

СЕЙСМОЛОГИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ ПРОЕКТИРУЕМОЙ ПЛОЩАДКИ НИЖЕГОРОДСКОЙ АЭС С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МАЛОАПЕРТУРНОЙ ГРУППЫ

***С.Б. Кишкина, Д.Н. Локтев, И.А. Санина, С.Г. Волосов,
Г.Н. Иванченко, Н.Л. Константиновская, М.А. Нестеркина,
О.А. Усольцева***

В статье рассмотрены основные задачи и первые результаты, полученные в ходе сейсмологического мониторинга площадки Нижегородской АЭС на участках залегания мощных осадочных толщ и при достаточно высокой антропогенной нагрузке, т.е. в условиях, существенно усложняющих выделение сигнала на уровне помех, определение его природы и основных параметров.

Введение

С целью сейсмического контроля стабильности геосреды в ближнем районе проектируемой площадки Нижегородской АЭС (с. Монаково, Навашинский район Нижегородской области) в 2011 году командой ИДГ РАН были проведены краткосрочные сейсмологические наблюдения в заданном районе.

В течение нескольких предыдущих лет наблюдения в заданном районе велись сетью из пяти сейсмических станций, установленных на расстояниях 20–40 км друг от друга с заявленной минимальной регистрируемой локальной магнитудой

2,2 [Предварительный..., 2010]. Оценим, какова вероятность возникновения сейсмического события подобной мощности в исследуемом районе.

Если принять, что все события, отмеченные в тех или иных исторических источниках за 1806–1897 гг. являются землетрясениями (диапазон магнитуд оценивается специалистами от 0,7 до 5,3) [Татевосян и др., 2003; Предварительный..., 2010], то период вероятного возникновения события с магнитудой 2,2 составит более 5 лет. Поскольку такая оценка учитывает возникновение события практически на всей территории ВЕП, при нормировании на интересующую нас площадь, вероятность возникновения события понизится, а период его вероятного возникновения, соответственно, возрастет.

Сведения о современных тектонических событиях в районе Нижегородской области также достаточно противоречивы, т.к. многие события, занесенные в каталоги землетрясений Восточно-европейской платформы, сегодня «переведены» в разряд техногенных или их статус оспаривается. Если принять наиболее осторожный вариант (то есть что все события, отнесенные к тектоническим или «предположительно тектоническим» [Предварительный..., 2010] – это землетрясения), то оценки ожидания события с магнитудой 2,2 составят полтора года; при этом в течение года есть шанс зарегистрировать 17 событий с магнитудой –1.

Очевидно, что именно от подобных оценок следует отталкиваться при организации и проведении сейсмологического мониторинга в платформенных условиях: для уверенного контроля территории в районе ВЕП система мониторинга должна обеспечивать регистрацию слабых и очень слабых сейсмических событий [Бугаев, Кишкина, 2009]. Только такой подход позволит в обозримые сроки накопить представительную статистику возникновения сейсмических источников в условиях слабоактивных территорий. А анализ частоты их возникновения и приуроченности к выделенным линеаментам может служить основанием для оценки степени геодинамической стабильности рассматриваемого участка среды. Таким образом, одна из основных задач сейсмологического мониторинга в платформенных условиях сводится к регистрации и идентификации микроземлетрясений в ближнем районе площадки АС.

Постановка задачи – проведение сейсмического мониторинга проектируемой площадки Нижегородской АЭС – обуславливает необходимость проведения сейсмической регистрации на участках залегания мощных осадочных толщ и при достаточно высокой антропогенной нагрузке, то есть в условиях, существенно усложняющих выделение сигнала на уровне помех, определение его природы (естественный/антропогенный) и основных параметров (местоположение источника, энергетика и др.). В таких сложных для сейсмологических наблюдений условиях сеть одиночных станций не справляется с задачей обнаружения и локализации сигналов невысокой мощности. На основании опыта долговременной работы в условиях мощных осадочных пород сейсмической группы «Михнево» ИДГ РАН, сейсмический мониторинг ближней зоны площадки Нижегородской АЭС был организован на базе малоапертурной сейсмической группы [Санина и др., 2011].

Условия регистрации и аппаратура

Группа сейсмических станций, установленная для регистрации сейсмических событий в ближнем районе Нижегородской АЭС, включала в себя 9 пунктов наблюдения с общим сигналом времени, одинаковой системой регистрации и одина-

ковой для всех пунктов аппаратурой. Линейный размер расстановки станций (апертура) составлял около 1 км, что определяет класс установленной сейсмической группы как «малоапертурная». Для установки было выбрано место в окрестности села Чудь Нижегородской области Навашинского района, в 3 километрах от площадки АС (рис. 1). Место характеризуется достаточно низкой антропогенной нагрузкой: ближайшая дорога с интенсивным автомобильным движением находится в 5–6 км, ближайшая железнодорожная ветка в 26 км; в непосредственной близости нет промышленных предприятий. Группа располагается в зоне динамического влияния активизированной линейаментной зоны СЗ-ЮВ простирания, вдоль которой располагаются карстовые формы, в непосредственной близости от оползневого склона борта долины р. Оки, что позволяет контролировать возможные опасные экзогенные процессы, в том числе карстовые обрушения. Группа получила имя «Монаково».

С 17 июня по 30 августа 2011 года велась непрерывная регистрация сейсмических колебаний грунта одновременно всеми приборами группы, установленными на двух концентрических окружностях с радиусами 300 и 700 м. На всех пунктах регистрации установлены 24-разрядные регистраторы Reftek-130, приемники GPS; частота опроса 100 Гц. Динамический диапазон сейсмических каналов 120–140 дБ. Датчики установлены на бетонные плиты, заглубленные в грунт на 0,5–0,7 метров, защищены от воздействия ветра и влаги. Каждая точка оснащена регистратором/накопителем данных и временными источниками питания (аккумуляторами).

Результаты анализа данных

Путем обработки всего ансамбля данных [Санина и др., 2009] решалась основная задача – обнаружение и выделение сейсмических сигналов, одномоментно фиксируемых большинством пунктов регистрации.



Рис. 1. Схема размещения малоапертурной сейсмической группы «Монаково» на окраине села Чудь (Нижегородская область, Навашинский район). Расположение группы выделено кружком без соблюдения масштаба.

В первую очередь выделялись и исключались из анализа сигналы, природа которых явно определялась как техногенная. Как правило, это были сигналы от проходящего автотранспорта (они хорошо отсеиваются, благодаря компактной установке сейсмических датчиков в группе) и достаточно продолжительные монохроматические сигналы, вызванные работой в окрестности группы каких-либо генераторных установок или другого оборудования. Все остальные сигналы подвергались анализу, в ходе которого оценивались основные амплитудные параметры сигналов и местоположение их источников, проводился спектральный, поляризационный и фазовый анализ, и т.д.

Оценивались и основные характеристики фона: уровень микросейсмических колебаний на площадке установки малоапертурной сейсмической группы «Монаково» в дневные часы не превышает 0,2 микрон/с, ночью – 0,1 микрон/с.

В результате проведенной работы было зарегистрировано около 600 сигналов. Среди них 63 сейсмических сигнала, вызванных телесеизмическими землетрясениями, 2 сигнала от региональных землетрясений (Кавказ); более 300 сигналов, источники которых отнесены к источникам акустической природы; 171 сигнал, источниками которых определены взрывы; 18 сигналов, источниками которых по косвенным признакам могут служить карьерные взрывы, но карьеры в месте локализации не обнаружены. За время работы малоапертурной сейсмической группы «Монаково» зарегистрировано 38 сейсмических сигналов, природа которых по имеющимся на сегодня данным не может считаться техногенной: источники 16 из них определены в ближней зоне (до 30 км от площадки АС) и отнесены к природным событиям. Местоположение источников оставшихся 22 сигналов на данный момент не может быть определено с достаточной степенью точности, их природа не ясна.

Для оценки величины возможного сейсмического воздействия на площадке важно иметь достоверный график повторяемости сейсмических событий. В условиях платформы это означает необходимость регистрировать и с максимально возможной точностью определять положение источников слабых сигналов, а также

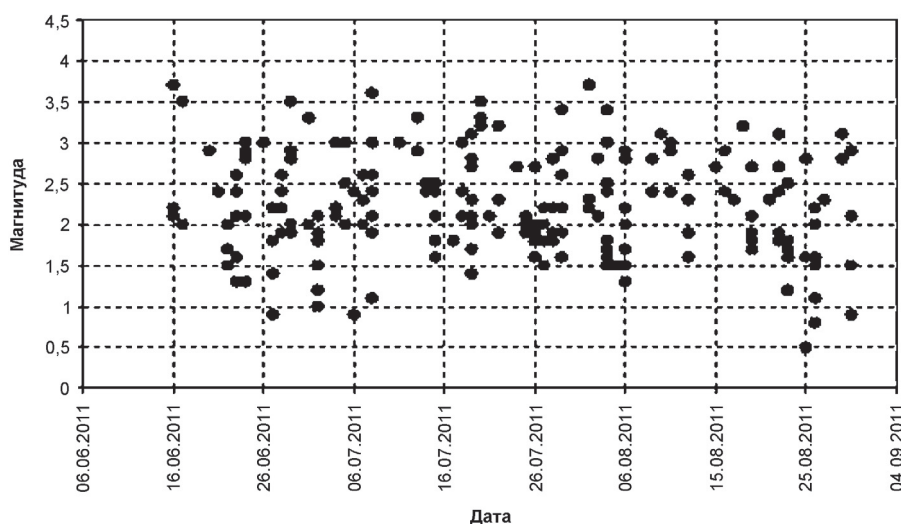


Рис. 2. Пример временной последовательности событий, определенных как карьерные взрывы. Регистрация группой «Монаково» в период с 17.06.2011 по 30.08.2011 гг.

достоверно определять их природу. В первую очередь это относится к сейсмическим сигналам, вызванным карьерными взрывами. Этот тип сигналов распространен на Восточно-Европейской платформе, так как местность насыщена горнодобывающими предприятиями. Отметим, что до сих пор существует вероятность, что в сейсмических каталогах под видом землетрясений окажутся сейсмические события, вызванные карьерными взрывами, так как на сегодняшний день они не имеют четко определенных параметров идентификации и при этом их магнитуды находятся в диапазоне потенциально возможной чувствительности регистрации региональными станциями (рис. 2). Существует и опасность «выбросить» из анализа сигнал, вызванный природным событием, посчитав, что раз событие произошло в дневное время, значит это сигнал от взрыва.

На территории Нижегородской и прилегающих к ней областей постоянно работает большое количество карьеров и групп карьеров, добыча в которых ведется взрывным способом; присутствуют и военные полигоны.

Из проанализированных сигналов источники 189 были отнесены к карьерным взрывам (или просто взрывам). Первичными определяющими признаками, позволяющими отнести источник сейсмического сигнала к взрыву, служили волновые формы сигналов и координаты события: при попадании их на карьер событие считается взрывом. Однако локация источника события, который по форме сейсмической записи может быть похож на сигнал от взрыва, не всегда указывает на какой-либо карьер. В первую очередь это может быть вызвано ошибкой локации (в случае нечеткого вступления, неявного выделения фаз; ошибок определения азимута и медленности). Во-вторых, не для всех районов доступны электронные карты достаточного разрешения. И, наконец, причина может скрываться в ошибке определения природы источника. В таких неопределенных случаях сигналы подвергались дополнительному анализу. В частности, проводился спектральный анализ, позволяющий оценить энергетическую насыщенность сигнала высокими частотами, характерными для взрывных источников, а также выявить модуляцию спектра, которая

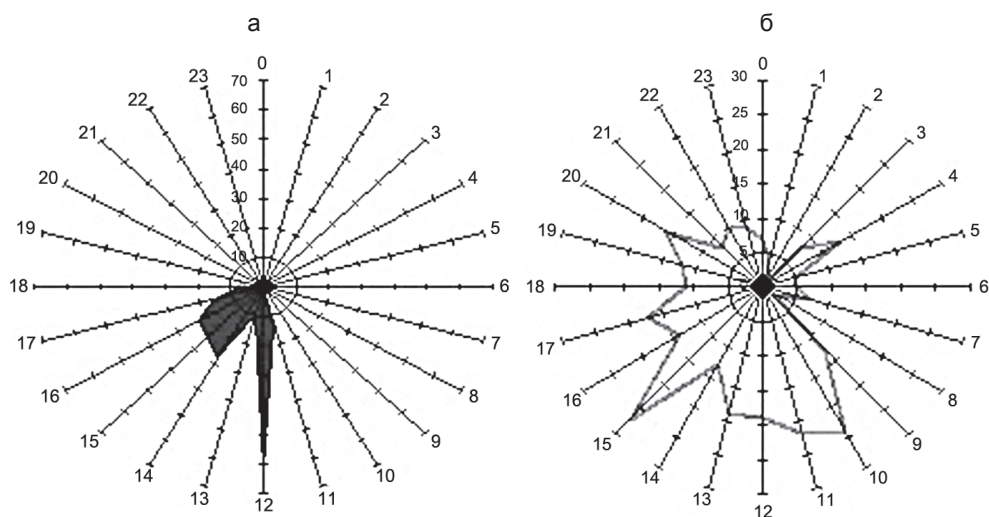


Рис. 3. Распределение по времени суток (время местное) зарегистрированных сигналов от источников, которые отнесены к акустическим (б) и определены как карьерные взрывы (а).

По кругу отмечено местное время (час), вертикальная ось – количество событий.

бывает отчетливо выражена для сигналов, источниками которых являются короткозамедленные карьерные взрывы.

Распределение по времени суток (время местное) зарегистрированных сигналов, источниками которых определены карьерные взрывы, показано на рис. 3а. Хорошо видно, что все события укладываются в достаточно узкий временной интервал, что является косвенным подтверждением правильного определения природы событий.

Регистрация и определение параметров сигналов, инициированных карьерными взрывами, может служить оценкой работоспособности используемой сейсмической аппаратуры; особенно в платформенных условиях, при достаточно низкой вероятности возникновения тектонических событий.

Около половины источников всех зарегистрированных сигналов – это акустические события, которые распознаются по кажущейся скорости распространения волны ~ 350 м/с. Одиночной станцией оценить природу источника подобного сигнала практически невозможно; только в случае его привязки по времени к какому-либо известному сейсмическому (например, взрывному) источнику. Но далеко не все акустические сигналы соотносятся по времени со взрывами. Это несовпадение хорошо видно на диаграммах временного распределения сигналов (рис. 3,а,б). На временном распределении сигналы, источниками которых определены карьерные взрывы, занимают узкий диапазон, тогда как акустические сигналы отмечаются практически в любое время суток: как дневные, так и в ночные часы (когда взрывные работы не ведутся).

По результатам локации источники 16 сигналов были отнесены к близким событиям. Это источники, которые, предположительно, относятся к природным сейсмическим событиям, их анализу было уделено особое внимание. Поскольку уровень амплитуд для фаз объемных сейсмических волн от близких источников сопоставим с уровнем микросейсмического фона, локация таких источников сопряжена с трудностями. В связи с этим, «близкие» сигналы проходили несколько процедур независимой локации.

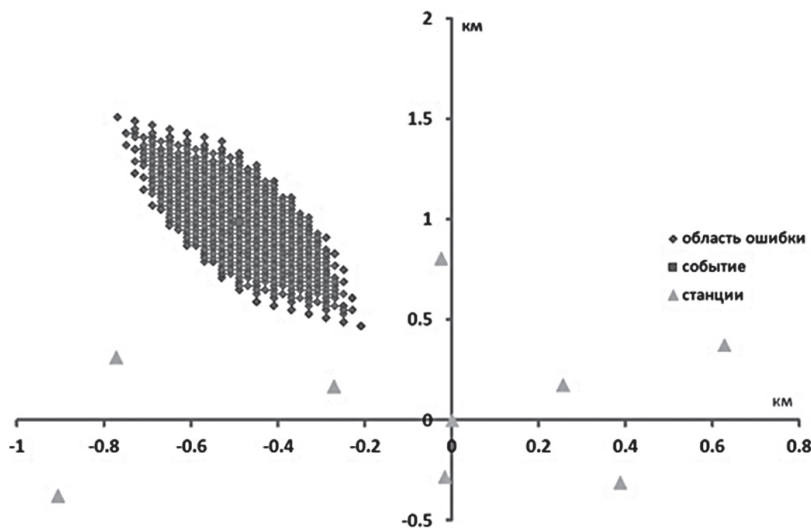


Рис. 4. Пример определения координат методом сеточного поиска (9.07.2011 09:09:59; минимальная среднеквадратичная невязка равна 0,026 с.).

За координаты события принимается геометрический центр области ошибки.

Среди используемых методических приемов обработки цифровых записей слабых сейсмических событий основное место занимал поляризационный анализ. Он применялся на трехкомпонентных записях для выделения вступлений сейсмических фаз после частотной фильтрации в подобранном диапазоне. Помимо этого определение координат близких событий (рис. 4) проводилось с помощью алгоритма, разработанного на основе метода сеточного поиска [Nelson, Vidale; 1990]. В этом случае для анализа выбиралась область 10 км² с центром, совпадающим с центральной точкой группы; область разбивалась на блоки 200×200 м (2500 блоков). Скорость волн принималась постоянной во всей области. Предполагая источник сигнала в каждом из блоков, рассчитывались времена пробега от центра блоков области к каждой точке группы. На основе определенных по сейсмограммам временам прихода волны $t_i^{\text{эксп}}$ на различные станции сейсмической группы для конкретного события и рассчитанных времен пробега $t_i^{\text{расчет}}$ определялось $T_0^{\text{соб}}$ для каждого блока области по формуле:

$$T_0^{\text{соб}} = \sum_{i=1}^N (t_i^{\text{эксп}} - t_i^{\text{расчет}}) / N,$$

где N – количество станций, зарегистрировавших событие. Затем для каждого блока области определялась среднеквадратичная невязка $RMS^{\text{соб}}$ по формуле:

$$RMS^{\text{соб}} = \left(\sum_{i=1}^N (t_i^{\text{эксп}} - t_i^{\text{расчет}} - T_0^{\text{соб}})^2 / N \right)^{1/2}.$$

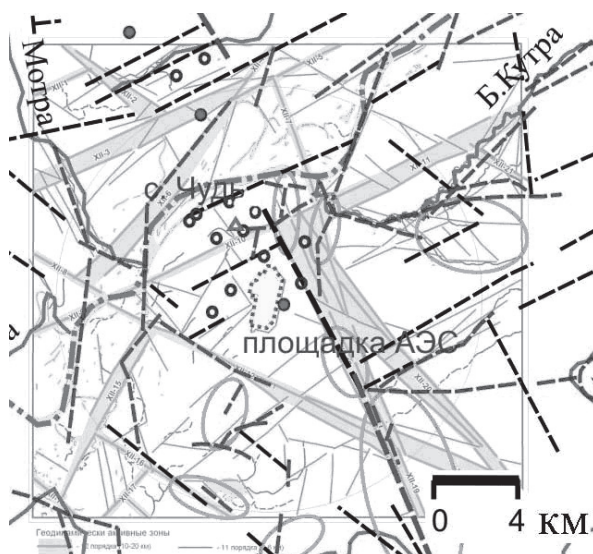


Рис. 5. Сопоставление результатов анализа сейсмических данных с картами линеаментов различного ранга, картами иерархически соподчиненных блоков.

Широкими полосами показаны геодинамически активные зоны 11 и 12 порядка [Предварительный..., 2010]. Линеаменты, выделенные по результатам дешифрирования космоснимка, отмечены штриховым пунктиром; овалами выделены зоны карста; точечным пунктиром отмечена площадка проектируемой Нижегородской АЭС. Треугольники – местоположение малоапертурной сейсмической группы «Мо-наково»; окружности – источники близких сейсмических событий, которые отнесены к природным.

В связи с малыми магнитудами разделение по масштабу событий на схеме не приводится.

Блок с наименьшим $RMS^{соб}$ считался источником сейсмических волн в первом приближении (x^1, y^1) и, в свою очередь, разбивался на меньшие участки (20×20 метров; 400 блоков). Для маленьких блоков опять проводилось вычисление $t_{i \text{ сетка } 2}^{расчет}$, $T_{0 \text{ сетка } 2}^{соб}$ и $RMS_{\text{сетка } 2}^{соб}$. Координаты центра блока (x, y) с наименьшим $RMS_{\text{сетка } 2}^{соб}$ считались координатами источника события.

Для определения значения оптимальной постоянной скорости сейсмических волн для данного района использовался метод перебора, а также метод «generalized beamforming» [Асминг, 2004]. Для близких событий значение скорости принято считать равным 2 км/с. Сейсмическая волна со скоростью 2 км/с не является первой, но выделяется как самая интенсивная с характерной формой записи на всех каналах группы. Волновые формы сейсмических сигналов от большинства событий, отнесенных к природным, весьма схожи: для них характерна длительность около 20–30 секунд и большие цуги поверхностных волн.

Сопоставление результатов анализа сейсмических данных, полученных в период работы малоапертурной сейсмической группы «Монаково» (17.06.2011–30.08.2011), с имеющимися картами линеаментов различного ранга, картами иерархически соподчиненных блоков демонстрирует (рис. 5), что значительное количество сейсмических событий в ближней зоне приурочено к линеаментам простирания ЮЗ–СВ, выделенным при автоматизированном дешифрировании; что, возможно, связано с активизацией этих зон в современном региональном поле напряжений ВЕП, которое, в свою очередь, имеет субмеридиональную ориентацию осей сжатия.

Выводы

Несомненно, малая представительность сейсмологических данных, полученных за короткий срок в 2,5 месяца, не может служить основанием для выводов о реальных параметрах графика повторяемости и оценок степени стабильности геодинамических параметров в изучаемом районе. Тем более, что наблюдения велись в карстоопасном районе, так что большая часть сигналов может иметь связь не с эндогенными, а с экзогенными карстовыми процессами; мониторинг которых, впрочем, весьма актуален в рассматриваемом районе. Однако опыт работы малоапертурной группы даже на таком коротком временном интервале продемонстрировал возможность и необходимость в условиях платформы регистрировать слабые события, которые позволяют в достаточно короткие сроки, по сравнению с вероятностью возникновения заметных тектонических событий в платформенной области, собрать представительную статистику сейсмичности территории и оценить степень геодинамической стабильности ближнего района площадки АС.

Литература

Асминг В.Э. Создание программного комплекса для автоматизации детектирования, локации и интерпретации сейсмических событий и его использование для изучения сейсмичности Северо-Западного региона: Дис. на соиск. уч. степени канд. физ.-мат. наук. М.: ИДГ РАН, 2004. 128 с.

Бугаев Е.Г., Кишкина С.Б. Метод сейсмического мониторинга территории объектов атомной энергетики на Восточно-европейской платформе // Проблемы взаимодействия геосфер: сборник научных трудов ИДГ РАН. М.: ГЕОС. 2009. С. 147–155.

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.

Предварительный отчет по обоснованию безопасности. ОАО «НИАЭП». АЭС-2006. Нижегородская АЭС. Энергоблок 1. 2010.

Санина И.А., Кишкина С.Б., Локтев Д.Н., Нестеркина, Константиновская, 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.

Санина И.А., Черных О.А., Ризниченко О.Ю., Волосов С.Г. Малоапертурная сейсмическая антенна «Михнево»: новые возможности изучения сейсмичности Восточно-Европейской платформы // Доклады Академии Наук. Том 428, № 7, 2009. С. 536–542.

Татевосян Р.Э., Мокрушина Н.Г. Историческая сейсмичность среднего Поволжья // Изв. РАН. Физика Земли. № 3. С. 13–43.

Nelson G.D., Vidale J.E. Earthquake locations by 3-d finite-difference travel times // Bull. Seis. Soc. of Am. V.80, N.2, 395–410, April 1990.