

ОПЫТ РАБОТЫ МАЛОАПЕРТУРНЫХ ГРУПП ИДГ РАН ПО СЕЙСМОЛОГИЧЕСКОМУ МОНИТОРИНГУ ПЛОЩАДОК АЭС

С.Б. Кишкина, Д.Н. Краснощеков, Д.Н. Локтев, И.А. Санина

В 2009–2014 годах командой ИДГ РАН проведены краткосрочные сейсмологические наблюдения с помощью малоапертурных сейсмических групп на разных площадках АЭС. Результаты подтвердили существование на платформенной территории России слабых тектонических событий с магнитудами около и ниже нуля. Методика чувствительного мониторинга позволит в более короткие сроки, по сравнению с вероятностью возникновения заметных тектонических землетрясений в платформенной области, собрать представительную статистику сейсмичности территории и оценить степень геодинамической стабильности контролируемого района. В коллективе развивается и отрабатывается метод сейсмического мониторинга районов расположения особо ответственных объектов с помощью малоапертурной группы.

Введение

Мировая практика свидетельствует не просто о возможности регистрации и оценки параметров источников слабых сейсмических сигналов с магнитудами вплоть до отрицательных значений, но и о возможности их сопоставления на разных масштабных уровнях [Кочарян, 2014]. Что существенно обогащает возможности использования сейсмологических данных при изучении параметров сейсмического режима и решении задачи оценки сейсмической опасности на основе вероятностного подхода в пределах слабоактивных территорий [Бугаев, Кишкина, 2014].

Наиболее распространенные пути повышения чувствительности сейсмологических наблюдений – это существенное уплотнение сейсмических сетей [Urbanic and Young, 1993; Saari, 1999; Sivakumar, 2008; Маловичко и др., 2008; 2010], заглупление сейсмометров на большие глубины [Oye, 2005], использование сетей, состоящих из малоапертурных групп сейсмических датчиков [Wust-Bloch, & Joswig, 2004] или отдельных малоапертурных групп [Hiemer et al., 2012; Gibowicz, 2008; Málek et al., 2009; Pirlí et al., 2004; Braun et al., 2004]. В год чувствительные системы мониторинга регистрируют от сотни до нескольких тысяч событий, что отвечает требованию получения статистически представительных выборок данных.

В современном мире локальный сейсмологический мониторинг повсеместно применяется, например, на объектах добычи полезных ископаемых, так как он позволяет оценивать поведение горного массива в окрестности выемки пород (углеводородов), оценивать степень стабильности технологических сооружений. Один из примеров организации подобного мониторинга – система, установленная вокруг глубокой рудной шахты в Финляндии, где сейсмические датчики располагались на глубине от 0 до 1,5 км. В течение 15 месяцев наблюдений система зарегистрировала около 1500 событий с магнитудами от $-1,8$ до $1,2$. Полученные данные продемонстрировали самоподобие событий для диапазона магнитуд от 0 до -1 [Oye, 2005]. При невозможности заглупить датчики, прибегают к установке малоапертурной группы или сети малоапертурных групп. Так, группы, состоящие из трехкомпонентных станций, подтвердили заметное повышение чувствительности на $0,4-0,8$ единиц магнитуды по сравнению с существующими сетями сейсмологических наблюдений [Pirlí et al., 2004; Braun et al., 2004] и, соответственно, позволили обнаруживать события с магнитудами вплоть до отрицательных, что существенно повысило статистику регистрируемых событий [Hiemer et al., 2012; Málek et al., 2009]. Регистрация слабой сейсмичности позволяет составить графики повторяемости для отдельных контролируемых областей. В связи с чередованием фаз затишья и активности, сейсмологический мониторинг должен проводиться в течение длительных отрезков времени, по крайней мере, в течение 10–20 лет [Saari, 1999]. Анализ многочисленных вновь полученных данных позволил уверенно установить наличие очагов слабых землетрясений или существенное увеличение их количества в местах, традиционно считавшихся асейсмичными [Надежка и др., 2007; Михайлова и др., 2012; Ellsworth, 2013]. Появление таких данных связано как с техногенным воздействием на недра [Ellsworth, 2013], так, очевидно, и с повышением чувствительности систем регистрации сейсмических событий [Saari, 1999; Надежка и др., 2007; Михайлова и др., 2012].

Обобщение анализа результатов ведущихся на площадках строящихся АЭС сейсмологических наблюдений показало, что применяемая сегодня методология

использования автономных сейсмических станций с расстоянием между пунктами наблюдения 15–40 км не позволяет достичь цели изучения параметров сейсмического режима и решения задачи оценки сейсмической опасности в обозримые временные сроки; в первую очередь в условиях слабоактивной территории и высокого фона помех, характерных для европейской части России. Сложившаяся ситуация требует разработки новых методов мониторинга: более чувствительных, соответствующих мировому уровню развития сейсмической аппаратуры и алгоритмов обработки сейсмологических данных [Бугаев, Кишкина, Санина, 2012].

Результаты полевых работ временных малоапертурных групп ИДГ РАН

Классика проведения сейсмологических наблюдений основывается на установке аппаратуры на выходах коренных пород. При необходимости вести регистрацию на мощных осадочных породах и в условиях, не позволяющих установить в радиусе 10 км от интересующего объекта несколько десятков сейсмических станций, заглубленных в скважины на несколько сот метров, в ИДГ РАН был выбран метод малоапертурной группы. В центре и на двух концентрических окружностях радиуса 800–900 и 300–400 м, соответственно, устанавливались трехкомпонентные сейсмические датчики (всего девять пунктов наблюдения) с единой меткой времени. По возможности, с целью выделения сигналов, связанных с атмосферными процессами, на внешнем контуре группы располагались инфразвуковые датчики. Схемы установки и основные аппаратурные характеристики приведены в предыдущих статьях [Санина и др., 2011; Кишкина и др., 2010; 2012]

Работы, проведенные подобными сейсмическими малоапертурными группами ИДГ РАН на площадках Ленинградской, Нижегородской, Курской и Белоярской АЭС, показали, что даже в сложных для точной локации и детерминации сигналов условиях регистрации (большая мощность слоев осадочных пород, высокий уровень местных антропогенных шумов) методика группирования датчиков для целей выделения и детерминации, в первую очередь, слабых сейсмических сигналов с магнитудами $M_b < 2$ существенно повышает качество работы [Санина и др., 2011]. Так, регистрация сейсмических событий в одном и том же районе (в районе радиуса 300 км вокруг площадки Нижегородской АЭС; средний уровень естественных микросейсмических колебаний 0,1–0,2 мкм/с) продемонстрировала, что среднее количество событий, зарегистрированных традиционной редкой сейсмологической сетью, в несколько раз ниже, чем число событий, зарегистрированных малоапертурной сейсмической группой: группа регистрировала в среднем 70 сигналов в месяц, тогда как сеть около 10. Причем, в данном случае речь идет о сейсмических сигналах от карьерных взрывов, то есть довольно заметных сейсмических источниках с магнитудами $M_b = 2–3,5$. Этот факт свидетельствует о том, что, если в условиях регистрации на гранитном основании группа повышает чувствительность регистрации на 0,4–0,8 единиц магнитуды, то в условиях рыхлых отложений это соотношение может достигать до 1,5.

Отдельно следует отметить, что регистрация и определение параметров сигналов, вызванных карьерными взрывами, может и должна служить основной оценкой работоспособности системы сейсмологического мониторинга; особенно в платформенных условиях, при достаточно низкой вероятности возникновения заметных

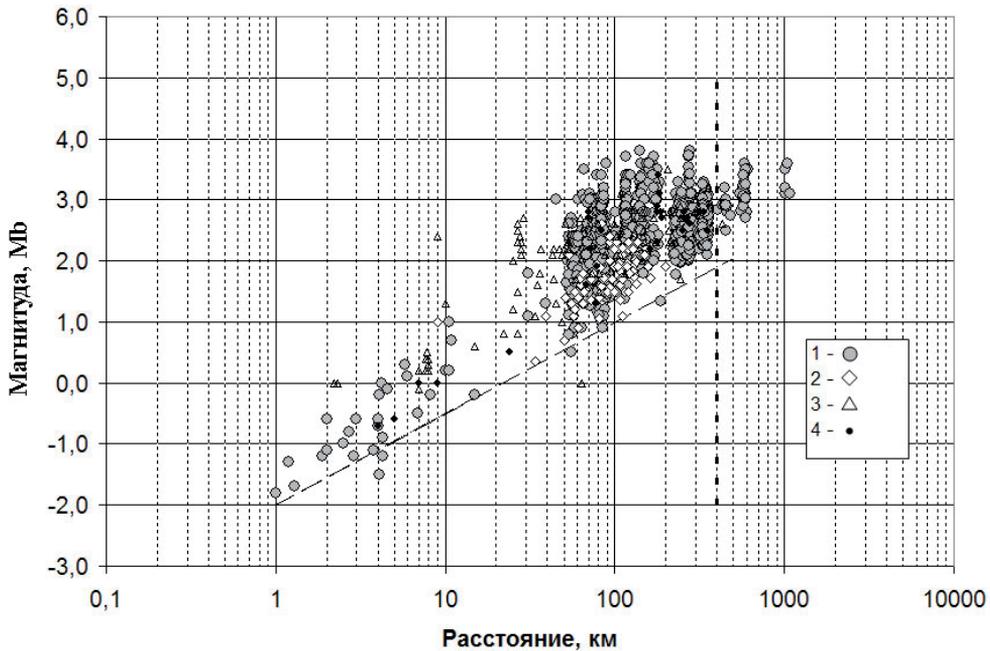


Рис. 1. Зависимость магнитуд сигналов, зарегистрированных группами ИДГ РАН в районах площадок АЭС, от расстояния до источника. 1 – НижАЭС, 2 – ЛАЭС-2, 3 – Белгородская АЭС, 4 – Курская АЭС. Вертикальным пунктиром отмечено расстояние, свыше которого события уверенно лоцируются только с привлечением данных группы «Михнево»

тектонических событий [Надежка и др., 2007; Кишкина, Бугаев, 2014]. В качестве примера подобной оценки приведена зависимость магнитуд источников сигналов, зарегистрированных группами ИДГ РАН в районе нескольких площадок АЭС, от расстояния до центральной точки группы (рис. 1). Представлены все сигналы от местных источников и карьерных взрывов. Основную массу данных составляют источники сигналов, зарегистрированных на Нижегородской АЭС, так как в этом районе наблюдения велись дольше всего: в течение летних месяцев в 2011–2014 гг. Вертикальным пунктиром отмечено расстояние, на котором события уверенно лоцируются только с привлечением данных группы «Михнево». Пунктир представляет зависимость, обозначающую чувствительность группы в имеющихся условиях: $Mb_{\min} = 1,5 \log_{10}(R) - 2,0$. Для Нижегородской АЭС (значки 1) группу источников сигналов на расстояниях 50–400 км – а это основная масса сигналов – составляют сигналы, вызванные карьерными взрывами. В районе радиусом 400 км от малоапертурной группы работает около 25 карьеров (23–31 в разные годы наблюдений). Ближе 50 км карьеров нет; все источники, расположенные на более близких расстояниях, – местные эндогенные или экзогенные события.

Полученные данные позволяют утверждать о достаточно уверенной регистрации группой, установленной на рыхлых грунтах, событий с магнитудами $Mb \geq 1$ на расстояниях вплоть до 90 км; 1,5 – до 200 км; 1,7 (2,0) – на удалении до 300 км. Минимальные регистрируемые магнитуды соответствуют значениям 0 на расстоянии 10 км; –1 на расстоянии до 4 км. Отметим, что эти результаты заметно скромнее,

чем сейсмологические наблюдения в условиях гранитного массива: система сейсмического мониторинга ядерного захоронения в Финляндии, например, на расстояниях 5–10 км уверенно регистрировала события с локальной магнитудой до -1 ; и на расстояниях 25–30 км – события с магнитудой 0 [Saarii, 1999]. Но даже такие относительно скромные «платформенные» данные подтверждают возможность вести сейсмический мониторинг объекта с расчетом на получение фактического материала в обозримые сроки. Теоретически, в районе радиусом 20 км от площадки ЛАЭС-2, например, в год может произойти одно сейсмическое событие с $M_b = 1$ [Бугаев и др., 2012], которое с большой степенью вероятности будет зарегистрировано выбранной системой мониторинга (при условии её постоянной, а не сезонной работы), и ещё десятки событий с отрицательной магнитудой, часть из которых также может быть зарегистрирована малоапертурной группой.

Еще один факт, свидетельствующий об эффективности использования сейсмической группы для контроля стабильности параметров сейсмической обстановки, – это оценка магнитуды проектного и максимального расчетного землетрясения (на примере площадки Нижегородской АЭС), полученная по результатам регистрации близких микроземлетрясений мониторинговых наблюдений малоапертурной группой. Значение $M_{МПЗ} = 5,3$, полученное на основе учета зарегистрированных микрособытий, оказалось достаточно близким к величине максимальной магнитуды $M_{\max} = 5,0$, оцененной по геодинамическим данным и заложенной в проектные основы объекта. График повторяемости рассчитан с учетом распределения кумулятивного количества событий в один год на площади 10 км²; учтены радиусы представительности источников сигналов разных магнитуд. Здесь следует отметить, что оценка магнитуд слабых сигналов сопряжена с трудностями. С течением времени, по мере увеличения количества зарегистрированных событий с четко определенной

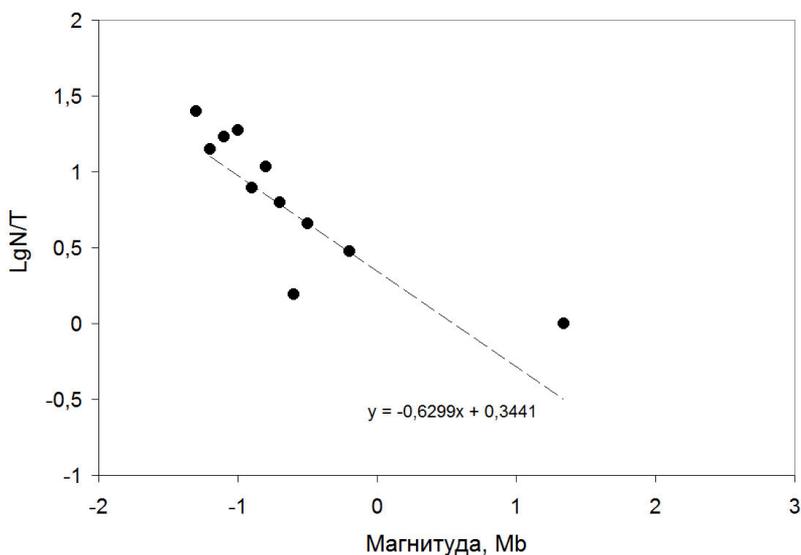


Рис. 2. Кумулятивный график повторяемости магнитуд эндогенных событий ближней зоны площадки Нижегородской АЭС, приведенный к 1 году и к площади 1000 км².
Период наблюдений: 2,5 месяца/2011 год; 3 месяца/2012 год; 4 месяца/2013 год; 3 месяца/2014 год

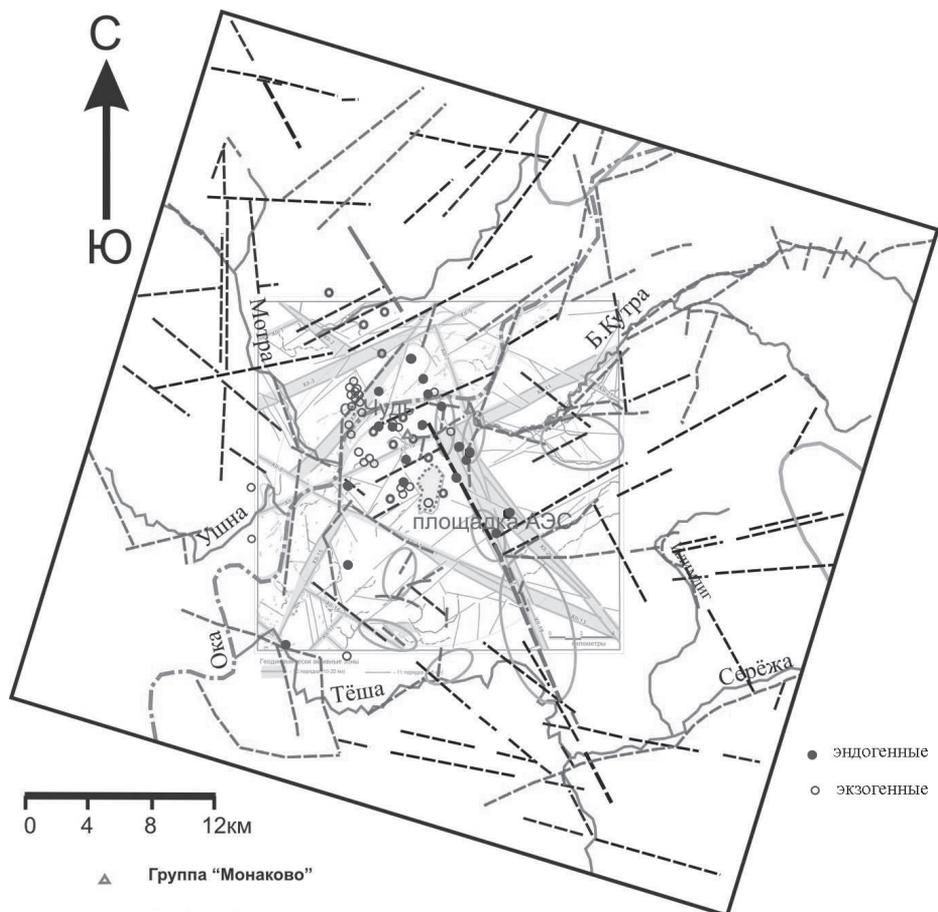


Рис. 3. Сопоставление результатов анализа сейсмических данных с картами линейментов [Иванченко, 2012]. Линейменты, выделенные по результатам визуального и автоматизированного дешифрирования космоснимка, отмечены прямыми пунктирами, овалами выделены зоны карста. Треугольником отмечено местоположение малоапертурной сейсмической группы «Монаково»; кружки – источники эндогенных сейсмических событий; окружности – источники местных экзогенных сейсмических событий. Разделение по масштабу событий на схеме не приводится ($-1 < M < 1$)

природой источника, может появиться возможность для уточнения сделанных ранее энергетических оценок обнаруженных источников сейсмических событий: вероятно, что из-за частотных ограничений используемой аппаратуры энергия слабых событий недооценивается.

По результатам проведенных работ можно говорить и о первых признаках подтверждения тезиса о пространственной привязке источников сейсмических событий к геодинамическим зонам [Rubin et al., 1999; Кочарян и др., 2010]. Схема расположения источников сейсмических событий, зарегистрированных малоапертурной сейсмической группой «Сосновый Бор» (площадка Ленинградское АЭС-2) в 2009 и 2010 годах приведена в [Кишкина и др., 2010]. Было показано, что локализация основного количества источников событий контролируется зоной дина-

мического влияния поперечных зон концентрации напряжений. Приуроченность к структурам различного ранга продемонстрировали и источники местных сейсмических событий, зарегистрированных группой «Монаково» в районе площадки Нижегородской АЭС (см. рис. 4) [Санина и др., 2011; Кишкина и др., 2012; Иванченко, 2012]. Основная масса источников попадает в область динамического влияния геодинамической зоны XIV порядка СЗ–ЮВ простирания, рассматриваемой в проектных основах в качестве основной зоны, представляющей потенциальную опасность для площадки АЭС. Часть источников, расположенных непосредственно в осевой части зоны, являются, безусловно, эндогенными с ненулевой глубиной. Однако большая часть событий, очевидно, имеет экзогенный или даже сме-

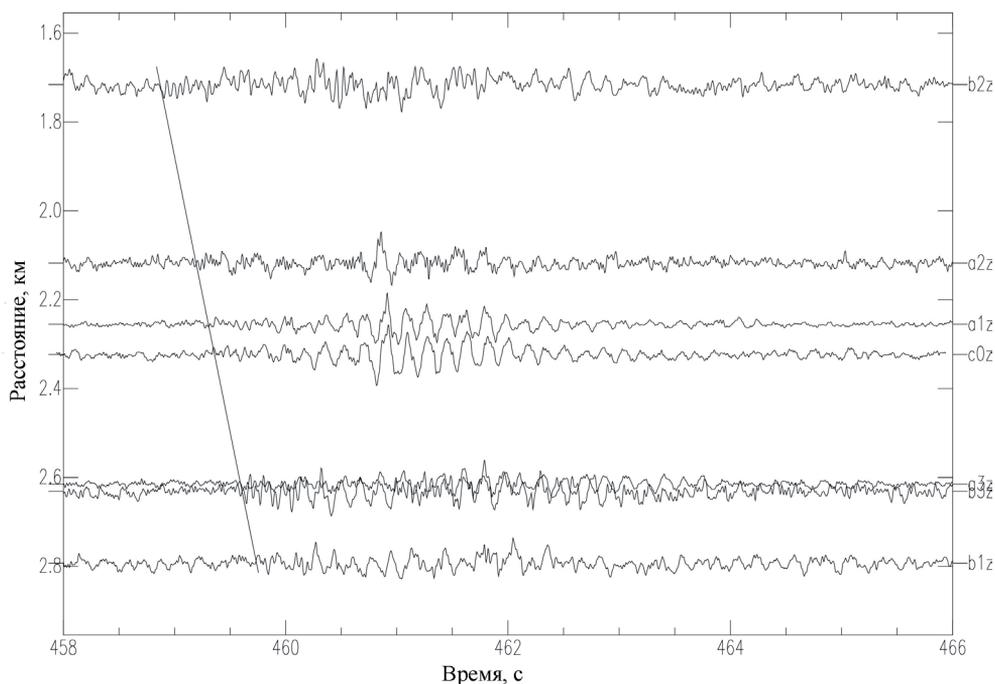


Рис. 4. Анализ сейсмического сигнала от местного события 23.08.2014 ($M_b = -1,1$) на расстоянии 2,5 км от центральной точки группы (центр координат). Слева – монтаж вертикальных составляющих всех пунктов группы. Справа – диаграмма медленности (составляющие медленности по осям x и y даны в с/градус)

шанный генезис, так как они находятся в пределах долинного комплекса р. Оки и ее притоков, где в настоящее время идут активные эрозионные и карстовые процессы [Иванченко, 2012]

Следует отметить, что анализу сигналов, источники которых предположительно могли относиться к местным событиям, было уделено особое внимание. К этой категории первоначально относились все сигналы, не попавшие ни в одну из проанализированных категорий: далекие и удаленные землетрясения, акустические и техногенные сигналы, сигналы от карьерных взрывов. Для локации и установления природы источников таких сигналов на первом этапе использовался поляризационный анализ трёхкомпонентной записи (с оценкой собственных векторов и чисел ковариационной матрицы, а также линейности колебаний, угла подхода, и азимута на источник) и традиционный для группирования метод формирования луча. Для повышения соотношения сигнал/шум применялась частотная фильтрация. На рис. 4, а приведен пример записей группы слабого локального события с признаками вступления регулярных волн. Приведённая на рис. 4, б диаграмма медленности была рассчитана по отфильтрованным вертикальным каналам группы в секундном окне вокруг 461 с. Выделенный максимум с азимутом на эпицентр около 135 градусов и медленностью порядка 45 с/градус соответствует, предположительно, поперечным волнам. Источник сигнала отнесен к эндогенным.

Всего в ближней зоне площадки Нижегородской АЭС группой было зарегистрировано (за 12,5 месяцев в общей сложности) 73 сейсмических сигнала. Источники 19 событий отнесены к эндогенным (в случае обоснованных сомнений природа источника относилась к эндогенной, исходя из консервативности подхода ввиду потенциальной опасности контролируемого объекта). Источники 54 событий по совокупности признаков (низкой кажущейся скорости, слабой разделенности фаз или невозможности их разделения, по приуроченности к долинному комплексу р. Оки или к покрытому карсту поймы) отнесены к экзогенным.

Заключение

Частные задачи локальных сейсмологических наблюдений должны быть направлены на получение данных, характеризующих сейсмологические условия размещения АЭС, необходимых и достаточных для оценки параметров сейсмического режима района размещения. В условиях таких слабоактивных районов как ВЕП особенно актуально регистрировать слабые и микросейсмические события. Многолетний опыт сейсмологического контроля путем установки локальных сейсмических сетей на базе в несколько десятков километров продемонстрировал, что данным способом невозможно зарегистрировать события с магнитудой $M_b < 1$, а чаще всего и $M_b < 2,5$, в районе с высоким уровнем антропогенных шумов и большим слоем рыхлых отложений. В условиях сейсмически слабоактивных и среднеактивных областей одного такого события можно ожидать от года до нескольких лет, что делает мониторинг локальными сетями не только экономически невыгодным, но и практически бесполезным. Мировой опыт демонстрирует, что одним из методов, увеличивающих чувствительность сейсмологических наблюдений, является метод группирования датчиков.

Опыт работы временных малоапертурных групп ИДГ РАН даже на достаточно коротких временных интервалах подтвердил существование на платформенной территории России слабых тектонических событий с магнитудами около и ниже

нуля. Таким образом, продемонстрирована не только необходимость, но и возможность в условиях платформы регистрировать сигналы от слабых сейсмических источников. Подобная методика мониторинга позволит в более короткие сроки, по сравнению с вероятностью возникновения заметных тектонических землетрясений в платформенной области, собрать представительную статистику сейсмичности территории и оценить степень геодинамической стабильности контролируемого района.

Литература

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.* № 3 (65). 2012. С. 1–9.

Иванченко Г.Н. «Интерпретация результатов автоматизированного дешифрирования данных дистанционного зондирования при оценке современной геодинамической активности». Дис. к.ф.-м.н. М.: 2012.

Кишкина С.Б., Локтев Д.Н., Санина И.А., Волосов С.Г., Иванченко Г.Н., Константиновская Н.Л., Нестеркина М.А., Усольцева О.А. Сейсмологический мониторинг проектируемой площадки Нижегородской АЭС с использованием малоапертурной группы // *Динамические процессы в геосферах: сборник научных трудов ИДГ РАН.* Выпуск 3. М.: ГЕОС, 2012. С. 57–65.

Кишкина С.Б., Кочарян Г.Г., Локтев Д.Н., Санина И.А. и др. Сейсмический мониторинг территории Ленинградской АЭС-2 с использованием малоапертурной группы // *Динамические процессы в геосферах: сборник научных трудов ИДГ РАН.* М.: ГЕОС, 2010.

Кишкина С.Б., Бугаев Е.Г. Контроль сейсмотехники объектов атомной энергетики // *Вестник НЯЦ РК.* Выпуск 2(58), июнь 2014, С. 153–163.

Кочарян Г.Г., Кишкина С.Б., Остапчук А.А. Сейсмический портрет разломной зоны. Что может дать анализ тонкой структуры пространственного расположения очагов слабых землетрясений? // *Геодинамика и тектонофизика.* 2010. Т. 1, 4. С. 419–440.

Михайлова Н.Н., Синева З.И., Соколова И.Н. Казахстанская система мониторинга института геофизических исследований национального ядерного центра и ее возможности // *Каталог сейсмопрогностических наблюдений на территории Азербайджана,* 2012. С. 329–348.

Санина И.А., Кишкина С.Б., Локтев Д.Н., Нестеркина М.А., Константиновская Н.Л., Волосов С.Г. Опыт сейсмического мониторинга площадок размещения АЭС на Восточно-Европейской платформе // *Геодинамика* №2 (11). 2011. Львов. Изд-во Львовский политех. С. 275–278.

Braun T, Schweitzer J, Azzara R.M., Piccinini D., Cocco M., Boschi E. Results from the temporary installation of a small aperture seismic array in the Central Apennines and its merits for local event detection and location capabilities // *Annals of Geophysics,* Vol. 47, N. 5, October 2004. P. 1557–1568.

Ellsworth W.L. Injection-induced earthquakes // *Science* (2013). 341, 1225942 DOI: 10.1126/science.1225942.

Hardy H.R. Jr., Belesky R.M., Mrugala M., Kimble E.J., Hager M.E. A study to monitor microseismic activity to detect sinkholes. Pennsylvania State Univ., Dept. of Mineral Engineering. Final Report. 1986. 202 p.

Hiemer S., Rössler D., Scherbaum F. Monitoring the West Bohemian Earthquake Swarm in 2008/2009 by a Temporary Small-Aperture Seismic Array // *Journal of Seismology*, 2012. DOI: 10.1007/s10950-011-9256-5.

Jouni Saari. An overview of possible applications of microearthquake monitoring at the repository site of spent nuclear fuel in Finland. Helsinki, Finland. December 1999.

Málek J., Brož M., Stejskal V., Štrunc J. Small-aperture seismic arrays: instruments and detectability // *Advanced Industrial Microseismic Monitoring AIM*, Prague, 2009.

Oncel A.O., Wilson T.Y., Nishizawa O., Size scaling relationships in the active fault networks of Japan and their correlation with Gutenberg-Richter b values // *Journal of geophysical research*, vol. 106, NO.B10, PAGES 21,827-21,841, October 10, 2001.

Oye V., Bungum H., 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.

Pirli, M., Voulgaris, N., Alexopoulos, J. and Makropoulos, K., 2004. Installation and preliminary results from a small aperture seismic array in Tripoli, Greece // *Bul. Geol. Soc. Greece*, V.XXXVI, 2004, p. 1499–1508.

Rubin A.M., Gillard D., Got J.L. Streaks of microearthquakes along creeping faults // *Nature*. 1999. V. 400. P. 635–641.