

## **ВРЕМЕННЫЕ СЕЙСМОЛОГИЧЕСКИЕ НАБЛЮДЕНИЯ В РАЙОНЕ РОСТОВСКОЙ АЭС**

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

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Институт динамики геосфер Российской академии наук

Приведены основные результаты сейсмического мониторинга площадки Ростовской АЭС, проведенного малоапертурной группой ИДГ РАН в 2016 году. Описаны условия размещения, характеристика аппаратуры и конфигурация группы. Чувствительность группы в конкретных условиях установки обеспечивала регистрацию сейсмических событий с магнитудой 3 на расстояниях до 300 км; с магнитудой 1 на расстоянии 60 км от центрального датчика группы. Показано, что детальный анализ слабой сейсмичности с помощью малоапертурной группы возможен, но требует длительных наблюдений.

## Введение

Согласно федеральным нормам и правилам в области использования атомной энергии [НП-031-01], одной из основных задач сейсмического мониторинга в районе АЭС является оценка проектных параметров: потенциальных величин проектного и максимального расчетного землетрясений (ПЗ и МРЗ). Которые, в свою очередь, формально рассчитываются по параметрам графика повторяемости. Однако построение графика повторяемости землетрясений для слабоактивной территории весьма нетривиальная задача. В первую очередь она требует достаточно высокой чувствительности систем сейсмологического наблюдения, поскольку диапазон регистрируемых магнитуд может быть расширен именно за счет слабых событий. Организация систем сейсмологического контроля, которые обеспечивают надежную регистрацию и локацию сейсмических событий с магнитудами вплоть до отрицательных, — весьма распространенная практика в мире. Например, при мониторинге ответственных объектов, таких как захоронения радиоактивных отходов [Saari, 1999], или при мониторинге техногенной сейсмичности [Oye et al., 2005; Domański&Gibowicz, 2009]. Наряду с плотными сейсмическими сетями весьма широко используется методика группирования датчиков, позволяющая заметно повысить чувствительность системы [Málek et al., 2009; Niemer et al., 2012; Antonovskaya et al., 2017]. При существующей в России практике наблюдений редкой сетью из пяти-семи станций на территории радиусом 300 км от площадки АЭС, данные о локальных землетрясениях крайне редки: подобные системы в лучшем случае без пропуска регистрируют события с  $M(mb) > 2.7$ .

Конечно, необходимость повышения чувствительности систем сейсмологического наблюдения влечет за собой целый ряд проблем. В первую очередь, пространственно-временные закономерности распределения сейсмических событий разного масштаба весьма сложны [Sherman, 2013]; даже при наличии представительной статистики. Помимо этого, существенные трудности возникают в ходе регистрации и идентификации слабых событий: высокий уровень микросейсмических шумов, наличие в ожидаемом для слабых событий частотном диапазоне огромного количества сейсмических сигналов, в том числе таких, природу источников которых определить не удается.

В настоящей статье приведены основные характеристики организованной в 2016 году системы временных сейсмологических наблюдений в районе площадки Ростовской АЭС, методические приемы обработки полученных записей и основные результаты полугодичного мониторинга. Традиционно для ИД, в качестве системы наблюдений, была использована малоапертурная сейсмическая группа.

### Условия размещения площадки АС и системы сейсмологического наблюдения

Ростовская АЭС (РОАЭС) расположена на берегу Цимлянского водохранилища в 12 км от города Волгодонска. Согласно картам современных вертикальных движений земной поверхности, рассматриваемая территория расположена в тектонически относительно спокойном регионе. Предполагается только активность на современном этапе некоторых разломов в пределах 300-километровой зоны от Ростовской АЭС. В частности, фиксируется протяженный уступ субширотного простирания к югу от нижнего течения реки Дон, который может указывать на актив-

ность движений по Северо-Ростовскому разлому. Неотектоническая активность территории региона расположения площадки РОАЭС проанализирована в [Иванченко и др., 2017]. Согласно Картам общего сейсмического районирования территории Российской Федерации (ОСР-97) интенсивность сейсмических воздействий по шкале MSK-64 для средних грунтовых условий района Ростовской АЭС составляет: для проектного землетрясения с расчетным периодом повторяемости сейсмических воздействий  $T = 1000$  лет – 5 баллов; для максимального расчетного землетрясения с расчетным периодом повторяемости сейсмических воздействий  $T = 10\,000$  лет 6 – баллов.

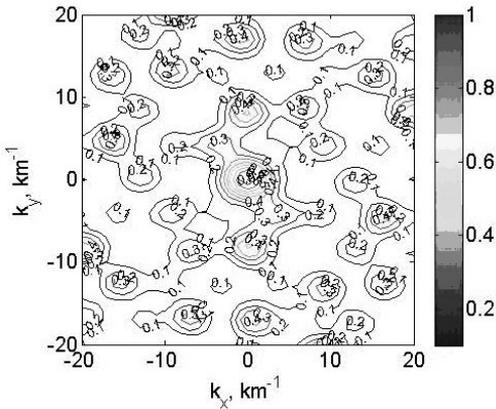
Малоапертурная группа работала в окрестности города Волгодонска, в 10 км от площадки РОАЭС. Район установки находился на высоте 60 метров над урезом Цимлянского водохранилища и занимал около 1 км<sup>2</sup> площади (перепады высот на участке незначительны по сравнению с расстояниями между датчиками). Сейсмические датчики устанавливались на бетонных постаментах, углубленных в грунт на 0.7 метра, накрывались и засыпались землей. Каждая точка оснащалась регистратором/накопителем данных и временными источниками питания (аккумуляторами).

### Методика и аппаратура

Для малоапертурной группы была выбрана конфигурация с точками наблюдений, расположенными на concentрических окружностях по отношению к центральному пункту. Для оценки радиуса корреляции микросейсмического шума были проведены предварительные исследования микросейсмического шума с использованием тестовой расстановки датчиков на расстояниях от 100 до 500 метров. Оценки радиусов пространственной корреляции шума на вертикальных каналах расстановки выполнялись в предположении азимутальной изотропности характеристик шума, в условиях временной синхронизации записей всех каналов в разных частотных диапазонах. В итоге радиус первого кольца составил 250–270 м, второго – 650–800 м. В состав малоапертурной сейсмической группы «Ростов» вошло семь сейсмических станций, которые в непрерывном режиме работали с 13 апреля по 25 октября 2016 года. В центральном пункте (42°18.099 с.ш., 47°30.982 в.д.) помимо трехкомпонентного сейсмоприемника СПВ-3К (рабочий частотный диапазон 0.5–65 Гц), которым были оснащены все точки группы, работал широкополосный трехкомпонентный сейсмометр RefTek-151-60 (рабочий частотный диапазон 0.0083–40 Гц). Динамический диапазон сейсмических каналов комплектов регистрирующей аппаратуры составлял 120–140 дБ. Регистрация скорости сейсмических колебаний велась с частотой опроса 200 Гц 24-разрядными регистраторами RefTek-130 в системе мирового времени (GMT). Привязка по времени осуществляется посредством GPS; точность привязки к GMT не хуже 5 миллисекунд. Перед началом установки аппаратуры в выбранных точках была проведена суточная регистрация при установке всех задействованных сейсмоприемников на общем постаменте. Регистрация продемонстрировала отличную идентичность каналов регистрации.

В дальнейшем, непосредственно на месте установки в каждой точке группы, была проведена импульсная калибровка каналов, подтвердившая идентичность характеристик аппаратуры после её установки в рабочее положение.

На рис. 1 представлен рельеф карты изолиний конфигурации сейсмической группы «Ростов» – энергетической характеристики направленности группы, рассчитанной как:



**Рис. 1.** Карта изолиний энергетической характеристики направленности группы «Ростов». Точка (0, 0) соответствует расположению центральной точки группы

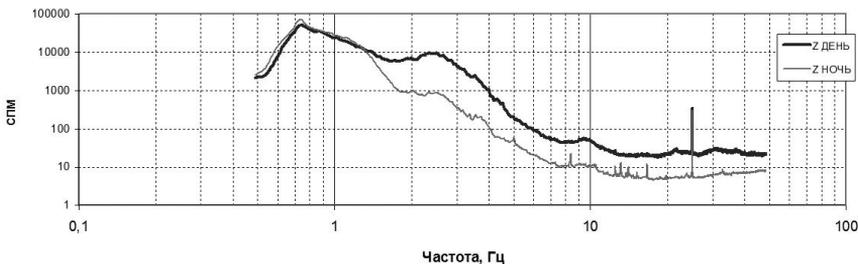
$$A(k_x, k_y) = \left| \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \exp(-i(k_x x_n + k_y y_n)) \right|^2$$

где  $(k_x, k_y)$  — компоненты волнового вектора в плоскости установки группы,  $n$  — число датчиков группы,  $(x_i, y_i)$  — координаты установки датчиков. Ширина главного максимума характеристики показывает разрешающую способность конфигурации группы: чем уже максимум, тем точнее определяется вектор кажущейся скорости. Наличие боковых максимумов, сравнимых по величине с главным, может привести к принципиальным ошибкам определения вектора кажущейся скорости. Хорошо видно, что характеристика направленности группы в  $(k_x, k_y)$ -плоскости имеет четко выраженный центральный максимум, а

дополнительные максимумы невелики по амплитуде ( $< 0.3$ ); так что реализованная конфигурация группы способна обеспечивать оптимальные условия для регистрации сейсмических сигналов по различным азимутальным направлениям.

## Обработка и основные результаты

Для оценки параметров микросейсмических колебаний грунта в районе установки малоапертурной сейсмической группы выбирались фрагменты записи, не осложненные какими-либо видимыми помехами и сигналами. Длина фрагментов составляла 10 минут: при такой длине выборки зарегистрированный микросейсмический фон близок к случайному процессу с нормальным распределением. Для каждого выбранного участка записи рассчитывались основные амплитудные и спектральные характеристики колебаний, чтобы получить представление об общих характеристиках микросейсмического шума в месте установки группы [Спивак, Кишкина, 2004]. Уровень естественных микросейсмических колебаний на площадке установки малоапертурной сейсмической группы «Ростов» в ночные часы составлял



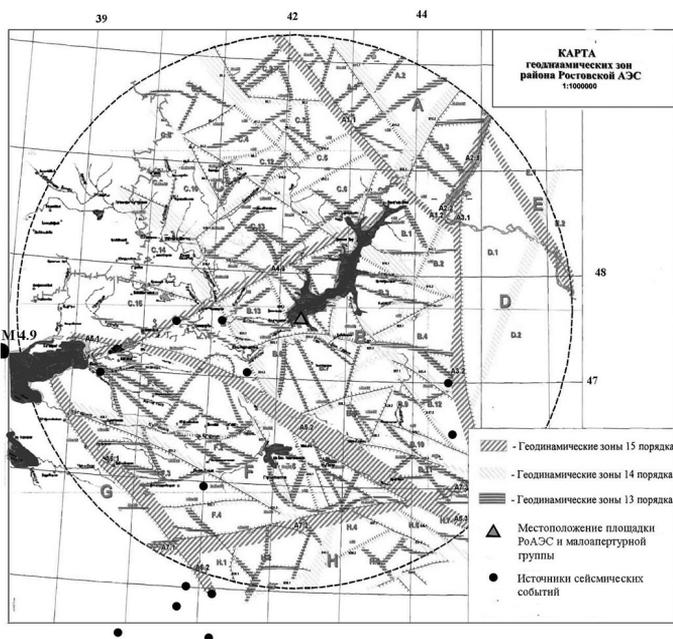
**Рис. 2.** Спектральная плотность мощности микросейсмического шума в ночное и дневное время (03 и 14 часов местного времени) за два месяца регистрации. Пункт регистрации В1 — осредненная характеристика. Видно существенное повышение уровня фона днем практически во всем диапазоне частот

0.2–0.5° микрон/с, днем ~0.5–1.0° микрон/с. Результаты вычисления спектральной плотности мощности для каждого блока записи (расчет проводился скользящим окном длительностью 20 секунд с перекрытием 50%) в виде осредненного спектра мощности по выборке за два месяца приведен на рис. 2.

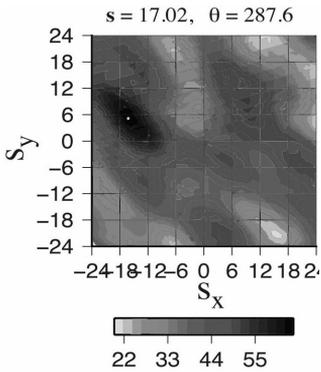
Потоковая обработка записанных малоапертурной сейсмической группой «Ростов» цифровых данных осуществлялась при помощи программного комплекса EL\_WIN [Асминг, 2004]. Обработка включала в себя обнаружение сигнала и определение его основных параметров: кажущейся скорости распространения волн, времен вступления различных фаз, амплитуд и соответствующих им периодов; координат источника зарегистрированного события. Наряду с использованием ряда автоматизированных алгоритмов для обнаружения и выделения сейсмических сигналов, все данные традиционно обрабатывались и эмпирическими методами, основанными на опыте человека-оператора. Основное внимание было направлено на выделение местных источников и, соответственно, слабых сигналов.

Среди используемых методических приемов обработки цифровых записей слабых сейсмических событий основное место занимали метод формирования луча, а также традиционный поляризационный анализ трёхкомпонентной записи с оценкой собственных векторов и чисел ковариационной матрицы, линейности колебаний, угла подхода на станцию, и азимута на источник; спектральный анализ с вычислением спектрограмм фрагментов записи вертикальных каналов; а также сравнительный анализ волновых форм компонент группы и их огибающих Гильберта для идентификации фаз сейсмического сигнала на разных каналах малоапертурной группы. Несомненно, главным фактором, осложняющим интерпретацию, является малая интенсивность колебаний. Эффективным инструментом, позволяющим выделить слабые волновые формы для последующего визуального анализа, зарекомендовал себя нуль-фазный частотный фильтр Баттерворта; для записей группы «Ростов» оптимально показал себя фильтр второго порядка в полосе частот 0,4–15 Гц. Все теоретические оценки медленности рассчитывались в рамках стандартной для ростовского региона локальной модели (CRUST 1.0).

**Рис. 3.** Источники сейсмических событий, зарегистрированных малоапертурной группой «Ростов» с апреля по октябрь 2016 г., на схеме геодинамических зон ближней зоны РОАЭС



Всего в результате проведенного анализа данных, полученных группой «Ростов» за полгода, помимо 340 сейсмических сигналов от далеких и удаленных землетрясений и сигналов от взрывов, было выделено 10 сейсмических источников с магнитудами от 1.2 до 3.7 в зоне до 300 км от площадки АЭС. Источники четырех сигналов находятся на расстояниях 290–350 км от площадки РОАЭС и приурочены к Северо-Кавказским сейсмолинеаментам. Источники еще 7 сигналов определены в пределах Северо-Азовского сейсмолинеамента, на расстояниях 330–380 км от площадки Ростовской АЭС (рис. 3). Среди них наиболее значимое зарегистрированное событие – Мариупольское землетрясение произошедшее 07.08.2016 в 360 км от площадки АЭС и от группы. Максимальная зарегистрированная скорость смещения грунта в районе площадки АЭС составила 193.88 мкм/с (ускорение 0.000109 g).



**Рис. 4.** Диаграмма медленности, рассчитанная по 0.3-секундным фрагментам вертикальных каналов около первого вступления продольных волн.  $\theta$  – азимут на источник,  $s$  – медленность, в сек/градус. Мариупольское землетрясение 07.08.2016 г.

На рис. 4 приведена диаграмма медленности для Мариупольского землетрясения. В результате анализа были получены значения  $t_p = 08:15:57.8$ ,  $t_s = 08:16:36.7$ ;  $S-P = 38.9$  с.;  $mb = 4.8$ : по данным одной только малоапертурной группы были выполнены оценки координат очага ( $47.16^\circ N$ ,  $37.55^\circ E$ , глубина 15 км), которые достаточно хорошо согласуются с результатами, независимо полученными Геофизической службой РАН ( $47.17^\circ N$ ,  $37.52^\circ E$ , глубина 10 км;  $mb = 4.8$ ) на основании данных 49 станций. Отдельно стоит упомянуть близкие значения оценок глубины Мариупольского события, полученные по данным группы станций ЕГС РАН и малоапертурной группы «Ростов». В сейсмологической практике среди основных параметров очага глубина гипоцентра, как правило, определяется с наименьшей точностью, хотя представляет едва ли не наибольший интерес. Знание точного пространственного положения очага (прежде всего глубины) позволяет выявлять его связь с особенностями глубинного строения

земной коры, в первую очередь с активными разломными областями, являющимися главными зонами генерации сейсмичности. В этой связи предоставляемая малоапертурными группами возможность проведения грубой оценки глубины гипоцентра без использования фаз, отражённых от свободной поверхности, очень важна. Надёжное обнаружение таких фаз (например,  $pP$ ) в высокочастотной коде слабых событий представляет собой отдельную научную задачу, требующую глубокого анализа и реализации комплексных математических и геофизических алгоритмов.

Примером такой обработки может являться использование многоканального кепстрального анализа для выделения опорного импульса с последующим суммированием логарифмических спектров по группе близко расположенных станций и количественной оценкой значимости выделяемых сигналов [Коновалов, Иващенко, 2006]. Оценка же глубины, по данным малоапертурных групп, в некоторых случаях позволяет избежать многочисленных сложностей выделения глубинных фаз и эксплуатирует идею минимизации невязки дифференциального времени пробега одной или нескольких пар фаз (например,  $S-P$ ,  $S-P_n$ , и т.д.) с

базовой моделью среды за счет вариации эпицентрального расстояния и глубины очага в области измеренных медленностей используемых сейсмических фаз:

$$\text{Min}_{\Delta h s} \left\{ \sum_{i=1}^n (t_{\text{meai}} - t_{\text{modi}}) \right\}$$

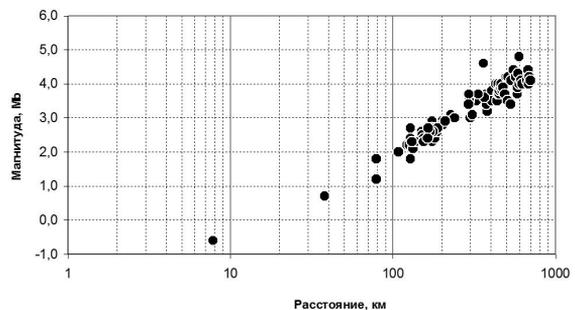
где  $\Delta$  – эпицентральное расстояние,  $h$  – глубина гипоцентра,  $s$  – медленность,  $n$  – количество пар сейсмических фаз,  $\delta t_{\text{mea}}$  – измеренное дифференциальное время пробега,  $\delta t_{\text{mod}}$  – дифференциальное время пробега, рассчитанное по стандартной модели.

Таким образом, после вычисления частотно-волновых диаграмм по вертикальным каналам малоапертурной группы на временных интервалах, соответствующих вступлениям сейсмических фаз, привлечённых к оценке глубины, проводится перебор значений эпицентрального расстояния и глубины источника для минимизации невязок измеренных времён пробега вблизи полученных значений медленности используемых вступлений (для центральной точки группы). Вместе с тем необходимо отметить, что получение устойчивой оценки глубины методом минимизации невязок в значительной степени обусловлено достаточно высокой точностью и взаимной согласованностью оценок медленности анализируемых сейсмических фаз обрабатываемого события, что в случае анализа слабых высокочастотных сигналов может не достигаться, особенно для вторичных вступлений коды, в силу недостаточного соотношения сигнал/шум и ряда других факторов. С другой стороны, фокальная глубина была успешно определена для нескольких событий из анализируемого набора данных, включая Мариупольское событие.

Традиционно большое внимание уделялось сигналам от карьерных и шахтных взрывов, поскольку именно путем регистрации и, главное, анализа сигналов, вызванных карьерными и шахтными взрывами, может быть оценена реальная чувствительность используемой системы мониторинга; особенно в платформенных условиях, при низкой частоте возникновения тектонических сейсмических событий (рис. 5). За шесть месяцев мониторинга района РОАЭС было зарегистрировано 42 сигнала, отнесенных к взрывным источникам с магнитудами от 2 до 3. Область, в которой сосредоточены эти источники, удалена от площадки АЭС на 120–180 км на запад и характеризуется высокой плотностью горных работ. Здесь сосредоточены как карьеры по добыче угля, щебенки и др., так и шахты, которые производят взрывы в любое время суток. Отметим также, что 09.09.2016 г. в 00:40:03,4GMT группой «Ростов» зарегистрирован подземный ядерный взрыв, произведенный КНДР.

Определение природы сигналов, вызванных взрывами на карьерах или шахтах, проводилось по совокупности признаков. По признаку «место-время» (совпадение места источника и территории карьера или шахты, совпадение времени в источнике

**Рис. 5.** Зависимость магнитуд сигналов от расстояния до их источников по данным группы «Ростов» за полгода. График определяет чувствительность группы в конкретных условиях установки. Учтены как природные, так и техногенные сигналы (карьерные взрывы). Не приняты во внимание далекие и удаленные события, параметры очагов которых по данным группы не оценивались



с узким интервалом проведения взрывных работ на конкретном предприятии); наличие спектральной модуляции на высоких частотах (на частотах выше 15–20 Гц); по соответствию набору типовых «портретов» волновых форм.

На подобную специфичность волновых форм, в частности, опирается разработанный [Адушкин и др., 2016] алгоритм кросскорреляции волновых форм трехкомпонентных сейсмических станций, обработка которого продолжалась и на базе данных группы «Ростов». Этот метод автоматического распознавания сейсмических сигналов продемонстрировал значительные преимущества перед станциями любых других типов при обнаружении и идентификации сейсмических событий на региональных расстояниях [Китов и др., 2017].

Как уже упоминалось, высокая чувствительность сейсмической малоапертурной группы способствует тому, что регистрируется огромное количество сигналов, требующих интерпретации. Даже после обнаружения и анализа далеких и региональных землетрясений, заведомо антропогенных сигналов от работающего оборудования или транспорта, после распознавания сигналов от взрывных источников и местных сейсмических событий, остается большое количество сигналов, природу источников которых однозначно определить не удастся. В качестве примера такой неоднозначной интерпретации приведем сейсмограмму сигнала 22.10.2016 г. (рис. 6), источник которого предположительно находится в ближней зоне площадки Ростовской АЭС. Глубина источника оценивается как 1–2 км, что не позволяет приурочить источник к разломной зоне, поскольку глубина залегания кристаллического фундамента здесь существенно больше (вопрос о природе волн первого вступления также остается дискуссионным).

Еще один пример – анализ сигнала 11.08.2016 г. в 22:00GMT (рис. 7). После применения полосовой частотной фильтрации в диапазоне 2–50 Гц по всем вертикальным каналам группы прослеживаются относительно четкие вступления продольных и поперечных волн. При этом вступление на 139-й секунде имеет слишком высокую медленность ( $> 27$  с/град.), что не позволяет ассоциировать эту волновую форму с первым вступлением продольных волн. Вступление  $\sim 139.5$  с имеет медленность 18.06 с/град., что немного ниже значения, ожидаемого в рамках используемой модели, и, в частности, может свидетельствовать о ненулевой глубине ис-

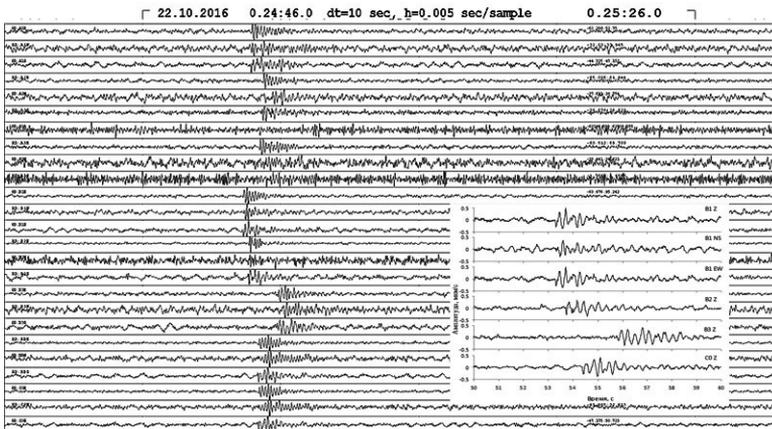
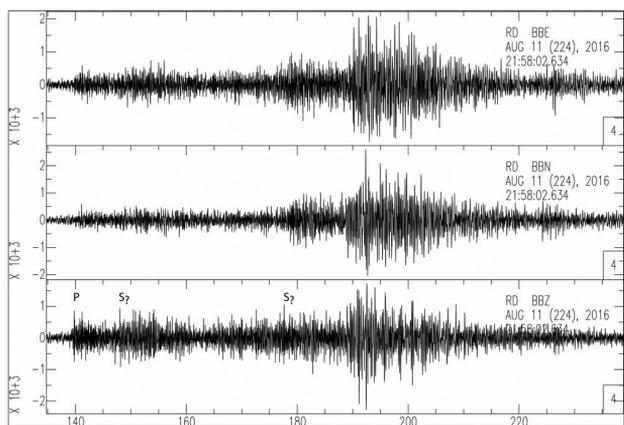
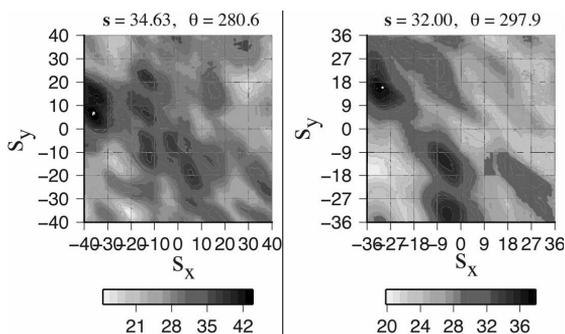


Рис. 6. Сейсмический сигнал 22.10.2016 г. Все каналы группы без фильтра (60 с) и отдельные каналы группы (10 с) после процедуры полосовой фильтрации 2–25 Гц (во врезке)



**Рис. 7.** Фрагмент трехкомпонентной записи 11.08 22:00. широкополосного канала центрального пункта (слева - сверху) и диаграммы медленности (справа - внизу), рассчитанные по полусекундным фрагментам вертикальных каналов около 148-й (слева) и 176-й (справа) секунд групповой записи



точника события. Если при оценке эпицентрального расстояния ориентироваться на медленность, оцененную по первым вступлениям продольных волн, то для поверхностного источника расстояние составит не более 210 км, так как на большем удалении первым вступлением является слаборефрагированная на границе Мохо волна с медленностью около 13 с/град.

Основываясь на этом предположении, поиск вступлений поперечных волн вёлся на временах не позднее 25-й секунды от первого вступления. Был проведен поляризационный анализ, согласно которому вероятные времена вступления могут располагаться как в диапазоне 148–150 с, так и существенно позже. Оценки медленности для этих двух групп вступлений дают значения близкие к ожидаемым, причем более поздняя группа даёт более близкие к модельным значения. При этом визуальный анализ трёхкомпонентной записи показывает, что одновременно с разрастанием амплитуд на вертикальной составляющей происходит усиление колебаний и на горизонтальных, особенно на компоненте С-Ю – главного направления прихода сейсмических волн, исходя из диаграммы медленности Р.

Вместе с тем, более поздние времена прихода поперечных волн будут соответствовать запаздыванию S-P около 37 с, что не согласуется с медленностью первого вступления. Азимут по поляризационным характеристикам продольных волн оказался близок к оценкам по диаграммам медленности и оставил 250–290 град. Исходя из наименее противоречивых результатов анализа, были получены параметры очага (время 21:59:38; координаты 47.19°N, 37.37°E; глубина не определена).

Одно из предположений – экзогенная природа обсуждаемых «неоднозначных» событий. Механизм экзогенных источников существенно отличается от тектонических событий и должен анализироваться по другим алгоритмам. Но, как прави-

ло, неоднозначность может быть разрешена только при регистрации нескольких подобных сигналов в ходе дальнейшего мониторинга в этом районе.

## Заключение

Приведенный в статье опыт использования малоапертурной сейсмической группы для мониторинга площадки Ростовской АЭС демонстрирует не только возможность, но и необходимость организации чувствительной системы наблюдений в данном районе. Несомненно, следует учитывать существующие предположения об оживлении сейсмической обстановки северных районов Приазовья (Северо-Азовской полосы) и возможности возникновения заметного сейсмического события в районе Ростова-на-Дону [Габсатарова и др., 2017]; что требует сейсмологического контроля. Но основным мотивом организации чувствительной системы мониторинга, на наш взгляд, должна являться необходимость получить сведения о структуре существующих в районе площадки разломных зон, выявить участки локализации деформационных процессов. Таковую возможность дает детальный анализ слабой сейсмичности при организации чувствительной системы сейсмического мониторинга [Кишкина и др., 2012]. При этом следует обратить внимание и на повышение точности определения координат сейсмических событий, что позволит сделать более выраженной локализацию эпицентров и, следовательно, выявить их приуроченность к разломным зонам. Достаточная длительность наблюдений позволит не только осуществить набор статистики событий, но и улучшить идентификацию их источников.

*Работа выполнена в рамках Гос. задания (проект № 0146-2014-0010).*

## Литература

*Габсатарова И.П., Никонов А.А., Флейфель Л.Д.* Бердянское (Осипенковское), 2006 г., и Мариупольское 2016 г., землетрясения в зоне Северо-Азовского разлома: макросейсмическое поле, механизм очага, миграция // Триггерные эффекты в геосистемах: материалы четвертого Всероссийского семинара-совещания / Под ред. В.В. Адушкина, Г.Г. Кочаряна. ИДГ РАН. М. : ГЕОС. 2017. С. 76–83.

*Иванченко Г.Н., Кишкина С.Б., Локтев Д.Н.* Геодинамические условия региона расположения ростовской АЭС // Триггерные эффекты в геосистемах: материалы четвертого Всероссийского семинара-совещания / под ред. В.В. Адушкина, Г.Г. Кочаряна. ИДГ РАН. М. : ГЕОС. 2017. С.251–260.

*Китов И.О., Санина И.А., Сергеев С.С., Нестеркина М.А., Константиновская Н.Л.* Обнаружение, оценка магнитуды и относительная локация слабых афтершоков с помощью кросс-корреляции волновых форм: землетрясение 7 августа 2016 г в Мариуполе // Сейсмические приборы. 2017. Т. 53, № 2. С. 58–80.

*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.

*Коновалов А.В., Иващенко А.И.* Многоканальный анализ кепстров для определения глубины очага мелкофокусного землетрясения // Вулканология и сейсмология. 2006. № 2. С. 55–64.

*Кочарян Г. Г.* Масштабный эффект в сеймотектонике // Геодинамика и тектонофизика. 2014. Т. 5. № 2. С. 353–385.

НП-031-01 «Нормы проектирования сейсмостойких атомных станций». Утверждены постановлением Госатомнадзора России от 19 октября 2001 г. № 9.

*Спивак А.А. Кишкрина С.Б.* Исследование микросейсмического фона с целью определения активных тектонических структур и геодинамических характеристик среды // Физика Земли. 2004. № 7. С. 35–49.

*Шерман С.И.* Деформационные волны как триггерный механизм сейсмической активности в сейсмических зонах континентальной литосферы // Геодинамика и тектонофизика. 2013. № 4 (2). С. 83–117.

*Antonovskaya, G.N. Kapustian, N.K., Moshkunov A.I.* New seismic array solution for earthquake observations and hydropower plant health monitoring // Journal of Seismology, 09/2017, Volume 21, Issue 5.

*Domański B., Gibowicz S.* Comparison of source parameters estimated in the frequency and time domains for seismic events at the Rudna copper mine, Poland. Acta Geophys. 2008. Vol. 56.

*Hiemer, S., D. Rössler, and F. Scherbaum* (2012). Monitoring the West Bohemian Earthquake Swarm in 2008/2009 by a Temporary Small-Aperture Seismic Array // Journal of Seismology.

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

*Oye V., Bungum H., Roth M.* Source parameters and scaling relations for mining-related seismicity within the Pyhäsalmi ore mine, Finland. BSSA, 2005. Vol. 95 (3).

*Saari J.* An overview of possible applications of microearthquake monitoring at the repository site of spent nuclear fuel in Finland. HELSINKI, FINLAND. December 1999.