismology, 2016, vol. 43, no. 4, pp. 34–60. [in Russian].

40. Kocharyan G. G. Initiation of Tectonic Earthquakes Caused by Surface Mining (Eds G. G. Kocharyan, S. B. Kishkina). Journal of Mining Science. 2018, vol. 54, no. 5, pp. 744–750. [in Russian]. URL: <https://doi.org/10.1134/S1062739118054844> (reference date: 08.12.2022).

41. Kocharyan G. G., Kishkina S. B., Budkov A. M., Ivanchenko G. N. On the genesis of the 2013 Bachat earthquake. Geodynamics and tectonophysics, 2019, no. 10 (3), pp. 741–759. [in Russian]. URL: <https://doi.org/10.5800/GT-2019-10-3-0439> (reference date: 08.12.2022).

42. Davis S. D., Frohlich C. Did (or will) fluid injection cause earthquakes? – criteria for a rational assessment. Seismol. Res. Lett., 1993, vol. 64, pp. 207–224.

43. Qian Y., Chen X., Luo H., Wei S., Wang T., Zhang Z. & Luo X. An extremely shallow M_w 4.1 thrust earthquake in the eastern Sichuan Basin (China) likely triggered by unloading during infrastructure construction. Geophysical Research Letters, 2019. URL: <https://doi.org/10.1029/2019gl085199> (reference date: 08.12.2022).

44. Mueller C. S. (2017). Earthquake catalogs for the 2017 Central and Eastern U. S. short-term seismic hazard model: U. S. Geological Survey data release. URL: <https://doi.org/10.5066/F7KP80B9> (reference date: 08.12.2022).

45. Huang Y., Ellsworth W. L., Beroza G. C. Stress drops of induced and tectonic earthquakes in the central United States are indistinguishable. Sci. Adv. 2017; 3:e1700772.

46. Draft safety guide number DS520. Human induced External Hazards in Site Evaluation for Nuclear Installations, IAEA, Vienna, 2022.

47. Rukovodstvo po bezopasnosti pri ispol'zovanii atomnoi energii “Otsenka iskhodnoi seismichnosti raiona i ploschadki razmeshcheniya ob'ekta ispol'zovaniya atomnoi energii pri inzhenernykh izyskaniyakh i issledovaniyakh” (RB-019-18) [Safety guide in the field of atomic energy use “Assessment of initial seismicity of the region and the site of nuclear facility during engineering surveys” (RB-019-18)]. 2018.

48. Meteorological and Hydrological Hazards in Site Evaluation for Nuclear Installations, IAEA Safety Standards Series no. SSG-18, IAEA, Vienna, 2011.

49. Site Evaluation for Nuclear Installations. IAEA Specific Safety Requirements no. SSR-1, IAEA, Vienna, 2019.

50. Federal'nye normy i pravila v oblasti ispol'zovaniya atomnoi energii “Ploschadka atomnoi stantsii. Trebovaniya bezopasnosti” (NP-032-19) [Federal rules and regulations in the field of atomic energy use “Nuclear power plant site. Safety requirements” (NP-032-19)]. 2019.

Сведения об авторах

Кишкина Светлана Борисовна, ведущий научный сотрудник отдела устойчивости к внешним воздействиям, федеральное бюджетное учреждение «Научно-технический центр по ядерной и радиационной безопасности» (107140, Москва, ул. Малая Красносельская, д. 2/8, корп. 5); федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт динамики геосфер имени академика М. А. Садовского Российской академии наук (ИДГ РАН) (119334, Москва, Ленинский проспект, д. 38, корп. 1).

Бугаев Евгений Геннадьевич, главный научный сотрудник отдела устойчивости к внешним воздействиям, федеральное бюджетное учреждение «Научно-технический центр по ядерной и радиационной безопасности» (107140, Москва, ул. Малая Красносельская, д. 2/8, корп. 5).

Лободенко Иван Юрьевич, начальник отдела устойчивости к внешним воздействиям, федеральное бюджетное учреждение «Научно-технический центр по ядерной и радиационной безопасности» (107140, Москва, ул. Малая Красносельская, д. 2/8, корп. 5).

Authors credentials

Kishkina Svetlana Borisovna, Leading Researcher of External Impact Stability Division, Scientific and Engineering Centre for Nuclear and Radiation Safety (2/8, bld. 5, Malaya Krasnoselskaya str., Moscow, 107140); Sadovsky Institute of Geosphere Dynamics, Russian Academy of Sciences (IDG RAS), (38, bld. 1, Leninsky prosp., Moscow, 119334), e-mail: kishkina@secnrs.ru.

Bugaev Evgeny Gennadievich, Chief Researcher of External Impact Stability Division, Scientific and Engineering Centre for Nuclear and Radiation Safety (2/8, bld. 5, Malaya Krasnoselskaya str., Moscow, 107140), e-mail: bugaev@secnrs.ru.

Lobodenko Ivan Yurievich, Head of External Impact Stability Division, Scientific and Engineering Centre for Nuclear and Radiation Safety (2/8, bld. 5, Malaya Krasnoselskaya str., Moscow, 107140), e-mail: lobodenko@secnrs.ru.

Для цитирования

Кишкина С. Б., Бугаев Е. Г., Лободенко И. Ю. Учет техногенных землетрясений при анализе безопасности площадок АЭС // Ядерная и радиационная безопасность. 2022. № 4 (106). С. 41–58. DOI: 10.26277/SECNRS.2022.106.4.004.

For citation

Kishkina S. B., Bugaev E. G., Lobodenko I. Yu. Accounting of technogenic earthquakes in the NPP site safety analysis. Nuclear and Radiation Safety Journal, 2022, no. 4 (106), pp. 41–58. [in Russian]. DOI: 10.26277/SECNRS.2022.106.4.004.

