

УДК: 504.064.3

DOI: 10.26277/SECNRS.2021.99.1.003

© 2021. Все права защищены.

## РАЗРАБОТКА И РЕАЛИЗАЦИЯ СИСТЕМЫ СЕЙСМОЛОГИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА НА ОСНОВЕ РУКОВОДСТВА ПО БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ «СЕЙСМОЛОГИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ УЧАСТКОВ РАЗМЕЩЕНИЯ ЯДЕРНО- И РАДИАЦИОННО ОПАСНЫХ ОБЪЕКТОВ» (РБ-142-18)

Кишкина С. Б.\*\*\*, к. ф.-м. н. (kishkina@secnrs.ru),  
Бугаев Е. Г.\*, д. т. н. (bugaev@secnrs.ru),  
Лободенко И. Ю.\*, к. г.-м. н. (lobodenko@secnrs.ru)

Статья поступила в редакцию 9 июля 2020 г.

### Аннотация

Раскрываются некоторые базовые принципы построения системы сейсмологического мониторинга, отраженные в руководстве по безопасности при использовании атомной энергии «Сейсмологический мониторинг участков размещения ядерно- и радиационно опасных объектов» (РБ-142-18). Основное внимание уделено необходимости регистрации и анализа слабых сейсмических событий, а также выбору систем мониторинга, способных такую регистрацию осуществить. Рассмотрены физические основы требований к выбору методики регистрации и к средствам измерений. Предложены методы оценки минимального порога чувствительности. Показано, что в условиях редких тектонических событий один из доступных принципов оценки работоспособности системы мониторинга – регистрация сейсмических сигналов от промышленных взрывов; приведены возможные способы определения природы источников таких сигналов.

Решение задачи оценки возможного проявления сейсмических и геодинамических процессов на территории размещения ядерно- и радиационно опасных объектов не может быть полностью унифицировано. Такая задача должна решаться с достоверным научным обоснованием для каждого конкретного объекта с учетом его специфики. РБ-142-18 предоставляет алгоритм решения, опирающийся на мировой опыт ведения сейсмологических наблюдений, который может быть адаптирован для практически любых локальных условий.

► **Ключевые слова:** сейсмологический мониторинг, слабые сейсмические сигналы, площадка АЭС, объект использования атомной энергии, сейсмическая сеть, малоапертурная группа.

\* 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.

## DEVELOPMENT AND IMPLEMENTATION OF A SEISMIC MONITORING SYSTEM BASED ON THE SAFETY GUIDE “SEISMIC MONITORING OF AREAS SITING HAZARDOUS NUCLEAR OR RADIOLOGICAL FACILITIES” (RB-142-18)

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

Article is received on July 9, 2020

### *Abstract*

*The article reveals some basic principles of constructing a seismic monitoring system of sites for the location of nuclear and radiation hazardous objects, reflected in safety guide for the use of nuclear energy “Seismic Monitoring of Areas Siting Hazardous Nuclear or Radiological Facilities” (RB-142-18). The main intention is paid to the need to register small seismic events, as well as the choice of monitoring systems capable of such registration. The physical basis of the requirements for the choice of measurement methods and instruments is considered. In conditions of rare tectonic events, one way of the constructed system conformity assessment is the registration of quarry explosions signals; possible ways of their discrimination are described.*

*The solution to the problem of assessing the possible manifestation of seismic and geodynamic processes in the territory of the location of nuclear and radiation hazardous objects cannot be completely unified.*

*Such a task should be solved with reliable scientific justification for each specific object, taking into account its features. Safety Guide RB-142-18 provides a solution algorithm based on world experience in seismological monitoring, which can be adapted to any local conditions.*

► **Keywords:** *monitoring, weak seismic signals, NPP area, nuclear and radiation hazardous object, seismic network, seismic array.*

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

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

## Введение

Согласно нормативным документам (раздел VI НП-064-17<sup>1</sup>), в течение всего периода жизни объекта использования атомной энергии (ОИАЭ) должен осуществляться сейсмологический мониторинг, объем и состав которого должен быть установлен и обоснован в проекте ОИАЭ.

Чтобы унифицировать проведение мониторинговых работ и их результаты, в ноябре 2018 г. было введено в действие руководство по безопасности «Сейсмологический мониторинг участков размещения ядерно- и радиационно опасных объектов» (РБ-142-18)<sup>2</sup> (далее – РБ-142-18), предлагающее алгоритм построения оптимальной системы сейсмологического мониторинга на территории расположения площадки ОИАЭ.

Основные цели сейсмологического мониторинга – подтверждение безопасного размещения ОИАЭ в пределах целикового тектонического блока, не нарушенного активными разломами и геодинамическими зонами (потенциальными зонами возможных очагов землетрясений (далее – ВОЗ)); контроль параметров сейсмического режима. Для достижения поставленных целей система сейсмологического мониторинга должна обеспечить формирование каталогов сейсмических событий района наблюдения. А для этого, в свою очередь, необходимо обеспечить такую чувствительность наблюдений, которая позволит регистрировать и анализировать местные и локальные сейсмические события.

Основная цель выпуска РБ-142-18 – предоставить максимально четкий алгоритм действий, который позволит решить основные задачи мониторинга, опираясь на современные представления о проведении сейсмологических наблюдений.

### Необходимость регистрации слабых сейсмических событий

Будем называть «слабыми» событиями те, при которых излучается сейсмическая энергия не более чем  $5 \cdot 10^7$  Дж ( $M \leq 1,5 \div 2$ ).

<sup>1</sup> Учет внешних воздействий природного и техногенного происхождения на объекты использования атомной энергии. НП-064-17. Утверждены приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 30 ноября 2017 г. № 514.

<sup>2</sup> Утверждено приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 27 ноября 2018 г. № 592.

Необходимо отметить, что далее, если это не отмечено отдельно, мы будем оперировать общим понятием «магниту́да» ( $M$ ), поскольку говоря о сейсмологическом мониторинге участков размещения ядерно- и радиационно опасных объектов, в основном мы предполагаем временные или непродолжительные измерения, в ходе которых чаще всего не удается установить сколько-нибудь точных магнитудных зависимостей и станционных поправок. Так что ошибки в оценке величин, скорее всего, могут быть сопоставимы с разницей в оценке по различным методикам; пренебрежем этой разницей на данном этапе.

Последние 30 лет в мировой сейсмологической практике необходимость регистрации и анализа слабых сейсмических событий не только не подвергается сомнению, но ей уделяется особое пристальное внимание. Уже на границе XX и XXI веков были обобщены данные большого числа землетрясений широкого диапазона магнитуд. Например, в [1] было проанализировано несколько сотен событий в диапазоне  $-4 < M_w < 8$ . В это же время с появлением чувствительной аппаратуры и цифровых методов анализа данных регистрация микроземлетрясений стала повсеместно использоваться: при контроле ведения горных работ [2, 3], при контроле процесса гидроразрыва в ходе добычи углеводородов [4], при мониторинге энергетических объектов [5]. Многоуровневые системы сейсмологического мониторинга создаются, чтобы регистрировать возможные тектонические подвижки и, соответственно, иметь возможность оценить стабильность горного массива, вмещающего, например, объекты захоронения опасных отходов [6]. Рассматривается временной фактор, позволяющий, в случае регистрации достаточного числа слабых событий, получить параметры графика повторяемости гораздо быстрее, чем в случае системы, настроенной на события средних магнитуд, происходящие на исследуемой территории раз в несколько лет [7–8]. При этом необходимо иметь в виду, что в регионах с низкой сейсмичностью мониторинг требует достаточно длительного периода наблюдения; даже при условии регистрации большого количества слабых событий. Например, для района захоронения опасных отходов Loviisa (Финляндия) в ходе чувствительных сейсмических наблюдений (уверенная регистрация  $M_L \sim 1$  на расстояниях 5–10 км и событий с  $M_L \sim 0$  на расстояниях 25–30) новые активные разломы были обнаружены после 8–13 лет мониторинга [7]. Локация источников микроземлетрясений позволяет проверить

и уточнить модели расположения разломных зон, причем это относится не только к тектоническим, но и к существенной части индуцированных (техногенных) событий [8].

В большинстве рассмотренных ситуаций речь идет о слабых сейсмических событиях, возникающих в результате изменений распределения напряжений в горной породе, и последующего скольжения или сдвига горной породы. В последние десятилетия доказано, что сдвиговый механизм присущ не только природным землетрясениям и микроземлетрясениям, но и существенной части техногенных сейсмических событий, спровоцированных, например, ведением горных работ и добычей углеводородов [2, 9–10].

Слабые сейсмические сигналы могут регистрироваться и при экзогенных процессах. Например, при процессах карстообразования. В отдельных областях такие данные могут быть полезны при ведении мониторинга наряду с эндогенными сдвиговыми источниками.

Рассмотрим подробнее, каким образом можно организовать регистрацию и анализ слабых событий, опираясь на рекомендации РБ-142-18.

#### **Выбор средств и методик измерений, обеспечение требуемой чувствительности системы мониторинга**

Построение системы мониторинга, способной выполнить поставленные перед ней задачи, начинается с выбора методики получения сейсмической информации и подбора соответствующей аппаратуры.

При выборе чувствительности, которую необходимо обеспечить в ходе мониторинга, логичнее всего отталкиваться от двух показателей: уровня сейсмичности, рассчитанной для контролируемого района, и уровня чувствительности уже имеющихся региональных и/или федеральных систем сейсмического наблюдения, функционирующих в интересующей области. Необходимо оценить, землетрясения какой величины максимально вероятны на территории мониторинга, и какие из этих потенциальных событий смогут быть зарегистрированы уже существующими системами. Например, по данным Геофизической Службы РАН [11], на территории Ленинградской области надежно регистрируются сейсмические события с  $M \geq 2,5$ . В то же время в ближнем районе Ленинградской АЭС-2 в радиусе 300 км от площадки предполагается возможность возникновения

примерно десяти землетрясений с  $M \sim 2$  в год [12]. Такие события, скорее всего, не будут зарегистрированы существующими сейсмическими системами, и при организации локального сейсмического мониторинга в данном районе необходимо ориентироваться на надежную регистрацию сейсмических событий с  $M \geq 1,5$  в радиусе 300 км от площадки АЭС. Локальная система мониторинга, имеющая чувствительность на единицу магнитуды выше, то есть надежно регистрирующая только сейсмические события с  $M \sim 2,5$  и выше, будет просто дублировать имеющиеся системы региональных сейсмологических наблюдений.

Отметим, что при обладании минимальными историческими и инструментальными сейсмическими данными об интересующем районе, построение графика повторяемости может быть достаточно вариативным. Его параметры будут существенно зависеть от способа анализа: выбора радиуса представительности для событий каждой магнитуды, параметров временного и пространственного нормирования данных, учета условий деформирования, характера разрушения и пр. Так что имея в виду возможный разброс параметров графика повторяемости для районов с недостаточным объемом сейсмической информации, предпочтение стоит отдавать формальному повышению чувствительности системы локального мониторинга по сравнению с системами большего масштаба. Именно такой подход заложен в формулировку одной из основных задач сейсмологического мониторинга РБ-142-18 (пп. 11, 21).

Существует несколько методов оценки минимального порога чувствительности, то есть самой маленькой величины событий, которые планируемая сейсмическая система способна обнаружить. Чаще всего это численное моделирование магнитудной чувствительности планируемой системы, ее азимутального охвата, ошибок оценки эпицентрального расстояния и локализации гипоцентра предполагаемых источников событий с учетом погрешности имеющейся локальной модели коры.

Возможно также использование параметров, полученных уже существующими системами, которые достаточно близки к планируемой по своей конфигурации и по условиям установки. Так была спроектирована, например, сейсмическая сеть, предназначенная для мониторинга площадки новой финской АЭС [8], которую планируется построить в Ханхикиви, Пюхяйоки (Финляндия). Пюхяйоки расположен в центральной части Фенноскандинавского щита: в области, которая

характеризуется достаточно низкой внутриплитной сейсмичностью; с величинами событий, редко превышающими  $M \sim 4$ . Авторы проекта посчитали, что существующей сети редких сейсмических станций (согласно [8] в районе радиусом около 250 км от предполагаемой площадки установлено девять станций, расстояния между ними в среднем составляет  $\sim 40$  км; нижняя оценка регистрируемых магнитуд  $M=1$ ) недостаточно для сейсмотектонической интерпретации и, соответственно, для оценки сейсмической опасности. Так что помимо существующей стационарной сети сейсмических станций было запланировано создание локальной сейсмической сети. С опорой на данные пяти уже существующих на севере Европы сейсмических сетей, оценки проектируемой локальной сети из десяти станций показали, что она позволит автоматически определять местоположения событий с  $M \sim 0$  на расстоянии 25 км от площадки. Пороговые величины обнаружения проектируемой локальной сети оценивались как  $M = -0,1$  и  $M = 0,1$  в радиусе 25 и 50 км от Пюхяйоки, соответственно; так что она сможет существенно улучшить локацию слабых землетрясений и уточнить местоположение и степень активности местных разломов [8].

Теперь рассмотрим, какие подходы могут обеспечить требуемую чувствительность, то есть позволят вести уверенную регистрацию слабых сейсмических событий с  $M \leq 1,5 \div 2$  на участках размещения ядерно- и радиационно опасных объектов.

С учетом мирового опыта регистрации слабой сейсмичности в РБ-142-18 (п. 20) даны рекомендации использования плотной сети сейсмических станций, организации сети скважинных сейсмических наблюдений с максимально возможным заглублением (порядка 100 м и более), применения методики группирования. В условиях высокого фона помех и слабой сейсмической активности рекомендуется одновременное выполнение наблюдений сетью сейсмических станций и малоапертурной сейсмической группой.

Несомненно, самым дорогостоящим методом является построение системы наблюдений на базе скважинных станций, поскольку для достижения заметного снижения уровня микросейсмического шума необходимо заглубление аппаратуры не менее чем на 100 м. Так, после катастрофического землетрясения Кобе (1995 г.) в Японии была организована система высокоточных скважинных наблюдений "Hi-net". К 2005 г. она уже состояла из 1 250 высокочувствительных сейсмических станций, оснащенных трехкомпонентными скважинными

сейсмометрами, расположенными на глубине 100–200 м. В итоге вся территория страны оказалась равномерно покрыта сейсмическими станциями с расстояниями около 20 км между ними. И это не единственная сеть Японии.

В мировой сейсмологической практике известны и другие весьма эффективные сети и группы скважинных станций; все они расположены на глубинах 100–200 м и более. Однако подобные системы требуют существенных материальных вложений в свою организацию и обслуживание, так что чаще всего они используются при создании крупных проектов.

Например, система мониторинга газового месторождения Грёнинген, развернутая на площадке размером примерно  $6 \times 6$  км, помимо наземных наблюдений состоит из 70 станций, расположенных в скважинах глубиной 200 м. Тем не менее, чтобы максимально точно определить положение гипоцентров локальных землетрясений – а максимально точная оценка глубины событий принципиально важна для оценки безопасности работ на газовом месторождении – были дополнительно установлены малоапертурные сейсмические группы, ориентированные на регистрацию событий с  $M_L < 1$  (отмечено, что такие события являются достаточно крупными для района месторождения) [13].

Гораздо более реальным путем организации чувствительной системы сейсмологического мониторинга, способной надежно регистрировать слабые сейсмические события, может быть установка плотной сети сейсмических станций [14] или малоапертурной группы [15]. Оба способа широко используются для регистрации слабой сейсмичности, возникающей при производстве горных работ в шахтах [2] или проведении гидроразрыва в ходе добычи углеводородов [13].

Пример плотной сети станций, организованной для надежной регистрации микроземлетрясений с  $M_L$  от  $-2$  внутри площадки радиусом 10 км, может служить система сейсмического мониторинга хранилища отработанного ядерного топлива в Loviisa (Финляндия). В условиях гранитного массива потребовалось от 12 до 17 трехкомпонентных станций (постепенно система модернизировалась с 9 до 12 и потом 17 станций), установленных на площадке радиусом 15 км [7].

В конце XX века были организованы и отлично зарекомендовали себя малоапертурные группы NORES (южная Норвегия), ARCES (северная Норвегия), GERES (Германия) и др. В начале XXI века в Чеховском районе Подмоскovie организована

и надежно функционирует сейсмическая группа Михнево (ИДГ РАН), являясь одним из самых надежных источников данных о «взрывных» сейсмических сигналах в центральной части Восточно-Европейской платформы.

Напомним, что группирование предполагает площадную расстановку  $N$  сейсмических станций с одинаковыми характеристиками. Повышенная чувствительность сейсмических групп достигается за счет обработки данных. В основе принципа анализа лежит гипотеза о том, что в пределах линейных размеров площадной системы регистрации сигнал является плоской когерентной волной, а шум – некогерентным. Это позволяет, в частности, осуществлять суммирование сейсмических записей, получаемых на  $N$  датчиках: поскольку сигнал когерентен, а шум нет, при таком суммировании соотношение сигнал/шум возрастает по теоретическим оценкам в  $\sqrt{N}$  раз, где  $N$  – число сейсмических станций в группе, так что теоретически малоапертурная сейсмическая группа снижает порог обнаружения в  $\sqrt{N}$  раз. Однако гораздо существеннее, что при обработке данных сейсмической группы возможно использование метода регулируемого направленного приема (метода формирования лучей), который позволяет оценить скорость распространения волны, и, таким образом, в большинстве случаев надежно идентифицировать сейсмическую фазу. Эта весьма полезная способность малоапертурных групп существенно повышает шансы не просто зарегистрировать, но и определить основные параметры слабых сейсмических сигналов в условиях наблюдений на поверхности толщи осадочных пород; в таких условиях, когда наблюдается сложная форма сигнала, соотношение сигнал/шум в группе объемных волн крайне мало, а вступления фаз трудноопределимы.

Существенная особенность слабых сейсмических событий – весьма высокочастотный спектр излучаемых ими сигналов. В 2001 г. [1] было продемонстрировано, что около 80 % сейсмической энергии излучается в частотном диапазоне выше угловой частоты, так что оценки параметров сейсмического источника могут сильно недооцениваться при недостаточном частотном диапазоне регистрирующей аппаратуры. Действительно, отношение  $R$  между оцененной энергией и реально излученной сейсмической энергией события является функцией, зависящей от угловой частоты спектра сигнала, излучаемого сейсмическим источником  $f_0$ , и от высокочастотного порога частоты

регистрирующей аппаратуры  $f_m$ . Согласно [1] оценку  $R(f_m, f_0)$  можно представить в виде:

$$R(f_m, f_0) = \frac{2}{\pi} \left[ \arctg \left( \frac{f_m}{f_0} \right) - \frac{f_m/f_0}{(1 + f_m/f_0)^2} \right]. \quad (1)$$

На рис. 1 графическая форма зависимости (1) сопоставлена с формой амплитудного спектра скорости колебаний  $\Omega = M_0 \frac{f}{(1 + f/f_0)^2}$  и наглядно демонстрирует, что в области до диапазона  $\frac{f_m}{f_0} \sim 1$  находится менее 50 % площади спектра. Соотношение  $R \sim 0,9$  на уровне  $\frac{f_m}{f_0} = 10$ , то есть только при условии, когда верхняя граница  $f_M$  полосы пропускания аппаратуры в 10 раз превышает величину угловой частоты спектра, мы сможем определить по зарегистрированной скорости колебаний энергию сейсмического события, недооценив ее только на 10 %.

На рис. 2 визуализировано соотношение угловой частоты спектра сигнала, излучаемого сейсмическим источником [9],

$$f_0 = 63,33 C_S M_0^{-0,33}, \text{ Гц} \quad (2)$$

и величины моментной магнитуды, связанной с сейсмическим моментом, как:

$$M_w = \frac{2}{3} (lg M_0 - 9,1), \quad (3)$$

где  $M_0 = \mu AS$  ( $\mu$  – модуль сдвига;  $A$  – амплитуда смещения;  $S$  – площадь плоскости разрыва, по которой происходит смещение при землетрясении) – сейсмический момент.

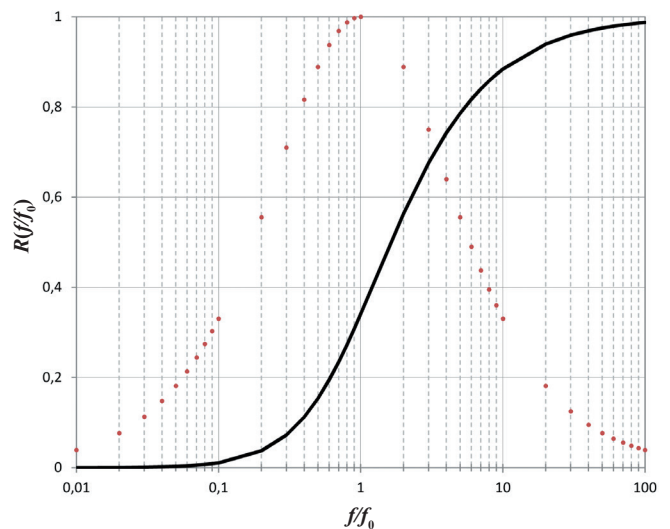


Рис. 1. Зависимость отношения оцененной и реально излученной сейсмической энергии события от  $f/f_0$   
 [Fig. 1. Dependence of the ratio of the estimated and radiated seismic energy on  $f/f_0$ ]

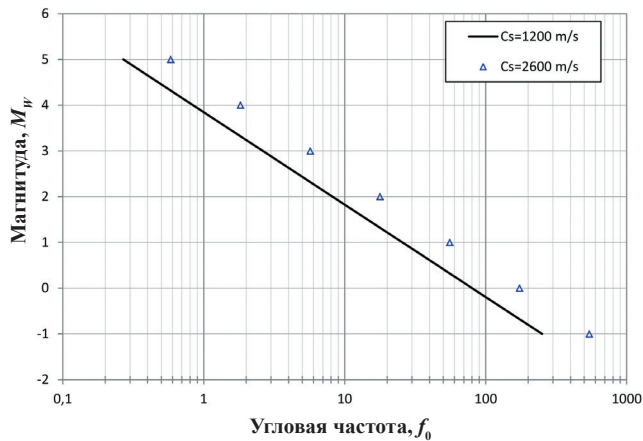


Рис. 2. Модельное соотношение угловой частоты спектра сигнала, излучаемого сейсмическим источником, и величины его моментной магнитуды [Fig. 2. The calculated ratio of the corner frequency source spectra by the moment magnitude]

Сопоставление графиков на рис. 1 и 2 наглядно демонстрирует, что использование недостаточно высокочастотной аппаратуры не позволяет адекватно определить параметры источников слабых сейсмических событий. Так, для события с  $M_w \sim 0$  необходимо иметь аппаратуру с верхними частотами не ниже 80 Гц (частота опроса, соответственно, должна быть не меньше 240 Гц). Угловая частота спектра для события с  $M_w \sim 1$  примерно 25 Гц, так что верхняя частота рабочего диапазона сейсмических каналов 50 Гц, рекомендованная РБ-142-18 (п. 24), позволит для события такого масштаба зарегистрировать сигналы, несущие не менее 50 % излученной энергии и, соответственно, достаточно корректно рассчитать параметры его очага, используя корректирующую зависимость [1].

Таким образом, частотный диапазон каналов используемых сейсмических станций является важной аппаратной характеристикой, которая должна соответствовать возможности максимально полной регистрации слабых сейсмических событий. Чтобы не лишиться полноценной записи более сильных событий с  $M \geq 2,5$ , сохраняя при этом возможность регистрации микросейсмических колебаний и слабых сейсмических событий с  $M \sim 1$ , необходимо выбирать аппаратуру с достаточным динамическим диапазоном не ниже 120 дБ (РБ-142-18, пп. 23, 24).

Значительно повышает точность анализа оснащение всех пунктов наблюдения однотипными сейсмическими датчиками и системами регистрации (п. 22 РБ-142-18). Это обязательное требование при установке малоапертурных групп; однако оно существенно упрощает обработку и при установке сейсмических сетей.

Несомненно, оба способа регистрации ведения мониторинга – плотная сейсмическая сеть и малоапертурная группа – имеют свои преимущества и недостатки.

Так, установка сети, то есть одиночных сейсмических станций, в условиях высокого уровня шумов должна быть настолько плотной, чтобы сигнал с минимальной магнитудой (установленной необходимым уровнем чувствительности) регистрировался по крайней мере тремя станциями. Приведенные выше примеры систем мониторинга газовых месторождений или хранилищ отходов, которые оборудованы десятками сейсмических станций на площадках радиуса несколько километров, способны регистрировать очень слабые события с отрицательными магнитудами. Если речь идет о возможности регистрировать сейсмические события с  $M \sim -1$ , то такой чувствительностью обладает (по данным на 2010 г.), например, сейсмическая сеть Японии “Hi-net” (High Sensitivity Seismograph Network), равномерно покрывающая территорию страны станциями, расположенными на расстояниях 20–30 км друг от друга в скважинах на глубине 100–200 м. Очевидно, что добиться подобной чувствительности наземными наблюдениями, не увеличивая в разы плотность установки станций, практически невозможно из-за высокого уровня микросейсмического шума.

Малоапертурная группа лишена этого недостатка, так что способна регистрировать и с достаточной точностью анализировать гораздо более слабые сейсмические события, чем аналогичные станции, установленные по отдельности (сеть). Однако установка группы связана с существенными трудностями, а иногда и вовсе невозможна в условиях густонаселенных районов, поскольку для малоапертурной группы необходим участок площадью не менее 1 км<sup>2</sup> без заметных перепадов высот, а такое пространство не всегда можно найти при активном использовании земель.

Таким образом, выбор способа ведения сейсмологического мониторинга должен осуществляться для каждого района индивидуально, после тщательного анализа местных условий.

### Контроль работоспособности системы

Раздел 9 РБ-142-18 посвящен контролю качества получаемой информации. Основным положением здесь является оценка реальной чувствительности системы мониторинга, отмеченная в п. 13. Предложен путь оценки реальной

чувствительности работающей системы мониторинга, поскольку очевидно, что любое моделирование системы не в состоянии учесть все условия ее реальной работы: многочисленные природные и антропогенные источники сейсмического шума, локальные геологические и геоморфологические условия установки каждой станции и прочее.

Понятие чувствительности системы регистрации в классической «большой» сейсмологии тесно связано с понятием полноты получаемого каталога событий, методики оценки этих параметров разрабатываются все время существования таких систем. Одним из основных методов, вероятно, до сих пор остается оценка параметров графика повторяемости: чувствительность сейсмической системы совпадает с величиной, при которой отношение Гутенберга – Рихтера больше не имеет места, то есть уровень загиба графика повторяемости соответствует величине минимальной магнитуды, надежно регистрируемой системой мониторинга.

В условиях локального сейсмического мониторинга площадок ОИАЭ на территориях, где практически отсутствует сейсмичность, а возможности сейсмических наблюдений весьма скромны, в РБ-142-18 (п. 55) даны рекомендации по оценке чувствительности системы сейсмологического

мониторинга путем регистрации и оценки параметров сигналов от карьерных и шахтных взрывов. Поскольку количество зарегистрированных землетрясений может не позволить построить график повторяемости в течение достаточно долгого времени, предлагается простой формальный способ оценки работоспособности созданной системы. Достаточно построить зависимость магнитуды от расстояния для всех зарегистрированных событий, для которых удалось определить эти характеристики.

Отсутствие же каких-либо сигналов, зарегистрированных системой сейсмического наблюдения, вполне вероятно будет свидетельствовать о ее неспособности решать поставленные перед мониторингом задачи и, соответственно, должно привести подобную систему к модернизации (п. 56).

На рис. 3 приведены результаты работы временных малоапертурных групп ИДГ РАН, установленных в районе площадок нескольких АЭС на срок от одного до четырех месяцев. В районе планирующейся Нижегородской АЭС группа работала в летние месяцы с 2011 по 2014 гг. Соответственно, эти данные (ряд 1 на рис. 3) самые объемные. Минимальные магнитуды событий, зарегистрированных малоапертурной группой в районе

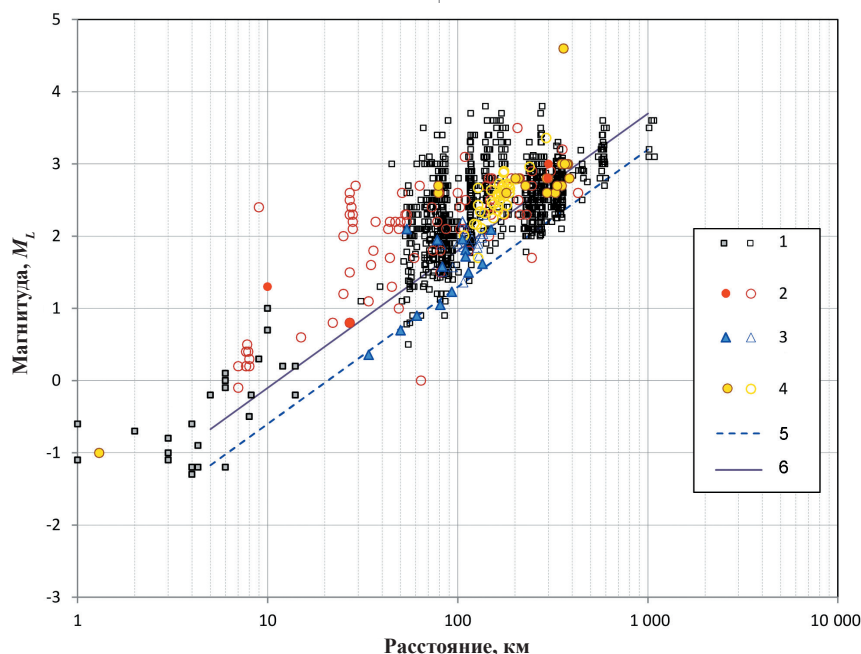


Рис. 3. Зависимость магнитуд сигналов, зарегистрированных группами ИДГ РАН в районах площадок АЭС, от расстояния до источника. 1 – Нижегородская АЭС; 2 – Ростовская АЭС; 3 – Ленинградская АЭС-2; 4 – Белоярская АЭС; 5 и 6 – зависимости для минимальных магнитуд рядов данных 1, 3 и 2, 4, соответственно. Локация источников событий на расстояниях свыше 600 км проводилась с привлечением данных группы «Михнево». Для каждой выборки окрашенные значки соответствуют местным природным событиям, окружности – взрывам [Fig. 3. Dependence of magnitudes of signals recorded by IDG RAS groups in the areas of NPP sites on distance to source. 1 – Nizhny Novgorod NPP; 2 – Rostov NPP; 3 – Leningradskaya NPP-2, 4 – Beloyarskaya NPP; 5 and 6 – dependencies for data series 1, 3 and 2, 4, respectively. The location of the sources of events at distances over 600 km was carried out using the data of the Mikhnevo group (IDG RAS). For each sample, filled icons correspond to local natural events, circles – to explosions]



площадки планируемой Нижегородской АЭС и в районе площадки Ленинградской АЭС-2 (ряд 3 на рис. 3), описываются зависимостью  $M_{min} = 1,9 \log_{10}(r) - 2,5$ , где  $r$  – расстояние до источника (зависимость 5 на рис. 3). В условиях расположения площадок Ростовской и Белоярской АЭС чувствительность групп идентичной конфигурации и аппаратурного содержания была несколько ниже:  $M_{min} = 1,9 \log_{10}(r) - 2,0$  (зависимость 6 на рис. 1). Опираясь на полученные данные, можно оценить радиус реальной возможности регистрации событий с  $M \sim 1,0$  в 40–70 км от места установки группы. На удалении 300 км от площадки расположения АЭС регистрировались события с  $M \sim 2$ .

Подобные результаты могут быть ориентиром при установке аналогичной системы мониторинга: следует предусмотреть, чтобы интересующие зоны ВОЗ попадали в радиус ее максимальной чувствительности от 40 до 70 км, пока не будут получены оценки минимальной регистрируемой магнитуды для конкретной системы регистрации.

Еще раз отметим, что весьма сложно, по крайней мере, с точки зрения финансовых затрат, обеспечивать одинаковую чувствительность на всей площади контроля в радиусе 300 км от площадки ОИАЭ. Необходимо помнить, что основная парадигма, на которой строится моделирование системы сейсмологического мониторинга – это взгляд на разломы как на потенциальные источники землетрясений. Приуроченность сильных землетрясений к разломным зонам известна давно. Но с развитием аппаратурных возможностей наблюдений, повышением плотности расположения сейсмических станций и появлением новых методов обработки стала проявляться приуроченность к разломным зонам местоположения абсолютного большинства источников землетрясений, а не только сильных событий. Высокая плотность расположения цифровых сейсмических станций в некоторых регионах (Япония, США) позволяет определять координаты слабых землетрясений с ошибкой в первые десятки, а иногда и единицы метров. Такая феноменальная точность определения источников слабых сейсмических событий дает возможность достоверно установить границы областей, в которых активизируются деформационные процессы [14]. Причем с помощью новых способов обработки уточнение координат событий возможно и для уже зарегистрированных данных, если наблюдения были выполнены качественно [16].

Повышение точности определения координат сейсмических событий, зарегистрированных систе-

мой сейсмологического мониторинга, позволит точнее очертить зоны локализации эпицентров и, следовательно, выявить их приуроченность к разломным зонам. Исходя из этого, как указано в пп. 26 и 28 РБ-142-18, в качестве основы для выбора мест установки сейсмических станций рекомендуется использовать предварительные схемы блочно-иерархического строения района размещения и площадки ОИАЭ и моделировать конфигурацию системы таким образом, чтобы она была максимально чувствительна в области динамического влияния (в радиусе около 4-х км) основной геодинамически активной структуры, представляющей потенциальную сейсмическую опасность для площадки ОИАЭ.

Исключением для рекомендаций п. 28 может стать район мониторинга с высокой вероятностью возникновения экзогенных сейсмических событий. Наглядным примером могут служить карстовые провалы, подготовка которых может быть зафиксирована сейсмическими наблюдениями.

### Определение природы события «карьерный взрыв»

Как уже отмечалось, оценить работоспособность системы сейсмического наблюдения в условиях практически полного отсутствия достаточно сильных сейсмических сигналов непросто. Один из способов определить, что мониторинг надежно функционирует, – построить зависимость магнитуды от расстояния для всех событий, для которых удалось определить эти характеристики.

Одним из основных источников внешнего антропогенного воздействия на площадку размещения ОИАЭ является горнодобывающая промышленность. В России, как и во всем мире, в ходе ведения горных работ проводится большое количество взрывов разного масштаба. Самые крупные взрывы проводятся на карьерах, и именно они являются наиболее частым источником сейсмических сигналов, попадающих в мировые сейсмические каталоги, а также частым источником сейсмических сигналов, регистрируемых в ходе мониторинга районов размещения площадок ОИАЭ и получающих статус «предположительно взрыв». Именно такие сигналы могут в ограниченные сроки наблюдений позволить оценить реальную чувствительность построенной системы мониторинга, по крайней мере, в диапазоне  $M \sim 1,5 \div 3,5$ , наиболее характерном для взрывных источников.

Для определения таких источников применяется анализ целого комплекса параметров.

РБ-142-18 (п. 47) предлагает выделять сигналы, вызванные взрывами на карьерах или шахтах, по совокупности признаков: признак «место – время» (совпадение места источника и территории карьера или шахты, совпадение времени в источнике с узким интервалом проведения взрывных работ на конкретном предприятии); наличие спектральной модуляции на высоких частотах (обычно на частотах выше 15 Гц); набору типовых «портретов» волновых форм и других.

Время регистрации сигнала и местоположение его источника – самые очевидные и простые признаки сейсмического сигнала карьерного взрыва. Тем не менее, анализа только этих параметров не всегда достаточно. Время регистрации сигналов не может служить однозначным определяющим признаком, поскольку землетрясения могут происходить в любое время, а не только ночью. Хотя, конечно, сигналы, которые регистрируются, например, каждую среду в 12 ч по местному времени, практически наверняка имеют своим источником взрывы на конкретном карьере. Однако при регистрации событий на достаточно большой площади радиусом 300 км такого четкого временного распределения сейсмических событий практически не бывает. Обычно в область регистрации попадает несколько (а иногда и несколько десятков) карьеров, работающих в разном режиме и в разное время (могут регистрироваться и шахтные взрывы). Например, в ходе мониторинга района планирующей площадки Нижегородской АЭС, который велся в летние месяцы, в разные годы (2011–2014 гг.) регистрировались взрывные сигналы от разного количества карьеров. В 2011 г. были зарегистрированы сигналы от 23 карьеров, в 2012 г. – от 24, в 2013 г. – от 31 и в 2014 г. – от 23 карьеров. Несколько отличалось и распределение таких «взрывных» сигналов во времени, укладываясь в широкий временной интервал с 10 до 17 ч по местному времени. На рис. 4 приведен пример распределения времен регистрации «взрывных» сигналов в 2013 и 2014 гг.

Так что время регистрации может быть только одним из целого ряда тщательно анализируемых параметров.

На втором этапе определяются координаты источника анализируемого сигнала. Если они совпадают с местоположением крупного функционирующего карьера, а время совпадает со временем производства на нем взрывов, анализ можно считать завершенным. Чем выше точность определения координат, тем надежнее этот этап анализа может

определить природу источника. Отметим здесь, что любое уточнение местоположения источников сейсмических событий тесно связано не только с параметрами выбранной системы регистрации, обсуждаемой выше, но и с точностью знаний геологических характеристик района работ, то есть с точностью выбранной модели локального участка среды.

К сожалению, идеальная картина четкой приуроченности источника сейсмического сигнала к конкретному карьере реализуется не всегда. Часто место локации оказывается на заметном удалении (вплоть до нескольких десятков километров) от карьеров. В таких случаях анализ должен быть продолжен.

Методик, разработанных для разделения взрывных и тектонических источников сейсмических сигналов, достаточно много. Например, оценивается амплитудное отношение объемных волн  $S/P$  или проводится оценка взаимной корреляции входящего потока данных с шаблоном формы сигнала. Как уже отмечалось, однозначного признака, указывающего на принадлежность источника сигнала к категории «карьерный взрыв», нет, так что каждый способ имеет свои недостатки и исключения. Шаблон волновой формы для одного и того же карьера может меняться (например, в связи с изменением схемы подрыва), а критерий  $S/P$  неплохо

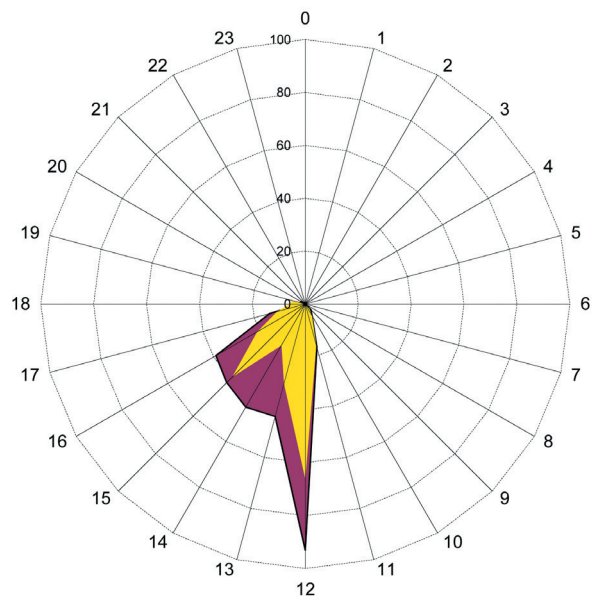


Рис. 4. Временное распределение взрывных сигналов, зарегистрированных в районе площадки планирующей Нижегородской АЭС одной и той же малоапертурной группой летом 2013 г. (бордовый цвет) и 2014 г. (желтый)

[Fig. 4. Time distribution of explosive signals recorded in the area of the planned Nizhny Novgorod NPP site by the same small-aperture group in 2013 (burgundy signs) and 2014 (yellow signs) experiments]

работает для мгновенных сферических источников, но не всегда справедлив для сложной суперпозиции сейсмических сигналов, возникающей при короткозамедленных взрывах на карьерах.

Один из наиболее часто используемых способов определения сейсмических сигналов от взрывов – это спектральный анализ, в ходе которого может выявиться повышенное содержание в сигнале высокочастотных компонент. Это проявляется в виде модуляции спектра, которая является известным характерным признаком короткозамедленного взрыва [17]. Частоты модуляции тесно связаны с используемым временем задержки при короткозамедленном взрывании, применяемом для уменьшения сейсмического эффекта.

Для подобного анализа сигналов важно, что удаленность пункта регистрации от источника взрыва практически не влияет на форму спектра: сформировавшийся на близких расстояниях характер спектральной зависимости мало изменяется вдоль всей трассы распространения сигнала, хотя волновая форма может существенно меняться по пути распространения сейсмической волны. Для примера на рис. 5 приведены спектральные характеристики сигнала от одного взрыва, зарегистрированные на разных расстояниях от карьера: при том, что волновая форма сигнала существенно меняется с расстоянием, модулированный характер спектров остается неизменным. Характерная модулированная форма отмечается для спектров сигналов короткозамедленных взрывов, зарегистрированных даже на больших расстояниях от карьера, по крайней мере, до 300–400 км. Такое свойство позволяет уверенно использовать этот признак при ведении сейсмического мониторинга района расположения

площадки ОИАЭ, который определяется радиусом 300 км вокруг площадки.

Выделение спектральной модуляции сигналов от карьерных взрывов реализуется и в случае сильной зашумленности сейсмической записи [12].

Если ни один из доступных методов анализа не позволяет сделать однозначный вывод о природе исследуемого события, следует предположить «худший» для площадки ОИАЭ сценарий и отнести природу события к тектонической с пометкой неопределенности анализа (п. 49 РБ-142-18). Если в дальнейшем в окрестности такого неопределенного источника будут зарегистрированы еще события, то совокупная оценка их природы позволит, возможно, прояснить общую картину. Если сигналов в данном районе больше не выявится, то вопрос о природе источника единичного события можно будет считать не принципиальным. Время, по прошествии которого можно пренебречь фактом наличия такого «неопределенного» события, должно быть определено и обосновано специалистами, ведущими мониторинг, с учетом локальных условий анализируемого района.

### Заключение

В статье рассмотрены некоторые базовые принципы построения сейсмологического мониторинга участков размещения ядерно- и радиационно опасных объектов, заложенные в рекомендациях РБ-142-18. Основное внимание уделено необходимости регистрации и анализа слабых сейсмических событий, а также выбору систем мониторинга, способных такую регистрацию осуществить.

За рамками статьи остался вопрос, имеющий принципиально важное значение в современной

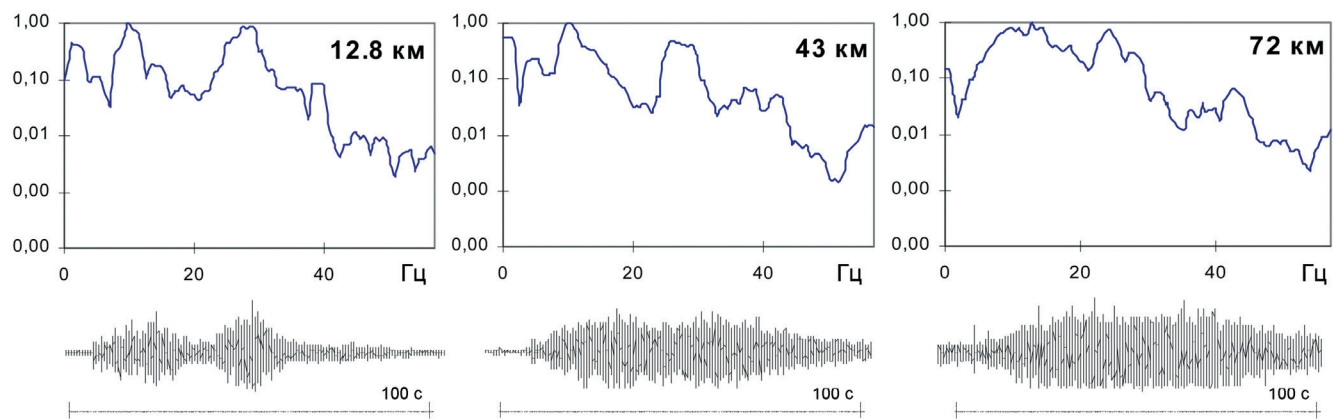


Рис. 5. Нормированная спектральная плотность мощности, рассчитанная для сейсмических сигналов, зарегистрированных на разных расстояниях от взрыва (Лебединский ГОК, 25.05.2000, 1 142 т).

Внизу приведены волновые формы сигналов

[Fig. 5. Normalized power spectral density calculated for seismic signals recorded at different distances from the quarry explosion (Lebedinsky quarry, May 25, 2000; 1 142 t).

The bottom row shows the waveforms of the signals]

физике землетрясений и тесно связанный с дискуссиями о регистрации слабых сейсмических событий, – вопрос существования масштабного эффекта землетрясений. Отметим, что решению этой фундаментальной задачи уже посвящено и до сих пор посвящается огромное количество работ. В настоящее время последняя точка еще не поставлена. Хотя использование не просто статистических, но и физических принципов оценки эффективности излучений сейсмической энергии, определение факторов, которые на нее влияют, и степени их возможного вклада свело дискуссию о масштабном эффекте землетрясений к вопросу лишь о диапазоне его применимости. Достаточно подробно задача о самоподобии сейсмического процесса рассмотрена, например, в [10].

Однако вне зависимости от окончательного решения задачи о возможности или невозможности делать однозначные выводы о вероятности возникновения сильных событий по данным о слабой сейсмичности, мировая практика свидетельствует не просто о возможности регистрации и оценки параметров источников слабых сейсмических сигналов, но и о возможности их сопоставления на разных масштабных уровнях [1, 2, 10]. Вопрос о необходимости и возможности регистрации слабых сейсмических событий с  $M \leq 1$  давно в мировой литературе не обсуждается, поскольку работа с такими (и гораздо более слабыми) событиями является общеупотребительной практикой, не подвергающейся сомнениям [6–13]. Необходимо учитывать современные знания о характеристиках сейсмического излучения и, соответственно, корректно выбирать параметры регистрирующей аппаратуры. Поскольку при организации сейсмологического мониторинга участков размещения ядерно- и радиационно опасных объектов основной акцент рекомендуется делать на регистрации слабой сейсмичности, не стоит забывать, что в этом случае существенной проблемой является заметное искажение спектра излучаемого сигнала в пространстве, поскольку высокие частоты быстро поглощаются средой. При невозможности выбора сейсмических станций с нужными параметрами следует учитывать эффект влияния ограниченной частотной характеристики аппаратуры во избежание существенной недооценки энергии слабых сейсмических событий в ходе дальнейшего анализа [1, 9].

Сейсмологический мониторинг участков размещения ядерно- и радиационно опасных объектов

привязан к району расположения площадки ОИАЭ, что не позволяет выбрать максимально выгодные для сейсмических наблюдений условия установки станций. Как правило, приходится вести регистрацию не только в районах мощных осадочных пород, но и в весьма сложных антропогенных условиях, в окружении дорог и населенных пунктов. Учитывая такие сложные для сейсмологических работ условия, предлагается опираться на выбор систем мониторинга, установка которых будет наиболее приемлемой: достаточно плотные сети одиночных сейсмических станций или малоапертурные группы.

Очевидно, что выбор средств и методики измерений должен быть подчинен обеспечению чувствительности, необходимой для решения поставленных задач. Но локальная система мониторинга не должна дублировать уже существующие в районе наблюдения. Она должна быть более чувствительной и обеспечивать регистрацию более слабых сейсмических событий, чем региональные и/или федеральные системы.

По результатам проведения сейсмологического мониторинга рекомендуется построить зависимость магнитуд от расстояний для источников всех зарегистрированных сигналов, что позволяет формально определить работоспособность используемого метода в конкретных условиях. Если полученная чувствительность окажется недостаточной для решения поставленных задач, следует пересмотреть метод наблюдений или конфигурацию и чувствительность выбранной аппаратуры.

Несомненно, после обеспечения регистрации слабых сейсмических событий необходимо добиваться максимального улучшения точности их локализации, поскольку приуроченность источников событий к разломным зонам проявляется тем очевиднее, чем лучше точность определения их положения.

Отметим, что оценка возможного проявления сейсмических и геодинамических процессов на территории размещения ОИАЭ – одна из важнейших проблем безопасности, решение которой не может быть полностью унифицировано и которая должна решаться с достоверным научным обоснованием для каждого конкретного объекта. РБ-142-18 предоставляет базовый унифицированный алгоритм, опирающийся на мировой опыт ведения сейсмологических наблюдений, который может быть адаптирован для практически любых локальных условий.

## Литература

1. Ide S., Beroza G. (2001). Does apparent stress vary with earthquake size? *Geophys. Res. Lett.*, vol. 28, 17, 3349–3352.
2. Gibowicz S. J. and Kijko A. (1994). An Introduction to Mining Seismology, in *International Geophysics*, Vol. 55, Academic Press, San Diego.
3. Foulger G. R. Wilson M. P., Gluyas J. G., Julian B. R., Davies R. J. Global review of human-induced earthquakes. *Earth-Science Reviews*, volume 178, March 2018, pages 438–514. Doi:10.1016/j.earscirev.2017.07.008.
4. Li L., Tan J., Wood D. A., Zhao Z., Becker D., Lyu Q., Shu B., Chen H. A review of the current status of induced seismicity monitoring for hydraulic fracturing in unconventional tight oil and gas reservoirs. *Fuel* 242 (2019), pp. 195–210.
5. Антоновская Г. Н., Капустян Н. К., Рогожин Е. А. Сейсмический мониторинг промышленных объектов: проблемы и пути решения // Сейсмические приборы. 2015. Т. 51. № 1. С. 5–15.
6. Results of Monitoring at Olkiluoto in 2017, *Rock Mechanics. Working Report 2018-27*. Posiva OY. June 2018. 126 p.
7. Saari J., Malm M. (2010). Local seismic network at the Olkiluoto site. Annual report for 2009, Working report 2010–33. Posiva Oy, 40 pp.
8. Tiira T., Uski M., Kortström J., Kaisko O., Korja A. Local seismic network for monitoring of a potential nuclear power plant area. *J Seismol* (2016). 20:397–417. DOI 10.1007/s10950-015-9534-8.
9. Беседина А. Н., Кабыченко В. Н., Кочарян Г. Г. Особенности сейсмического мониторинга слабых динамических событий в массиве горных пород // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2013. № 5. С. 20–36.
10. Кочарян Г. Г. Геомеханика разломов. М.: ГЕОС, 2016. 432 с.
11. Маловичко А. А. Мониторинг природной и техногенной сейсмичности на территории Российской Федерации / Проблемы защиты населения и территорий от чрезвычайных ситуаций: материалы XV Междунар. науч.-практ. конф. (Москва, 18–20 мая 2010 г.). – М., 2010. – С. 262–270.
12. Бугаев Е. Г., Кишкина С. Б., Санина И. А. Особенности сейсмологического мониторинга территории объектов использования атомной энергетики на Восточно-Европейской платформе // Ядерная и радиационная безопасность. 2012. № 3 (65). С. 1–9.
13. Dando B. D. E., Oye V., Nasholm S. P., Zuhlsdor L., Kuhn D., Wuestefeld A. Complexity in Microseismic Phase Identification: Full Waveform Modelling, Travel-Time Computations, and Implications for Event Locations within the Groningen Gas Field. *Geophysical Journal International*, 2019, volume 217, issue 1, pp. 620–649. 10.1093/gji/ggz017.
14. Кишкина С. Б., Кочарян Г. Г., Санина И. А., Остапчук А. А., Шаумян А. В. Использование локальных сейсмических сетей для определения сейсмогенной структуры разломов // Физика Земли. 2012. № 3. С. 22–33.
15. Gibbons S. J., Kvaerna T., Ringdal F. Considerations in Phase Estimation and Event Location Using Small-aperture Regional Seismic Arrays. *Pure and Applied Geophysics*, volume 167, issue 4–5, pp. 381–399.
16. Ловчиков А. В., Асминг В. Э. Изучение техногенной сейсмичности в Ловозерском горном массиве / Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных: материалы VI Междунар. сейсмол. шк. – Обнинск, 2011. – С. 186–189.
17. Baumgardt D. R., Ziegler K. A. Spectral evidence for source multiplicity in explosions: application to regional discrimination of earthquakes and explosions. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 1988. – Vol. 78, no. 5. – pp. 1773–1795.

## References

1. Ide S., Beroza G. (2001). Does Apparent Stress Vary with Earthquake Size? *Geophys. Res. Lett.*, vol. 28, 17, 3349–3352.
2. Gibowicz S. J. and Kijko A. (1994). An Introduction to Mining Seismology, in *International Geophysics*, Vol. 55, Academic Press, San Diego.
3. Foulger G. R. Wilson M. P., Gluyas J. G., Julian B. R., Davies R. J. Global Review of Human-Induced Earthquakes. *Earth-Science Reviews*, volume 178, March 2018, pages 438–514. Doi:10.1016/j.earscirev.2017.07.008.

4. Li L., Tan J., Wood D. A., Zhao Z., Becker D., Lyu Q., Shu B., Chen H. A Review of the current status of induced seismicity monitoring for hydraulic fracturing in unconventional tight oil and gas reservoirs. *Fuel* 242 (2019), pp. 195–210.
5. Antonovskaya G. N., Kapustyan N. K., Rogozhin E. A. Sejsmicheskij monitoring promyshlennykh ob'ektov: problemy i puti resheniya [Seismic Monitoring at Industrial Facilities: Challenges and Solutions]. *Sejsmicheskie pribory – Seismic Instrumentation*, 2015, vol. 51, no. 1, pp. 5–15.
6. Results of Monitoring at Olkiluoto in 2017, *Rock Mechanics. Working Report 2018-27*. Posiva OY. June 2018. 126 p.
7. Saari J., Malm M. (2010). Local Seismic Network at the Olkiluoto Site. Annual Report for 2009, Working Report 2010–33. Posiva Oy, 40 pp.
8. Tiira T., Uski M., Kortström J., Kaisko O., Korja A. Local Seismic Network for Monitoring of a Potential Nuclear Power Plant Area. *J Seismol* (2016). 20: 397–417. DOI 10.1007/s10950-015-9534-8.
9. Besedina A. N., Kabychenko V. N., Kocharyan G. G. Osobennosti sejsmicheskogo monitoringa slabyyh dinamicheskikh sobytij v massive gornyyh porod [Seismic Monitoring Specific to Mild Dynamic Effects in Rock Mass]. *Fiziko-tekhnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh – Physics and Engineering Challenges in Mining*, 2013, № 5, pp. 20–36 [in Russian].
10. Kocharyan G. G. (2016). *Geomekhanika razlomov [Rock Mechanics of Fractures]*. Moscow: GEOS [in Russian].
11. Malovichko A. A. (2010). Monitoring prirodnoy i tekhnogennoy sejsmichnosti na territorii Rossijskoj Federacii [Monitoring of Natural and Human-Induced Seismicity at the Territory of the Russian Federation]. *Problemy zashchity naseleniya i territorij ot chrezvychajnykh situacij: materialy XV Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. (Moskva, 18–20 maya 2010 g.) – Public and Land Protection Challenges in Emergencies: Proceedings of the XV Intern. Science & Practice Conf. (Moscow, May 18–20, 2010)*, pp. 262–270. Moscow [in Russian].
12. Bugaev E. G., Kishkina S. B., Sanina I. A. Osobennosti sejsmologicheskogo monitoringa territorii ob'ektov ispol'zovaniya atomnoj energetiki na Vostochno-Evropejskoj platforme [Seismological Monitoring Specific to Nuclear Facility Sites Located at the East European Platform]. *Yadernaya i radiacionnaya bezopasnost' – Nuclear and Radiological Safety*, 2012, № 3 (65), pp. 1–9.
13. Dando B. D. E., Oye V., Nasholm S. P., Zuhlsdor L., Kuhn D., Wuestefeld A. Complexity in Microseismic Phase Identification: Full Waveform Modelling, Travel-Time Computations, and Implications for Event Locations within the Groningen Gas Field. *Geophysical Journal International*, 2019, volume 217, issue 1, pp. 620–649. 10.1093/gji/ggz017.
14. Kishkina S. B., Kocharyan G. G., Sanina I. A., Ostapchuk A. A., Shaumyan A. V. Ispol'zovanie lokal'nykh sejsmicheskikh setej dlya opredeleniya sejsmogennoj struktury razlomov [Use of Local Seismic Networks to Characterise the Seismogenic Structure of Faults]. *Fizika Zemli – Physics of the Earth*, 2012, № 3, pp. 22–33.
15. Gibbons S. J., Kvaerna T., Ringdal F. Considerations in Phase Estimation and Event Location Using Small-aperture Regional Seismic Arrays. *Pure and Applied Geophysics*, volume 167, issue 4–5, pp. 381–399.
16. Lovchikov A. V., Asming V. E. (2011). *Izuchenie tekhnogennoj sejsmichnosti v Lovozerskom gornom massive [Studies on Human-Induced Seismicity at the Lovozero Massif]*. *Sovremennye metody obrabotki i interpretacii sejsmologicheskikh dannyh: materialy VI Mezhdunar. sejsmol. shk. – State-of-the-Art Techniques for Processing and Interpretation of Seismological Data: Proceedings of the VI Intern. Seismol. Sch.*, pp. 186–189. Obninsk [in Russian].
17. Baumgardt D. R., Ziegler K. A. Spectral evidence for source multiplicity in explosions: application to regional discrimination of earthquakes and explosions. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 1988. – Vol. 78, no. 5. – pp. 1773–1795.

#### Сведения об авторах

*Кишкина Светлана Борисовна*, ведущий научный сотрудник, 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, 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).

#### Author credentials

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

*Bugaev Evgeny Gennadievich*, Chief Researcher, Scientific and Engineering Centre for Nuclear and Radiation Safety (2/8, building 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, building 5, Malaya Krasnoselskaya str., Moscow, 107140), e-mail: lobodenko@secnrs.ru.

#### Для цитирования

*Кишкина С. Б., Бугаев Е. Г., Лободенко И. Ю.* Разработка и реализация системы сейсмологического мониторинга на основе руководства по безопасности при использовании атомной энергии «Сейсмологический мониторинг участков размещения ядерно- и радиационно опасных объектов» (РБ-142-18) // Ядерная и радиационная безопасность. 2021. № 1 (99). С. 28–42. DOI: 10.26277/SECNRS.2021.99.1.003.

#### For citation

*Kishkina S. B., Bugaev E. G., Lobodenko I. Yu.* Development and Implementation of a Seismic Monitoring System Based on the Safety Guide “Seismic Monitoring of Areas Siting Hazardous Nuclear or Radiological Facilities” (RB-142-18). Nuclear and Radiation Safety, 2021, no. 1 (99), pp. 28–42. DOI: 10.26277/SECNRS.2021.99.1.003 [in Russian].

