

УДК: 621.039

ПОЛНОТА РЕАЛИЗАЦИИ НОРМАТИВНЫХ ТРЕБОВАНИЙ ПРИ ОБОСНОВАНИИ СЕЙСМИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ АТОМНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СТАНЦИЙ И ХРАНИЛИЩ ОТРАБОТАННОГО ЯДЕРНОГО ТОПЛИВА

Бугаев Е.Г., д.т.н. (ФБУ «НТЦ ЯРБ»), Кишкина С.Б., к.ф.-м.н. (ИДГ РАН)

По результатам сейсмологического мониторинга выполнен тематический анализ обоснования сейсмической безопасности атомных электрических станций и хранилищ отработанного ядерного топлива. Показана неэффективность режимных сейсмологических наблюдений с использованием автономных сейсмических станций, расположенных на удалении более 10 – 15 км друг от друга, что связано со слабой сейсмической активностью районов расположения атомных электрических станций и хранилищ отработанного ядерного топлива и с высоким уровнем помех в пунктах наблюдения.

Такие условия диктуют необходимость использования при сейсмологическом мониторинге высокочувствительных систем наблюдения, позволяющих регистрировать очень слабые землетрясения с магнитудами вплоть до отрицательных. На основе анализа результатов наблюдения слабых событий существует возможность вероятностных оценок сейсмичности и обоснования современной геодинамической активности с учетом структурной приуроченности очагов землетрясений.

► **Ключевые слова:** сейсмологический мониторинг, малоапертурная группа, атомная станция, слабая сейсмичность.

COMPLETENESS OF IMPLEMENTATION OF REGULATORY REQUIREMENTS IN THE SUBSTANTIATION OF THE SEISMIC SAFETY OF NUCLEAR POWER PLANTS AND STORAGES OF THE FULFILLED NUCLEAR FUEL

Bugaev E.G., Ph. D. (SEC NRS), Kishkina S.B., Ph. D. (IDG RAS)

This paper presents the results of seismological monitoring data for seismic safety of nuclear power plants and storages of the fulfilled nuclear fuel analysis. The ineffectiveness of the regime seismological observations which are performed using seismic networks with 10-15 km base is demonstrated. Such inefficiency of rare networks is the result of weak seismic activity of the nuclear power plants and storages of the fulfilled nuclear fuel areas and a high level of noise in the observation points.

In such circumstances it is necessary to use highly sensitive surveillance systems that allow you to register very weak earthquakes with magnitudes up to negative. Based on the analysis of the results of observation of weak events there is the possibility of probabilistic estimates of seismic.

► **Key words:** seismological monitoring, small-aperture group, nuclear power plant, weak seismicity.

Введение

Постановлением Правительства РФ от 25.12.1993 № 1346 утверждено Положение о федеральной системе сейсмологических наблюдений и прогноза землетрясений (далее – Положение). Наряду с региональной сетью сейсмических станций Геофизической Службы РАН (ГС РАН), Положение предусматривает организацию и проведение непрерывных режимных наблюдений за геодинамической и сейсмической обстановкой в районах расположения радиационно опасных объектов. Цель наблюдений — создание и ведение банка данных о сейсмических и других геодинамических воздействиях на радиационно опасные объекты и обеспечение его взаимодействия с центральным банком данных региональной сети сейсмических станций ГС РАН для оперативного контроля катастрофических изменений сейсмической и геодинамической обстановки в районах расположения радиационно опасных объектов; обеспечения заинтересованных организаций информацией о катастрофических изменениях сейсмической и геодинамической обстановки и последствиях воздействия этих процессов на объекты, а также разработки рекомендаций и предложений по повышению эффективности функционирования службы сейсмических и геодинамических охранных сетей наблюдений. Требования по проведению геодинамических и сейсмологических режимных наблюдений при инженерных изысканиях и геодинамического и сейсмологического мониторинга при сооружении и эксплуатации атомных электрических станций (АЭС) и хранилищ отработанного ядерного топлива (ХОЯТ) нашли отражение в Федеральных нормах и правилах в области использования атомной энергии (например, НП-031-01, НП-064-05).

Анализ результатов сейсмологического мониторинга, проведенного за последние десять лет, показал неэффективность режимных сейсмологических наблюдений с использованием системы автономных сейсмических станций, расположенных на удалении более 10 – 15 км друг от друга при обосновании сейсмической безопасности АЭС и ХОЯТ. Низкая эффективность проводимых сейсмологических наблюдений связана с несколькими причинами: с высоким уровнем помех в пунктах наблюдения, низкой чувствительностью системы наблюдений и с нарушением непрерывности режимных сейсмологических наблюдений. Положение усугубляется слабой сейсмической активностью территории

Восточно-Европейской платформы (ВЕП), в пределах которой, как правило, расположены эксплуатируемые АЭС и ХОЯТ.

Практически полное отсутствие заметных сейсмических событий (с магнитудами $M > 3$) и высокий фон помех диктуют необходимость использования при сейсмологическом мониторинге высокочувствительных систем наблюдений, позволяющих регистрировать очень слабые землетрясения с магнитудами вплоть до отрицательных. Только регистрация всего спектра землетрясений позволит обеспечивать контроль стабильности параметров проектной основы и своевременно выдавать рекомендации на реализацию организационных и технических мер обеспечения безопасности при достижении контролируемыми параметрами критической величины в ходе строительства и эксплуатации АЭС и ХОЯТ.

Общие проблемы сейсмологических наблюдений для территории России

Проектирование и сооружение большинства эксплуатируемых в настоящее время АЭС и ХОЯТ на территории ВЕП осуществлялось на базе карт СР-78 в условиях господства широко распространенных представлений об асейсмичности и тектонической стабильности платформенных территорий. Изменения представлений о сейсмичности платформенных территорий нашли отражение при разработке нового комплекта карт общего сейсмического районирования территории Российской Федерации (ОСР-97), согласно которому сейсмичность многих районов ВЕП оказалась существенно большей, чем в предыдущих изданиях карт сейсмического районирования. Тем не менее, совершенно очевидно, что масштаб и детальность геолого-геофизических, геодинамических, сеймотектонических и сейсмологических исследований, которые учитываются при разработке комплектов карт ОСР, недостаточен для достоверного обоснования безопасного размещения конкретных особо опасных объектов, включая АЭС и ХОЯТ, тем более, что сеть сеймостанций на территории России (по границам ВЕП) заметно более редкая, чем в аналогичных по уровню сейсмичности районах Европы. Германия и Норвегия, например, имеют среднюю плотность сейсмических станций 4,5 и 3,9 на 10 000 км² соответственно (www.seismo.lv), это одни из лидеров в сейсмологическом мониторинге не только Европы, но и всего мира. Для европейской части

России (ограниченной с юга 50° северной широты и с востока 42° восточной долготы, т.е. на уровне Нижегородской области) аналогичный показатель составляет 0,275 (рис. 1).

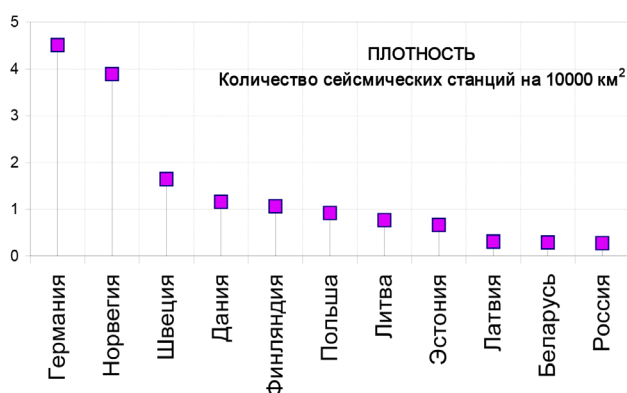


Рис. 1. Плотность сейсмических станций в северной Европе и на европейской части России (ограниченной с юга 50° северной широты и с востока 42° восточной долготы, т.е. на уровне Нижегородской области), по данным www.seismo.lv

На сегодняшний день ГС РАН, формирующая национальную систему сейсмологического мониторинга, начала формировать базовую сеть, без пропусков регистрирующую землетрясения с $M \geq 2,5-3$ [6]. Наряду с региональной сетью сейсмических станций, еще в 1993 г. была предусмотрена организация и проведение непрерывных режимных наблюдений за геодинимической и сейсмической обстановкой в районах расположения радиационно опасных объектов (Постановление Правительства РФ от 25.12.1993 № 1346). Необходимость совместного учета результатов региональных и локальных сейсмологических наблюдений при контроле стабильности параметров проектной основы предусмотрена также п. 7 НП-064-05. Все это определяет актуальность регистрации землетрясений с магнитудой менее 3,0 (вплоть до $-1,0$) для контроля сейсмической обстановки в районах расположения радиационно опасных объектов.

Основные проблемы режимных сейсмологических наблюдений на участках размещения АЭС и ХОЯТ

Несмотря на очевидную необходимость организации и проведения высокочувствительных непрерывных режимных наблюдений за сейсмической обстановкой в районах расположения радиационно опасных объектов, на сегодняшний день режимные

сейсмологические наблюдения при инженерных изысканиях и сейсмический мониторинг при сооружении и эксплуатации объектов АЭС и ХОЯТ на территории России ведутся, зачастую, совершенно формально. В течение последних трех десятков лет на участках размещения большинства АЭС и ХОЯТ выполняется сейсмологический мониторинг с использованием сети автономных сейсмических станций (далее – сеть), разнесенных на 10 – 30 км друг от друга. Такая сеть наблюдений характеризуется сразу несколькими существенными недостатками. В первую очередь, она не позволяет регистрировать сейсмические события с магнитудой меньше 2 в силу низкой чувствительности сети и высокого фона помех, а также с малой вероятностью возникновения таких событий внутри сети; слабые сейсмические события, регистрируемые отдельными единичными станциями сети, из рассмотрения исключаются из-за невозможности достоверного установления времен вступления различных фаз и, следовательно, из-за невозможности определения параметров источника. При этом сигналы с магнитудами около 2 – 2,5 регистрируются, но практически не анализируются, так как уровень помех не позволяет сети достоверно оценить их параметры: четко выделить моменты вступлений различных фаз и, следовательно, определить параметры источника.

В качестве сравнения результативности сейсмологических наблюдений методом сети автономных сейсмических станций и более чувствительным методом малоапертурной группы [3] на рис. 2 приведено количество сейсмических сигналов от взрывов, которое в среднем за месяц регистрировали сеть и группа в районе размещения площадки Нижегородской АЭС. Если сеть зарегистрировала единицы событий с определением «предположительно взрыв», то более чувствительная малоапертурная группа за месяц зарегистрировала десятки событий с определением координат источника. Отметим, что малоапертурная группа за счет возможности оценки кажущейся скорости может позволить определить источник события, в том числе и его глубину, даже в условиях, когда оценка дифференциального времени пробега продольных и поперечных волн на отдельных станциях затруднена.

Пример регистрации отдельной станцией регионального сейсмического события с оценкой ошибки локации и глубины источника события в зависимости от неопределенности в измерениях вступлений P и S -волн подробно рассмотрен на сайте

КФ ГС РАН (www.krsc.ru/defmon.htm). Наглядно продемонстрировано, что ошибка определения координат отдельными станциями достигает 50 км. Об оценке глубины события можно говорить только в статистическом смысле, т.е. именно как о наиболее вероятной глубине, при этом оценки варьируются от 0 до 100 км. На основании имеющихся данных исследователи Кольского филиала ГС РАН еще раз подтверждают известный в сейсмологии факт: в условиях не очень густой сети сеймостанций существуют принципиальные неустранимые ограничения метода локации событий по первым вступлениям волн. Эти ограничения касаются точности определения координат и, в особенности, глубин сейсмических событий.

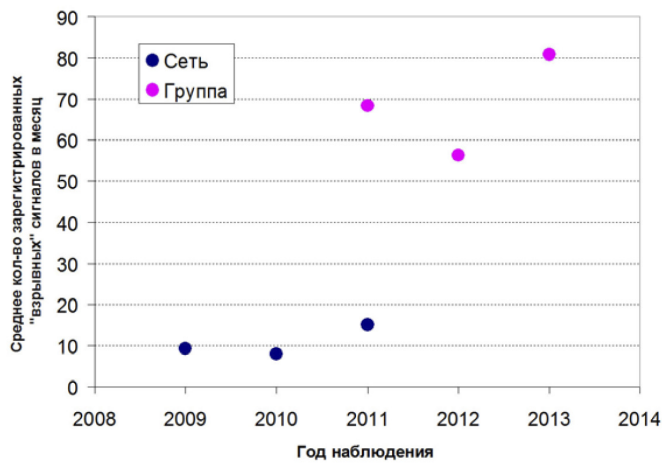


Рис. 2. Среднее количество сигналов от взрывов, зарегистрированных сейсмологической сетью и малоапертурной сейсмической группой за месяц (на примере площадки Нижегородской АЭС)

Учитывая вышесказанное, можно сделать вывод, что, согласно изученным отчетным материалам по результатам режимных сейсмологических наблюдений и сейсмологического мониторинга на основе сети автономных сейсмических станций, все местные сигналы, зарегистрированные сейсмическими сетями, априори принимались за «предположительно карьерный взрыв», при этом локацию места расположения источников сигналов провести не удалось, несмотря на то, что эти сигналы, в основном, имели магнитуды от 1,5 до 3 (рис. 3).

Согласно отчетным материалам, уверенную регистрацию местных землетрясений сеть автономных сейсмических станций может проводить, в лучшем случае, начиная с магнитуды 2,5, что не отличается по чувствительности от региональной сети сейсмических станций ГС РАН.

Это делает проведение режимных сейсмологических наблюдений на участках размещения ядерно- и радиационно опасных объектов сетью автономных сейсмических станций практически бессмысленным. На фоне низкой чувствительности сети нет особого смысла отмечать, что в большинстве случаев не выполняется и требование о непрерывности режимных сейсмологических наблюдений: все равно результаты подобного мониторинга практически отсутствуют.

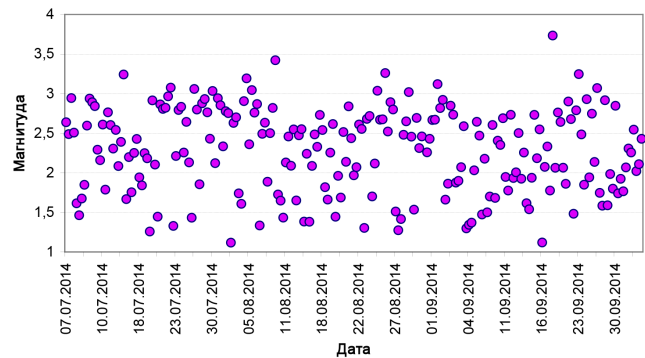


Рис. 3. Распределение сигналов от карьерных взрывов в районе площадки Нижегородской АЭС за три месяца 2014 г. (июль–сентябрь) по данным регистрации малоапертурной группы. Абсолютное большинство источников сигналов соответствует магнитудам от 1,5 до 3

Несмотря на многолетнее использование при сейсмологическом мониторинге участков размещения ядерно- и радиационно опасных объектов сетей автономных сейсмических станций, полезная сейсмическая информация о местных сейсмических сигналах эндогенной природы практически отсутствует из-за малой чувствительных сейсмических сетей. Лишь в отдельных случаях за несколько лет наблюдений в районе площадки АЭС регистрируются единичные землетрясения. Например, в районе площадки Ростовской АЭС было зарегистрировано землетрясение с магнитудой 2,0, приуроченное к геодинамической зоне – потенциальной зоне ВОЗ, выявленной при проведении инженерных изысканий согласно рекомендациям РБ-019-01 задолго до данного сейсмического события. Такое положение дел с организацией и проведением сейсмологических наблюдений сетью автономных сейсмических станций не позволяет делать хоть какие-то выводы о сейсмическом режиме и контроле его стабильности и стабильности параметров проектной основы при сооружении и эксплуатации АЭС и ХОЯТ. Кроме того, нет возможности рассматривать и

структурную приуроченность очагов микроземлетрясений, поскольку события просто не регистрируются, параметры сейсмического режима не определяются и, соответственно, не контролируются.

К положительным исключениям в проведении сейсмологического мониторинга можно отнести постоянные наблюдения, которые ведутся ГС РАН совместно с Воронежским Государственным Университетом (ВГУ) в районе Нововоронежской АЭС [7] и на Саратовском геодинамическом полигоне [8]. Результаты этих наблюдений нашли отражение в сборнике [4].

Совместное рассмотрение на участке размещения Нововоронежской АЭС результатов регистрации землетрясений и геодинамических зон – потенциальных зон ВОЗ, выявленных согласно рекомендациям РБ-019-01 в районе (масштаб 1:500000) задолго до получения сейсмологических данных о местных землетрясениях, представлено на рис. 4.

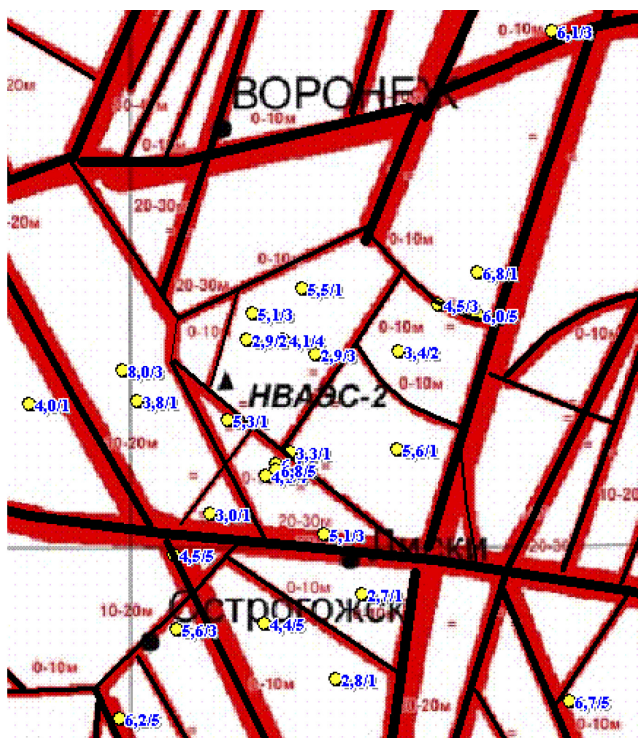


Рис. 4. Фрагмент схемы потенциальных зон ВОЗ района размещения Нововоронежской АЭС (М 1:500000) и эпицентров землетрясений, зарегистрированных в 2002 г. ВГУ

На фрагменте изображены геодинамические зоны – потенциальные зоны ВОЗ XII порядка и выше. Согласно рекомендациям РБ-019-01, приуроченность эпицентров землетрясений к потенциальным зонам ВОЗ однозначно указывает на геодинамическую

и сейсмическую активность участка размещения Нововоронежской АЭС на современном этапе геологического развития. Проявление эпицентров землетрясений внутри блоков, возможно, обусловлено недостаточной детальностью изучения геодинамических условий ближнего района. В любом случае необходимо дополнительное проведение более детальных исследований для выявления структур X и XI порядка.

Обоснование сейсмической безопасности АЭС и ХОЯТ

Одной из основных задач комплексного анализа геолого-геофизических, геодинамических, сеймотектонических и сейсмологических данных должно стать устранение противоречий в обеспечении безопасности, в первую очередь, противоречий в определении параметров проектного землетрясения (ПЗ) и максимального расчетного землетрясения (МРЗ) на основе детерминистского и вероятностного подходов.

Очевидно, что результаты локальных сейсмологических наблюдений (с привлечением исторических и инструментальных данных о землетрясениях) должны позволять определить параметры ПЗ и МРЗ, необходимые для обоснования сейсмостойкости АЭС и ХОЯТ на основе вероятностного подхода. Чем более широкий диапазон магнитуд система сейсмологического мониторинга сможет регистрировать, тем более коротким окажется срок, за который будут получены данные, позволяющие сделать первые вероятностные оценки сейсмической опасности. В последние десятилетия с развитием методов обработки на локальных системах сейсмического мониторинга особое внимание уделяется именно регистрации и обработке слабых сигналов (разные авторы оперируют разными определениями для таких событий: от микроземлетрясений до нано- и даже пикоземлетрясений). Несомненно, что даже при условии использования чувствительных систем наблюдения, способных регистрировать слабые сейсмические события, в регионах с низкой сейсмичностью исследования требуют длительного периода наблюдения. Например, для района Loviisa (Финляндия) характерны чередующиеся периоды спокойной и более активной сейсмичности: новые активизированные разломы были обнаружены даже после 8 – 13 лет мониторинга. С другой стороны, в одной из областей после четырех лет относительно заметной активности наступил длительный период тишины.

Таким образом, для предварительного отображения местных сеймотектонических движений период наблюдений, по мнению авторов [9], должен достигать 10 – 20 лет. За это время с помощью чувствительной системы сейсмологического мониторинга можно получить статистически репрезентативный набор данных: сотни или даже тысячи (в зависимости от района наблюдений) хорошо записанных и проанализированных микроземлетрясений. Измерения должны охватывать представительный период наблюдений до строительства АЭС и ХОЯТ; необходим и постоянный мониторинг сейсмических и геодинамических условий в процессе сооружения, эксплуатации и вывода объекта из эксплуатации.

Один из множества примеров организации подобного мониторинга в мире – система, установленная вокруг глубокой рудной шахты в Финляндии, где было распределено 16 сейсмических датчиков на глубине от 0 до 1,5 км. В течение 15 месяцев наблюдений системой было зарегистрировано около 1500 событий с магнитудами от –1,8 до 1,2. Полученные данные демонстрируют самоподобие событий, по крайней мере, для диапазона магнитуд от 0 до –1,0 [11].

Вопрос о масштабном эффекте, о существовании подобия между большими и малыми сейсмическими событиями, является сегодня одним из самых популярных вопросов сейсмологии и важным для оценки сейсмической опасности площадок АЭС и ХОЯТ. Еще в 1982 г. было показано [1], что в предположении выполнения самоподобия и сейсмическая энергия, и сейсмический момент пропорциональны кубу характерного размера источника, что означает независимость величины сейсмической эффективности источника от масштаба события при постоянстве скачка напряжений [2]. Огромное количество данных из разных регионов свидетельствует о том, что приведенная энергия землетрясения (с магнитудами от –3,5 до 8,5) практически не зависит от его масштаба, что соответствует самоподобной среде с линейными характеристиками [5]. При этом известен и широко обсуждается целый ряд работ, в которых показано, что для данных, полученных в одном массиве горных пород, наблюдается довольно сильная зависимость величины приведенной энергии или излучательной эффективности землетрясения от масштаба события. Обсуждаются и факторы, которые могут приводить к такому отклонению. Это может быть эффект влияния ограниченной частотной характеристики аппаратуры (т.е. существенная недооценка энергии слабых событий); зависимость

механических параметров нарушений сплошности от масштаба; зависимость упругих характеристик горной породы от масштаба; эффект поглощения и рассеяния высоких частот при распространении колебаний в среде [2].

Необходимость учета этих факторов определяет актуальность получения в результате сейсмологического мониторинга средней амплитуды подвижки и размера очага в дополнение к параметрам землетрясений (дата, время, магнитуда, глубина, точность определения параметров и т.д.), традиционно включаемым в каталоги. В последние 15 лет такие «физические» подходы к анализу сейсмических очагов получили широкое развитие в мире. Например, на рис. 5 приведена зависимость диаметра источника от величины сейсмического момента M_0 и моментной магнитуды M_w для совершенно разных районов наблюдения. Хорошо видна логлинейная зависимость, полученная на основании большого количества данных в широком диапазоне магнитуд от –4 до 4.

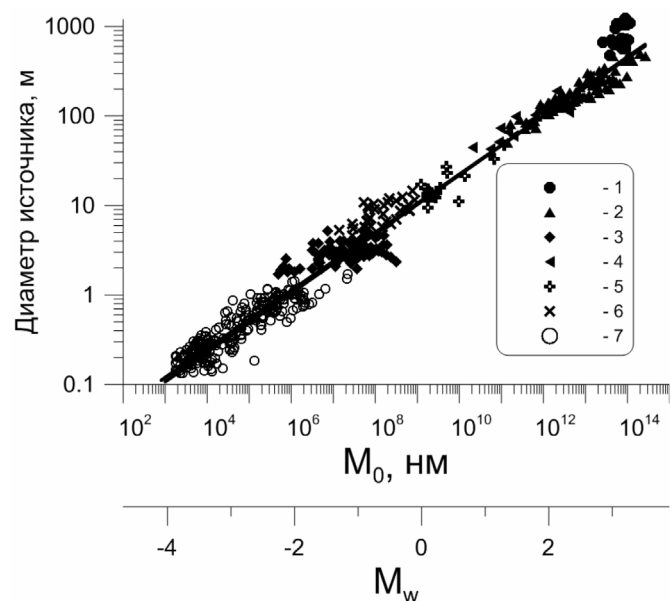


Рис. 5. Зависимость диаметра источника от величины сейсмического момента M_0 и моментной магнитуды M_w . Значки – результаты наблюдений по различным литературным данным, линия – наилучшее приближение данных (рисунок из [5])

Заключение

В условиях слабой сейсмической активности и высокого фона помех используемые последние десятилетия сети автономных сейсмических станций на участках размещения радиационно опасных

объектов, как правило, не обеспечивают выполнение требований нормативных документов к обоснованию безопасности зданий и сооружений АЭС и ХОЯТ по результатам сейсмологических наблюдений. Для устранения этого недостатка необходимо перейти на использование систем, способных регистрировать слабые землетрясения с магнитудами вплоть до отрицательных.

Работа выполнена в рамках Государственного

задания ФБУ «НТЦ ЯРБ» на 2014 год «Анализ обоснований безопасности зданий и сооружений атомных станций и хранилищ отработавшего ядерного топлива по результатам мониторинговых наблюдений для научно-технического обеспечения лицензирования эксплуатации атомных станций»; работа по анализу слабых сигналов выполнена при поддержке гранта РФФИ 13-05-00950.

Список литературы

1. Аки К., Ричардс П. Количественная сейсмология: Теория и методы. Т. 1, 2. М., Мир, 1982.
2. Беседина А.Н., Кочарян Г.Г., Пронюк О.А. Масштабный эффект при мониторинге слабой сейсмичности. Динамические процессы в геосферах. Вып. 4. М., ГЕОС, 2013.
3. Бугаев Е.Г., Кишкина С.Б., Санина И.А. Особенности сейсмологического мониторинга территории объектов использования атомной энергии на Восточно-европейской платформе, Ядерная и радиационная безопасность, № 3 (65), 2012.
4. Землетрясения Северной Евразии. Обнинск, ГС РАН, 2008.
5. Кочарян Г.Г. Масштабный эффект в сеймотектонике. Геодинамика и тектонофизика, Том 5, № 2, 2014.
6. Маловичко А.А., Габсатарова И.П., Пойгина С.Г., Чепкунас Л.С. Современная сейсмичность Восточно-Европейской платформы. Сейсмологические наблюдения на территории Москвы и московской области. Материалы научной конференции. Обнинск, ГС РАН, 2012.
7. Надёжка Л.И., Орлов Р.А., Сафронич И.Н., Пивоваров С.П., Ипполитов О.М., Золототрубова Э.И. Воронежский кристаллический массив. Землетрясения Северной Евразии, Обнинск, 2008.
8. Огаджанов В.А., Маслова М.Ю., Огаджанов А.В. Саратовский геодинамический полигон. Землетрясения Северной Евразии. Обнинск, 2008.
9. Saari J. An overview of possible applications of microearthquake monitoring at the repository site of spent nuclear fuel in Finland. Helsinki, Finland. December 1999.
10. Saari J., Malm M. Seismic Network at the Olkiluoto Site and Microearthquake Observations in 2002–2013 // Working Report 2014-20, May 2014.
11. Oye V., Bungum H., and Roth M. Source Parameters and Scaling Relations for Mining-Related Seismicity within the Pyhäälmi Ore Mine, Finland, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 95, No. 3, pp. 1011–1026, June 2005.

