

УДК 502.7:504.058

## РАСПОЗНАВАНИЕ СЛАБОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СЕЙСМИЧЕСКИХ СОБЫТИЙ ПРИ ИЗУЧЕНИИ ТЕХНОГЕННОЙ СЕЙСМИЧНОСТИ<sup>1</sup>

*М.Ю. Нестеренко, А.В. Бухвалова, А.А. Пелагеин*

Отдел геоэкологии Оренбургского научного центра УрО РАН  
460014, г. Оренбург, ул. Набережная, 29  
E-mail: geocol-ONC@mail.ru

*При изучении техногенной сейсмичности значимыми являются слабые сейсмические события, выявление и обработка которых основываются на сопоставлении и анализе сейсмограмм различных сейсмостанций. В связи с этим спроектировано и разработано программное средство для выявления слабых сейсмических событий. Приведено описание математической модели распознавания слабых сейсмических событий и процедура анализа фрагментов сейсмограмм для их распознавания, предложена методика определения типа сейсмического события.*

**Ключевые слова:** *сейсмика, техногенная сейсмичность, природная сейсмичность, обработка сейсмограмм.*

Оренбургская область по сейсмическому районированию России отнесена к возможной по геологическим условиям 6-7-балльной зоне природных землетрясений. Территория нефтегазоносного Оренбуржья (западная и центральная части области) имеет высокий уровень естественных напряжений в земной коре, что следует учитывать при разработке месторождений нефти и газа и других техногенных вмешательств в геологическую среду.

Отдел геоэкологии Оренбургского научного центра УрО РАН совместно с ООО «Газпром добыча Оренбург» и Главным управлением МЧС России по Оренбургской области с 2005 г. ведет сейсмологический мониторинг юго-западной части Оренбургской области в настоящее время четырьмя сейсмическими станциями.

При добыче нефти и газа техногенезом охватываются объемы недр до нескольких тысяч кубических километров на площадях в тысячи квадратных километров. На Оренбургском нефтегазоконденсатном месторождении (ОНГКМ) и ряде разрабатываемых месторождений нефти пластовое давление уменьшилось на 10 МПа и более. В результате на больших площадях сформировалось некомпенсированное напряжение в верхней части земной коры, составляющее порядка 1000 т на квадратный километр. Крупномасштабные техногенные изменения в недрах разрабатываемых месторождений нефти и газа привели к повышению суммарной выделяющейся сейсмической энергии за год до  $8.14 \cdot 10^{10}$  Дж в расчете на 1000 км<sup>2</sup>, что в тысячу раз больше, чем на прилегающих к ним территориях. Интенсификация сейсмической активности свидетельствует о происходящей разгрузке напряжений в геологической среде. К настоящему времени техногенно накопившаяся энергия напряжений в ней разгрузилась лишь на 0,1 %, и следует ожидать дальнейшего увеличения количества и силы землетрясений от антропогенных воздействий на геологическую среду в регионе.

---

<sup>1</sup> Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ (грант № 11-05-97024-р\_поволжье\_а).

*Максим Юрьевич Нестеренко (к.т.н., доц.), ведущий научный сотрудник.  
Анастасия Владимировна Бухвалова, ведущий инженер.  
Александр Александрович Пелагеин, ведущий инженер.*

В связи с этим большое значение имеют данные об уровне естественной и техногенной сейсмичности территории, выявление и прогнозирование возможности землетрясений. Сейсмологический мониторинг позволяет охарактеризовать возможные последствия геологических изменений в структуре земной коры [1].

В год сеть фиксируется около 180 сейсмических событий различной природы [2], их обработка в ручном режиме сложна и трудоемка, и ряд сейсмических событий не выявляется оператором в связи с их слабой энергетикой и сильной зашумленностью станций. В связи с этим необходима автоматизация выявления сейсмических событий.

Большинство существующих методик ручной обработки и программных средств для автоматизированной обработки сейсмограмм предназначены для выявления и обработки сильных сейсмических событий с магнитудой  $M > 3$ . Однако при изучении техногенной сейсмичности значимыми являются слабые сейсмические события, выявление и обработка которых основываются на подборе фильтра и сопоставлении сейсмограмм различных сейсмостанций. Данный процесс может быть автоматизирован на основе компьютерного анализа статистической связи близких во времени участков сейсмограмм различных сейсмостанций и каналов.

Целью данной работы является разработка математического аппарата и программного средства для выявления (распознавания) слабых сейсмических событий на основе оценки взаимосвязи временных рядов скоростей смещений грунта на примере сети сейсмостанций Оренбургской области.

**Принципы выявления слабых сейсмических событий.** Как известно [3], существуют продольные и поперечные сейсмические волны. В земной коре на территории Южного Предуралья скорость их распространения приблизительно равна соответственно: у продольной –  $V_p \approx 4 \text{ км/с}$ , у поперечной –  $V_s \approx 2,5 \text{ км/с}$ .

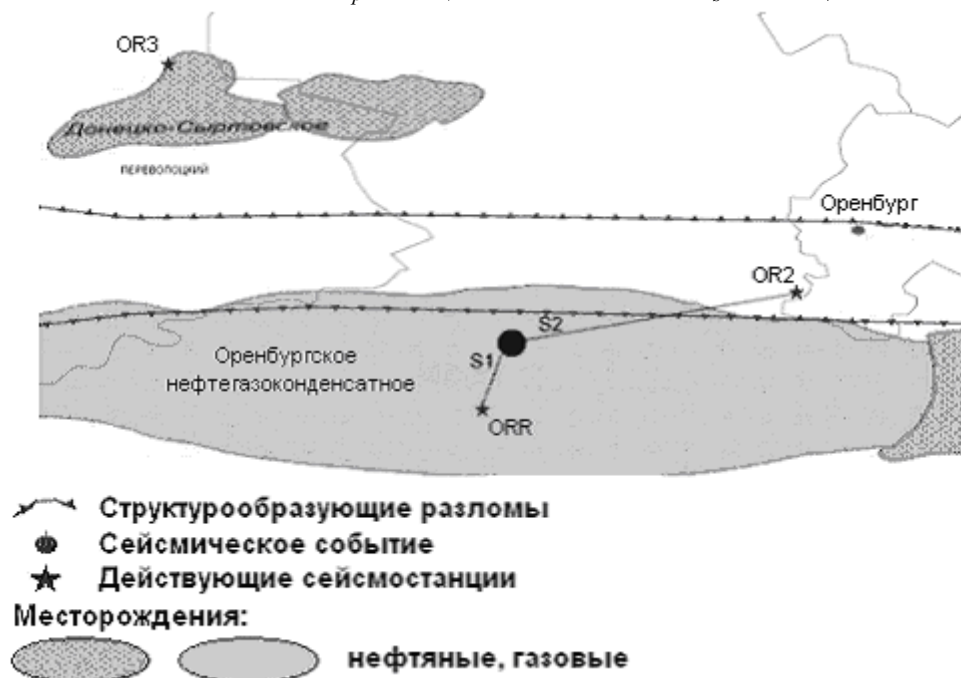


Рис. 1. Расположение сейсмических станций сети «Газ-сейсмика»

Сейсмическое событие, произошедшее на территории региона, генерирует статистически связанные волновые формы на зарегистрировавших их сейсмостанциях. В общем случае расстояние от эпицентра сейсмического события до сейсмических станций различается, следовательно, время прихода волн на разные станции различно. Разница во времени прихода волны (временной лаг) на две различные сейсмические станции может быть оценена величиной  $\Delta t = \frac{\Delta s}{v}$ , где  $\Delta s$  – разница эпицентральных расстояний на двух сейсмических станциях,  $v$  – скорость сейсмической волны. Следовательно, корреляция между амплитудами скоростей смещения должна наблюдаться с соответствующей задержкой  $\Delta t$  (рис. 1, 2).

Расстояние между станциями существующей сети «Газ-сейсмика» составляет 30-60 км, что обуславливает разницу во времени регистрации продольной волны (р-волны) сейсмического события до 15 секунд, а поперечной (s-волны) – до 25 секунд.

Наличие связи рядов скоростей смещения на различных каналах и станциях с учетом временной задержки свидетельствует о сейсмическом событии, зарегистрированном станциями.

Корреляционный анализ с учетом временного лага может быть выполнен по данным о скоростях смещения грунта, по спектру волновых форм любых сейсмических станций одного события и по отфильтрованным данным.

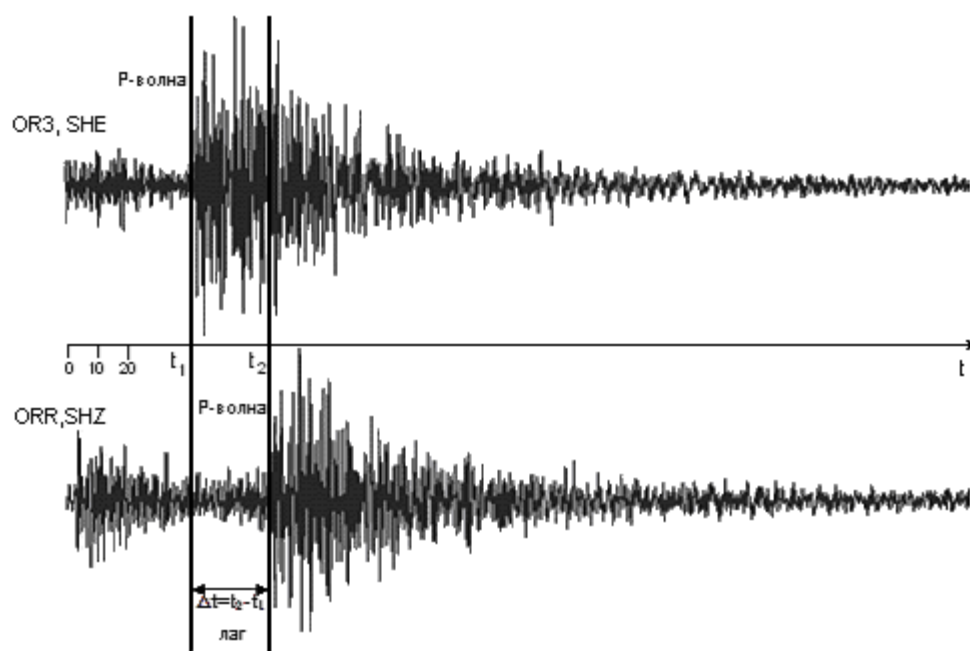


Рис. 2. Временная задержка (лаг) в наступлении события

### **Выбор методов выявления взаимосвязи рядов скоростей смещения грунта.**

Для выявления взаимосвязи скоростей смещений грунта, зарегистрированных различными сейсмостанциями, возможно применение анализа временных рядов. Дальнейшее развитие работы предполагается по следующим направлениям:

- оценка шести взаимных корреляционных функций по временным рядам, фиксируемым имеющимися сейсмическими станциями. Взаимное расположение экс-

треумов данных оценок (временные лаги) позволит получить дополнительную информацию для анализа сейсмических событий;

– оценка функций частной и множественной когерентности сейсмограмм всех станций. При решении задачи анализ функции когерентности позволяет понять, есть ли точечные источники помех, каковы их частоты, и попытаться определить их природу исходя из временного хода. Также когерентный анализ позволяет выделить из всего спектра микросейсм сигналы соответствующих источников сейсмических волн [4].

Применение методов анализа временных рядов с учетом лага основано на расчете коэффициентов корреляции с учетом лага [5]:

$$r_{U_{x_j} U_{y_{i+l}}} = \frac{\sum_{i=1}^{n-l} U_{x_i} U_{y_{i+l}}}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n-l} U_{x_i}^2 \cdot \sum_{i=l}^n U_{y_i}^2}}, \quad (1)$$

где  $r_{U_{x_j} U_{y_{i+l}}}$  – коэффициент парной корреляции колебаний с лагом, равным  $l$ ;

$l$  – лаг,  $l = \overline{0, p}$ ;

$x_i$  и  $y_j$  – тренды временных рядов,  $i, j = \overline{0, n}$ ;

$U_{x_i}$  и  $U_{y_j}$  – отклонения отдельных уровней от трендов.

В качестве переменной временного ряда принимаем скорость смещения грунта, зарегистрированную каналом на сейсмостанции в течение определенного промежутка (отсчета) времени, или амплитуду спектра.

Процедура распознавания слабых сейсмических событий с помощью программного средства состоит из четырех шагов:

– подготовка и выгрузка данных о скоростях смещения грунта и спектрограммах из программы WSG;

– анализ сейсмограмм двух каналов сейсмостанций и оценка временной задержки вступления волн сейсмического события;

– анализ спектрограмм двух каналов сейсмостанций и выявление тесноты связи спектров;

– сопоставление полученных результатов и идентификация события согласно статистике.

Так как временные ряды достаточно велики, находим тренды  $x$  и  $y$ . Элементы исследуемого временного ряда скоростей смещения грунта колеблются около нуля, следовательно, в разрабатываемой математической модели целесообразно применить линейный тренд, рассчитываемый по формуле

$$y_i = a + b \cdot t_i, \quad (2)$$

где  $y_i$  – выровненные уровни тренда для  $i$ -го отсчета;

$a$  – свободный член уравнения, численно равный среднему выровненному уровню для периода времени, принятого за начало отсчета, то есть для  $t_i = 0$ ;

$b$  – средняя величина изменения уровней ряда за единицу времени;

$t_i$  – номер отсчета.

$$b = \frac{\sum_{i=1}^n x_i \cdot t_i}{\sum_{i=1}^n t_i^2}. \quad (3)$$

Интервал времени между сейсмическими событиями, зафиксированными на разных сейсмостанциях, неизвестен, однако может быть оценен как лаг, для которого значение коэффициента корреляции максимально.

Для решения поставленной оптимизационной задачи необходимо рассчитать серию коэффициентов корреляции временных рядов с возрастающим лагом  $l = \overline{0, p}$ . Максимальный лаг при расчете коэффициентов корреляции составляет одну треть длины временных рядов, в противном случае рассчитанные показатели будут ненадежными.

В результате проведения анализа строится графическое изображение вектора коэффициентов корреляции, называемое коррелограммой. На рис. 3 построена зависимость коэффициентов корреляции от лага для спектра зарегистрированных сейсмических волн на двух каналах сейсмостанций. График указывает на снижение тесноты связи с увеличением лага.

Анализ сейсмограмм выявил два вида коррелограмм:

– коэффициенты до некоторого значения лага растут, а затем убывают до незначимо отличных от нуля величин, тогда лаг считается равным тому сдвигу, при котором коэффициент корреляции по модулю максимален. Данный вид корреляции характерен для анализа спектра;

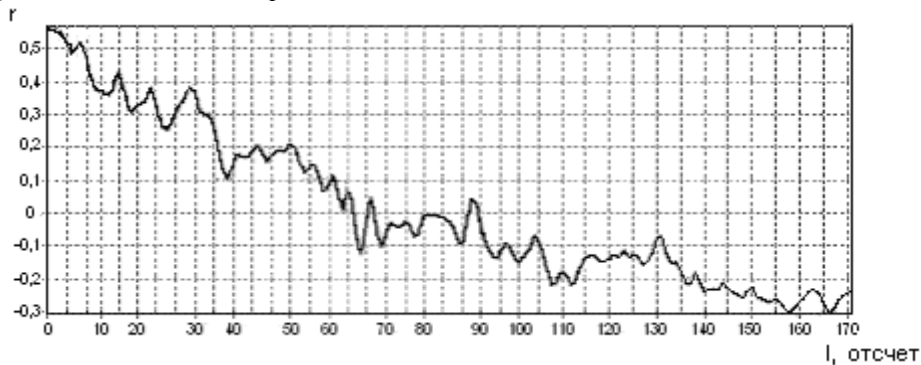


Рис. 3. График зависимости коэффициентов корреляции от лага для спектра

– коэффициенты поочередно растут и убывают, образуя циклы или квазициклы.

При проведении анализа сейсмограмм сейсмических событий было выявлено, что коррелограмма в основном принимает второй вид, вследствие чего для удобства работы специалиста в разработанном программном средстве анализа сейсмограмм коррелограмма представляет собой десять наибольших коэффициентов корреляции с подписью, на каком сдвиге они получены.

**Апробация математической модели и программного средства.** В табл. 1 приведен фрагмент набора данных для проверки корректности распознавания сейсмических событий разработанным нами программным средством.

В результате опытной эксплуатации программного средства корректно распознано 80 % сейсмических событий, что является значимым научно-практическим результатом. На основе полученной статистики показателей сейсмических событий

разного типа в табл. 2 приведена их классификация по оцениваемым показателям: коэффициент корреляции и лаг.

Таблица 1

**Проверка адекватности модели распознавания сейсмических событий с помощью программного средства**

Фрагмент сейсмограммы	Результаты анализа					
	волновых форм			спектра		
	макс. коэф. кор.	лаг		макс. коэф. кор.	лаг	
		в от-счет.	в сек.		в от-счет.	частота, Гц
Взрыв (апрель 2011 г.)	0,26	110	2,2	0,56	1	0,096
Взрыв (март 2011 г.)	0,258	105	2,1	0,58	11	0,8
Взрыв (октябрь 2010 г.)	0,32	132	2,64	0,68	0	0
Взрыв (1 октября 2010 г.)	0,25	13	0,65	0,7	7	1,2
Взрыв (15 октября 2010 г.)	0,22	46	2,3	0,5	13	0,52
Местное событие (апрель 2011 г.)	0,238	50	2,5	0,56	0	0
Местное событие (март 2011 г.)	0,37	135	2,7	0,8	1	0,07
Местное событие (1 октября 2010 г.)	0,27	11	0,55	0,55	5	0,2
Местное событие (3 октября 2010 г.)	0,88	3	0,15	0,34	6	0,24
Местное событие (5 октября 2010 г.)	0,33	30	1,5	0,58	1	0,04
Местное событие (15 октября 2010 г.)	0,22	45	2,25	0,7	0	0
Телесеismicкое событие (территория Японии)	0,46	140	2,8	0,55	10	0,87
Региональное событие (территория Башкирии)	0,38	114	2,28	0,74	5	0,18
Первый участок шума	0,824	2	0,04	0,4	13	0,98
Второй участок шума	0,74	0	0	0,4	0	0
Третий участок шума	0,92	0	0	0,74	8	0,32
Четвертый участок шума	0,73	10	0,5	0,26	5	0,2
Пятый участок шума	0,71	1	0,05	0,33	3	0,12

Анализируя табл. 2, можно сделать вывод, что отличительной особенностью всех сейсмических событий является лаг, равный 2-3 сек, соответствующий времени прохождения продольной сейсмической волной расстояния между станциями, и высокая корреляция спектра.

Таблица 2

**Классификация сейсмических событий по оцениваемым параметрам**

Входные данные	Результат анализа							
	волн. форм				спектра			
	коэф. кор.		лаг, сек		коэф. кор.		лаг, сек	
	от	до	от	до	от	до	от	до
Взрывы	0,2	0,35	2	3	0,5	0,7	0,02	0,18
Местные события	0,21	0,4	2	3	0,7	0,8	0	0,05
Региональные события	0,28	0,38	2	3	0,66	0,74	0	0,05
Телесеismicкие события	0,35	0,5	2	3	0,5	0,6	0,2	0,5
Шум	0,7	0,83	0	0,02	0,25	0,4	0	0,26

**Закключение.** Построена закономерность зависимости волновых форм и спектра, зарегистрированных различными сейсмостанциями, для различных типов сейсмиче-

ских событий и шума. Выявленные различия в значениях оцениваемых параметров позволяют идентифицировать сейсмические события и распознавать их тип.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- 1 Лобушин А.А. Анализ данных систем геофизического и экологического мониторинга. – М.: Наука, 2007. – 228 с.
- 2 Нестеренко М.Ю. Влияние добычи полезных ископаемых на геогидродинамику и сейсмичность в Южном Предуралье / М.Ю. Нестеренко // Геологические опасности: мат-лы XV Всерос. конф., Архальгельск: ББС МГУ, 2009. – С. 333-335.
- 3 Кондорская Н.В. Инструкция о порядке производства и обработки наблюдений на сейсмических станциях единой системы сейсмических наблюдений СССР / Н.В. Кондорская, З.И. Аранович, О.Н.Соловьева. – М.: Институт физики Земли АН СССР, 1981. – 137 с.
- 4 Юдахин Ф.Н. Исследование активности платформенных территорий с использованием микросейсм / Ф.Н. Юдахин, Н.К. Капустян, Е.В. Шахова. – Екатеринбург: УрО РАН, 2008. – 129 с.
- 5 Бокс Дж. Анализ временных рядов: Прогноз и управление. – М.: Мир, 1974. – 324 с.

*Статья поступила в редакцию 12 сентября 2011 г.*

## RECOGNITION OF ENERGETICALLY WEAK SEISMIC EVENTS IN THE STUDY OF MAN-MADE SEISMIC

***M. Yu. Nesterenko, A. V. Bukhvalova, A. A. Pelagein***

Department of Geoecology of Orenburg Scientific Centre UB RAS  
29, Street Pier, Orenburg, 460014

*When studying anthropogenic seismicity the weak seismic events are significant. Its detection and treatment are based on the correlation and analysis of the seismograms of different seismic stations. A software tool for the detection of weak seismic events is designed and developed. A mathematical model of the recognition of weak seismic events and the analysis of seismogram fragments for their detection are described in the paper. The method of the identification of the type of seismic event is proposed.*

***Keywords:*** seismic, technogenic seismicity, natural seismicity, the processing of seismograms.

---

*Maxim Nesterenko (Ph.D. (Techn.)), Associate Professor, Leading Research Fellow.  
Anastasia Bukhvalova, Leading Engineer.  
Alexander Pelagein, Leading Engineer.*