

УДК 550.34(571.642)

А.Ю. ПОЛЕЦ, Т.К. ЗЛОБИН

## Моделирование очага методом инверсии волновых форм на примере Нефтегорского землетрясения 1995 года

*Представлены результаты моделирования очага разрушительного Нефтегорского землетрясения 27(28) мая 1995 г. Моделирование проводилось на основе данных мировой сети сейсмических станций методом инверсии волновых форм. Выполненные исследования позволили изучить особенности развития фронта разрушений и амплитуды смещений вдоль очаговой плоскости Нефтегорского землетрясения.*

*Ключевые слова:* инверсия волновых форм, сейсмограммы, Нефтегорское землетрясение.

**1995 Neftegorsk earthquake source inversion model.** A. Yu. POLETS, T.K. ZLOBIN (Institute of Marine Geology and Geophysics, FEB RAS, Yuzhno-Sakhalinsk).

*This paper presents the results of the May 27 (28), 1995 Neftegorsk earthquake source waveform inversion. Waveform inversion has been done on the basis of data from the Global Seismic Network. Development of the 1995 Neftegorsk earthquake source and displacement amplitudes are studied in this work.*

*Key words:* waveform inversion, seismograms, Neftegorsk earthquake.

### Введение

Изучением активных разломов [2] и движения плит [12] установлено, что подвижки вдоль активных разломов на северо-востоке Сахалина являются преимущественно правосторонними сдвигами в отличие от взбросов или надвигов в центре и на юге острова. Различия в характере тектонических движений отражаются в сглаженности рельефа северного Сахалина по сравнению с расчлененным рельефом его южной и центральной части. Распределение сейсмичности на северном Сахалине неравномерное: северо-восток острова значительно активнее, чем его северо-западная часть. Сильнейшим землетрясением в северо-западной части острова было Уангское 16 марта 2010 г., моментная магнитуда  $M_w = 5,8$  (рис. 1) [6]. На северо-востоке и севере о-ва Сахалин с 1906 г. до 1995 г. не отмечалось землетрясений с  $M \geq 6,0$ , магнитуда землетрясений в районе Охи была 5,0–5,5. Согласно карте сейсмического районирования СР-78, эта часть острова относилась к 7-балльной зоне [9]. Значимыми сдвиговыми землетрясениями на северо-востоке Сахалина были Ногликское 2 октября 1964 г. (магнитуда землетрясения по поверхностным волнам  $MLN = 5,8$ ) и катастрофическое Нефтегорское 27(28) мая 1995 г. ( $M_w = 7,0$ ) [10] (рис. 1). Очаг Ногликского землетрясения находился у северо-восточного побережья острова, в районе пос. Ноглики, на глубине около 10 км. Нефтегорское землетрясение

---

\*ПОЛЕЦ Анастасия Юрьевна – кандидат физико-математических наук, научный сотрудник, ЗЛОБИН Тимофей Константинович – доктор геолого-минералогических наук, главный научный сотрудник (Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск). \*E-mail: polec84@mail.ru

произошло в районе Северо-Сахалинской равнины, ранее относимой к району умеренной сейсмичности. Эпицентр землетрясения находился вблизи поселка городского типа Нефтегорск, глубина очага  $h = 18 (\pm 3)$  км. Нефтегорск был полностью разрушен, почти 2000 его жителей погибли, пострадали также г. Оха, поселки Москальво и Сабо. Нефтегорское землетрясение оказалось неожиданным не только по времени и месту возникновения, но и по силе и впоследствии заставило пересмотреть и уточнить карту сейсмического районирования.

Несмотря на то что Нефтегорское землетрясение является одним из наиболее изученных сейсмических событий на территории России [1–5, 7, 8, 10, 12 и др.], оно по-прежнему вызывает интерес специалистов. Детальное исследование очаговых зон сильных землетрясений и построение геодинамических моделей этих землетрясений могут внести существенный вклад в понимание сейсмотектоники региона и физики очага землетрясения в целом.

Целью данного исследования является изучение особенностей развития фронта разрушений и амплитуд смещений вдоль очаговой плоскости Нефтегорского землетрясения 1995 г.

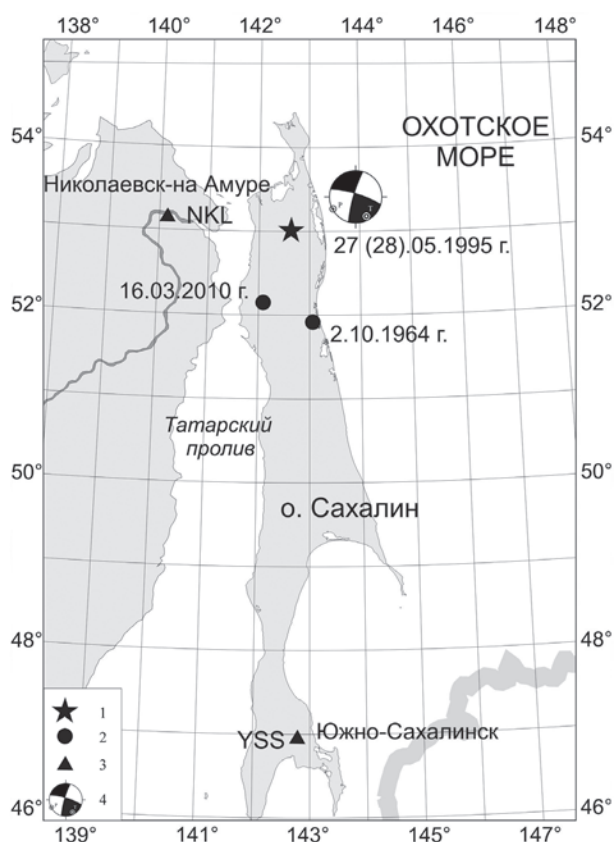


Рис. 1. Карта эпицентров Нефтегорского 1995 г. (1), Ногликского 1964 г. и Уангского 2010 г. (2) землетрясений и положение действующих сейсмических станций (3) на момент Нефтегорского землетрясения 27(28).05.1995 г.; 4 – механизм очага Нефтегорского землетрясения

### Исходные данные и метод исследования

Для построения модели очага и изучения особенностей развития сейсмического процесса в очаговой области Нефтегорского землетрясения применялся метод инверсии волновых форм [11], позволяющий комплексно определять механизм очага и оценивать его параметры, ориентацию сейсмического разрыва в очаге, форму временной функции источника, величину сейсмического момента, скорость распространения разрыва и др. Метод позволяет рассчитывать синтетические сейсмограммы для текущей модели очага, сравнивать их с наблюдаемыми волновыми формами и рассчитывать поправки к модели, чтобы приблизить синтетические сейсмограммы к наблюдаемым. Решение обратной задачи заключалось в сравнении наблюдаемых и расчетных волновых форм до получения их наилучшего совпадения. Исходный материал – широкополосные цифровые сейсмограммы, зарегистрированные станциями мировой сети GSN (The Global Seismographic Network), загруженные с сайта Объединенного исследовательского института сейсмологии IRIS США (<http://www.iris.edu/>). В качестве входной информации используется файл в SEED-формате (Standard for the exchange of earthquake data). Файл включает сейсмические

$M_0=0.077E+21Nm$   $M_w=7.19$   
 Lat.=52.629° Lon.=142.827° H=11 km.  
 Strike=196° Dip=82° Rake=171.8°

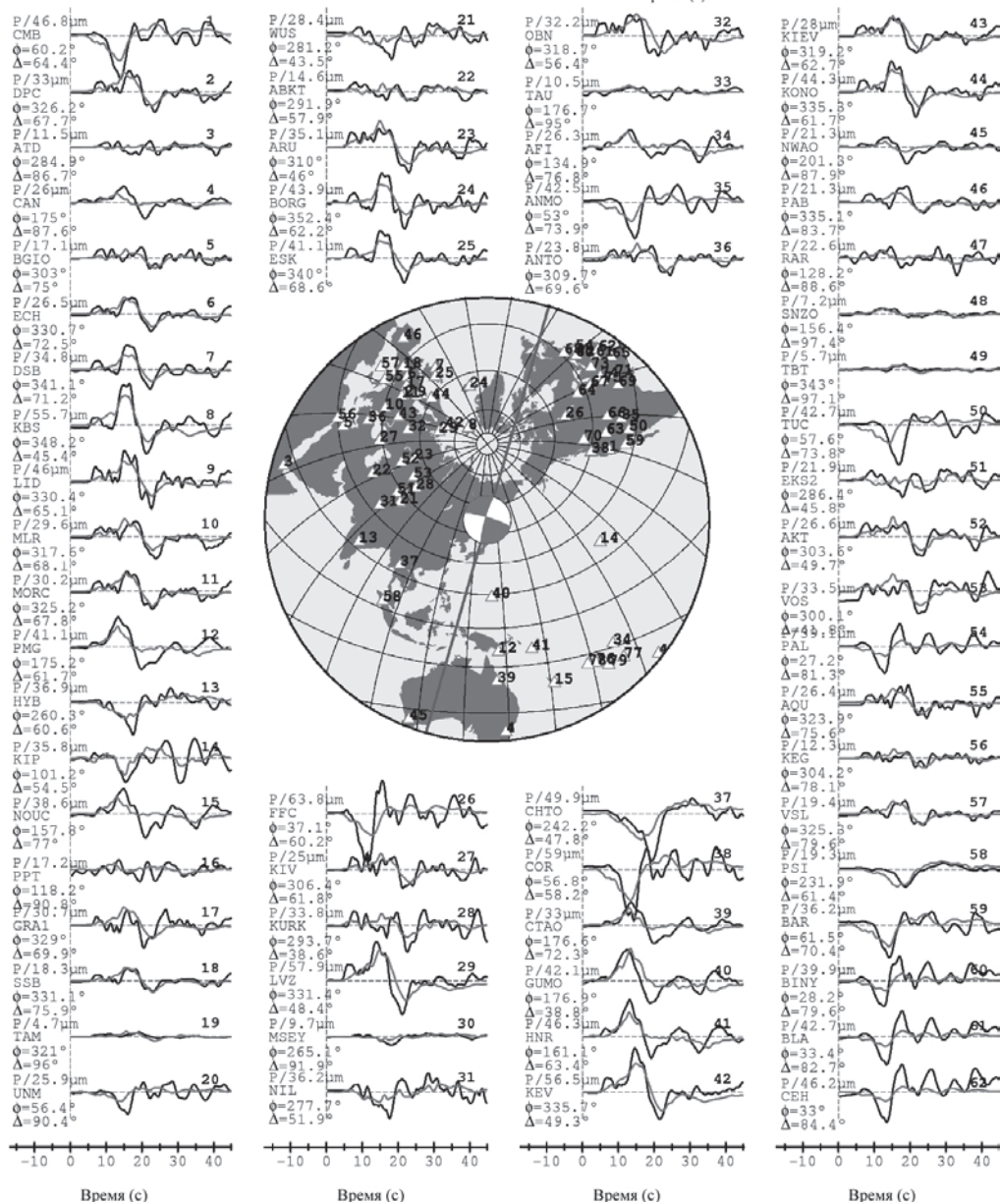
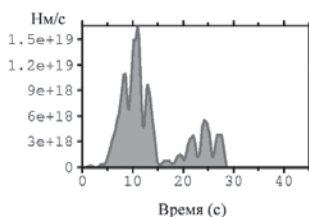


Рис. 2. Азимутальное окружение очага станциями (вставка по центру: светлые треугольники – положение станций; механизм очага Нефтегорского землетрясения) и наблюдаемые (черный цвет) и синтетические (серый цвет) сейсмограммы. Слева от сигнала: первая строка показывает тип волны и максимальную амплитуду в мкм; вторая – код станции; третья – азимутальный угол, четвертая – эпицентрально расстояние  $\Delta$ . В правом верхнем углу – график временной функции очага

записи, характеристики сейсмических каналов, координаты и названия станций, а также информацию о событии (координаты, время, магнитуда).

## Результаты и их обсуждение

Азимутальное окружение очага станциями было неоднородным (рис. 2), поэтому при инверсии использовался прием установления весов станций в зависимости от плотности азимутального покрытия. В работе использовались записи только продольных Р-волн от широкополосных станций мировой сети GSN в диапазоне эпицентральных расстояний от 20 до 100°, на вертикальных каналах (BHZ). В качестве границ очага сейсмического события 27(28).05.1995 г. были приняты границы облака афтершоков. Процедура обработки исходных записей включала снятие вступлений Р-волн, переход к смещениям, фильтрацию в полосе частот 2 мГц – 1 Гц. В процессе отбора волновых форм отбрасывались одна или несколько записей, существенно отличающихся по амплитуде и форме колебаний от группы других, зарегистрированных на близкорасположенных станциях. Всего было отобрано 124 станции, зарегистрировавшие вертикальные компоненты. В конечном итоге использовано 79 сейсмограмм, содержащих вступление Р-волны (рис. 2). Отклонение между реальными и синтетическими волновыми формами составило 0,56.

С помощью инверсионного метода определены параметры тензора момента центроида (СМТ), объединяющий фокальный механизм и значение скалярного сейсмического момента (рис. 2). Сопоставление полученного механизма очага с данными каталога GCMT (<http://www.global.org/>) и исследованиями других авторов [4] показывает их большое сходство. Получена временная функция источника с двумя ярко выраженными пиками (рис. 2). Пики хорошо коррелируют с двумя субразрывами (субочагами), соответствующими механизму очага землетрясения. Построена дислокационная модель очага Нефтегорского землетрясения 27(28) мая 1995 г. (рис. 3). Излучение в очаге было направлено с юга на север. П.г.т. Нефтегорск располагался в 3 км от северной оконечности сейсморазрыва, в результате удар по нему оказался усиленным в несколько раз. В очаговой области обнаружены две зоны неоднородностей, характеризующие развитие очага (рис. 3). Максимальная величина смещения почти 7 м, средняя величина смещения около 4 м. Относительные размеры этих неоднородностей сопоставимы с относительными значениями смещений, измеренных вдоль главного сейсморазрыва. По данным геологов, Нефтегорский сейсморазрыв север-северо-восточного простирания (протяженность около 40 км) нарушил земную поверхность от района горы Таксон на юге до слияния рек Кадылань

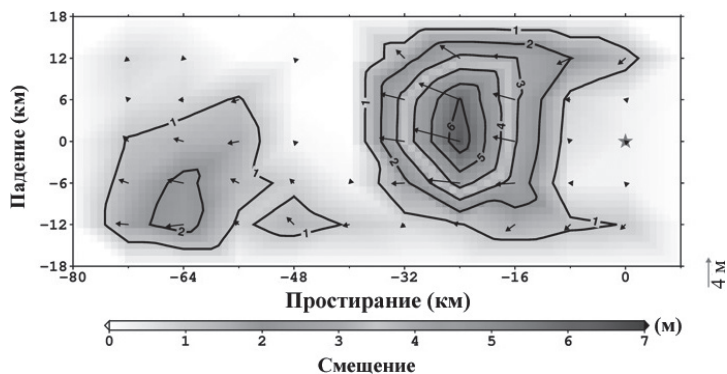


Рис. 3. Развитие фронта разрушения и амплитуды смещения вдоль очаговой плоскости Нефтегорского землетрясения 27(28).05.1995 г. Звездочка – начало «вспарывания» очага; стрелками показаны направления подвижек, цветовая шкала отражает величину подвижки

и Кенига на севере. Преобладающее смещение по разлому представляло собой правосторонний сдвиг (в среднем 3,8 м) с незначительной взбросовой составляющей, величина относительного смещения блоков земной коры достигала 8,1 м [5]. Таким образом, полученная методом инверсии модель очага Нефтегорского землетрясения согласуется с поверхностными проявлениями разрыва по данным полевой геологии.

## Заключение

Прямые наблюдения очага сильного землетрясения возможны лишь в случаях выхода разрыва на поверхность, поэтому наиболее приемлемы косвенные, дистанционные методы исследований в разных сочетаниях и модификациях. Выполненные методом инверсии волновых форм исследования позволили смоделировать развитие сейсмического процесса на примере очаговой зоны разрушительного Нефтегорского землетрясения 27(28) мая 1995 г. Моделируемые параметры очага включали в себя механизм очага для двойного диполя, скалярный сейсмический момент, временную функцию источника, направление подвижек в очаге. Результаты моделирования позволили изучить особенности развития фронта разрушений и амплитуды смещений вдоль очаговой плоскости (средняя расчетная величина подвижки 3,8 м, с максимальным смещением до 7 м). Полученная методом инверсии дислокационная модель очага Нефтегорского землетрясения хорошо согласуется с поверхностными проявлениями разрыва по данным полевой геологии (среднее смещение по разлому 3,8 м, максимальное значение 8,1 м).

## ЛИТЕРАТУРА

1. Арефьев С.С., Дорбан К. Нефтегорское землетрясение 1995 г.: томография очаговой зоны // Физика Земли. 2001. № 2. С. 58–68.
2. Булгаков Р.Ф., Иващенко А.И., Ким Ч.У., Сергеев К.Ф., Стрельцов М.И., Кожурин А.И., Бесстрашнов В.М., Стром А.Л., Сузуки И., Цудуми Х., Ватанабе М., Уеки Т., Шимамото Т., Окумура К., Гото Х., Кария И. Активные разломы Сахалина // Геотектоника. 2002. Т. 36, вып. 3. С. 227–246.
3. Злобин Т.К., Бобков А.В. Особенности положения очагов землетрясений и распределения сейсмической энергии в литосфере Сахалина перед Нефтегорским землетрясением 27(28) мая 1995 года // Тихоокеан. геология. 2003. Т. 22, № 3. С. 107–121.
4. Иващенко А.И., Кузнецов Д.П. и др. Нефтегорское землетрясение 27(28) мая 1995 г. на Сахалине // Нефтегорское землетрясение 27(28).05.1995 г.: инф.-аналит. бюл. / ФССН. Экстр. вып., окт. М., 1995. С. 48–67.
5. Кожурин А.И., Стрельцов М.И. Сейсмотектонические проявления землетрясения 27(28) мая 1995 г. на севере Сахалина // Нефтегорское землетрясение 27(28).05.1995 г.: инф.-аналит. бюл. / ФССН. Экстр. вып., окт. М., 1995. С. 95–116.
6. Коновалов А.В., Семенова Е.П., Сафонов Д.А. Результаты детального изучения очаговой зоны землетрясения 16 марта 2010 года ( $M_w = 5,8$ ) на северо-западе о. Сахалин // Вулканол. и сейсмол. 2012. № 4. С. 37–49.
7. Рогожин Е.А., Нечаев Ю.В., Хованский Б.Н. Космофотолинеаменты очаговой области Нефтегорского землетрясения // Нефтегорское землетрясение 27(28).05.1995 г.: инф.-аналит. бюл. / ФССН. Экстр. вып., окт. 1995. М., 1995. С. 129–134.
8. Старовойт О.Е., Гапсарова И.П., Коломиец М.В., Чепкунас Л.С. Оперативное определение параметров очага разрушительного Нефтегорского землетрясения 27(28) мая 1995 г. // Нефтегорское землетрясение 27(28).05.1995 г.: инф.-аналит. бюл. / ФССН. Экстр. вып., окт. 1995. М., 1995. С. 27–35.
9. Уломов В.И., Перетокин С.А. Об актуализации нормативных карт сейсмического районирования территории Российской Федерации // Инженерные изыскания. 2010. № 1. С. 44–53.
10. Katsumata K., Kasahara M., Ichiyonagi M. et al. The 27 May 1995 MS 7.6 Northern Sakhalin Earthquake: an earthquake on an uncertain plate boundary // Bull. Seism. Soc. Am. 2004. Vol. 94, N 1. P. 117–130.
11. Kikuchi M., Kanamori H., Satake K. Source complexity of the 1988 Armenian earthquake: Evidence for a slow after-slip event // J. Geophys. Res. 1993. Vol. 98. P. 15797–15808.
12. Seno T. The Neftegorsk earthquake as the intraplate event: Tectonic interpretation, in the May 27(28) 1995 Neftegorsk earthquake: Inform. Analyt. Bull. of FSSO. Spec. iss., Oct. Moscow, 1995. P. 135–138.