

СОПОСТАВЛЕНИЕ РАЗЛИЧНЫХ ПОДХОДОВ К ОПРЕДЕЛЕНИЮ КООРДИНАТ ГИПОЦЕТРОВ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ НА ОСНОВЕ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

© 2017г. А.М Аветисян, К.С. Казарян

*Институт геофизики и инженерной сейсмологии
НАН Армении, г. Гюмри, Армения
E-mail: avet.andrey@mail.ru
Поступила в редакцию 19.06.2017г.*

Рассматриваются результаты сопоставления двух подходов к определению координат гипоцентров землетрясений. На различных примерах показано, что определение координат гипоцентров землетрясений на основе минимизации функционала невязок гипоцентральных расстояний даёт более точные и устойчивые результаты по сравнению с подходом, основанным на минимизации функционала невязок времен пробега сейсмических волн.

Введение.

Вопросы точности определения координат очагов землетрясений, а также существования очагов глубоких землетрясений, является чрезвычайно важными с точки зрения геодинамики любого сейсмоактивного региона, успешного прогноза сильных землетрясений, сейсмического районирования и сейсмостойкого строительства.

В сейсмологической практике для определения параметров гипоцентров землетрясений, как правило, используются алгоритмы и программы, в основе которых лежит минимизация функционала невязок теоретических t_i и наблюдаемых \tilde{t}_i времен пробега сейсмических волн (метод Гейгера) (Geiger, 1910).

$$S_i = \sum_{i=1}^n (t_i - \tilde{t}_i)^2$$

Тем не менее, в силу различных подходов к написанию алгоритмов и программ, реализующих упомянутый метод, получаются различные результаты, среди которых трудно выделить тот, который даёт наилучшие результаты. Одним из недостатков существующих программ является отсутствие решения прямой кинематической задачи, которое позволяет оценить точность локации каждого события.

Альтернативный подход к определению координат гипоцентров землетрясений предполагает минимизацию функционала невязок гипоцентральных расстояний (Бурмин, 1992, 2012)

$$S = \sum_{i=1}^n [(D_i - d_i)^2 + (H - h)^2],$$

где D_i , H и d_i , h – эпицентральные расстояния и глубины, соответствующие теоретическим и наблюдаемым временам пробега сейсмических волн. D_i и H определяются из решения системы нелинейных уравнений, которое связывает координаты гипоцентра землетрясений и координаты сейсмических станций: $(X-x_i)^2 + (Y-y_i)^2 + H^2 = v_i^2 (t_i - t_0)^2 = d_i^2 + h^2$,

где X , Y , H и t_0 – координаты гипоцентра и время возникновения землетрясения (время в очаге); x_i , y_i , t_i – координаты сейсмических станций, зарегистрировавших землетрясение, и времена прихода сейсмических волн на эти станции ($i=1, n$); v_i – эффективные скорости распространения сейсмических волн, численно равные отношению расстояния по прямой от i -й станции до гипоцентра к времени пробега сейсмической волны по лучу.

Кроме того, в работах (Бурмин, 1992, 2012) для функционала S_i получена оценка

$$S_i = \sum_{i=1}^n (t_i - \tilde{t}_i)^2 \leq \sum_{i=1}^n \rho_i (D_i - d_i)^2 + Y (H - h)^2 = S.$$

где: $\rho_i = v_i^{-2}$ и $Y = \sum_{i=1}^n \rho_i$ – весовые множители, характеризующие неоднородность среды.

Из полученного соотношения следует, что малые значения функционала S_i не гарантируют малости значений функционалов невязок в определении глубины гипоцентра землетрясения и эпицентральных расстояний, но малые значения функционала S влекут за собой малые значения функционала невязки времен.

Такой подход, по мнению автора метода, позволяет повысить точность и устойчивость определения координат гипоцентров землетрясений.

Основная часть

При создании новых алгоритмов, в ходе проведения расчетов особое значение имеет оценка возможных ошибок. Для этого нами предлагаются различные математические модели, которые (посмотрим, какие результаты) будут выдавать различные программы и подходы при определении значений гипоцентра для заданных глубин 0, 20, 50 и 100км. В качестве тестовых примеров взяты параметры десяти реальных сейсмических станций кавказской сети и условно заданные координаты гипоцентров четырёх событий, которые представлены на рис.1. Координаты станций приведены в табл.1.

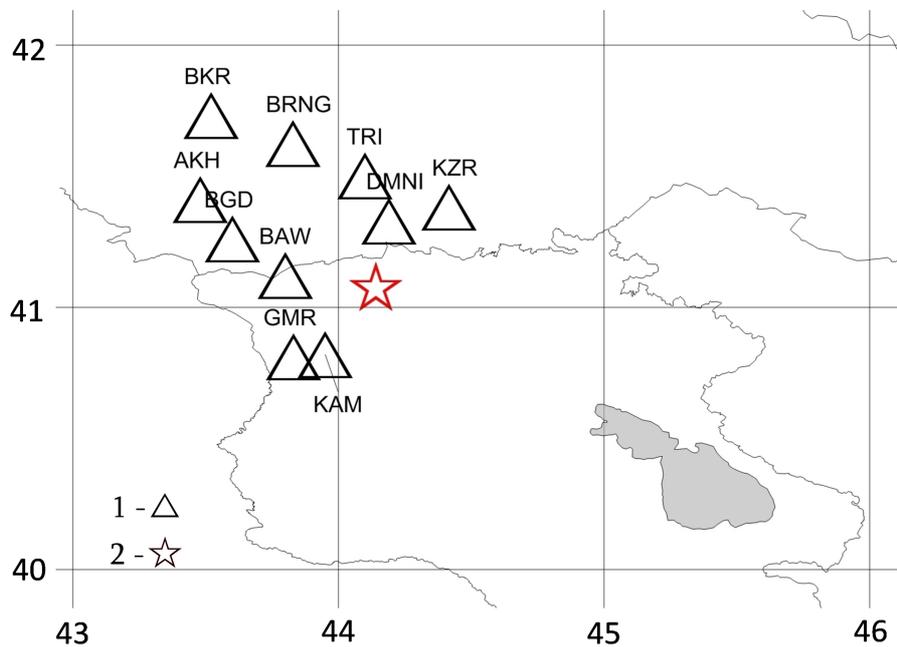


Рис.1. Тестовый эпицентр землетрясения и регистрирующие сейсмические станции.
 - сейсмические станции, 2 – эпицентр землетрясения

Таблица 1

Координаты сейсмических станций.

N	Код станции	Название станции	φ .	λ
1	AKH	Ахалкалаки	41.41	43.48
2	BAW	Бавра	41.12	43.80
3	BGD	Богдановка	41.26	43.60
4	BRNG	Бурнашети	41.6231	43.8276
5	BKR	Бакуриани	41.73	43.52
6	DMNI	Дманиси	41.3291	44.1902
7	GMR	Гюмри	40.81	43.83
8	KAM	Камо	40.82	43.95
9	KZR	Казрети	41.3815	44.4153
10	TRI	Триалети	41.50	44.10

В табл.2 приведена скоростная колонка, по которой подсчитаны прямая задача сейсмологии и программы определения основных параметров землетрясений. В табл.3 приведены времена прихода сейсмических волн на станции для четырех расположений гипоцентров.

Таблица 2

Скоростная колонка продольных и поперечных волн

Границы (км)	Значение скорости V _p над границей (км/с)	Значение скорости V _p под границей (км/с)	Значение скорости V _s над границей (км/с)	Значение скорости V _s под границей (км/с)
0.0	3.0	3.0	1.73	1.73
3.0	5.4	5.4	3.12	3.12
18.0	6.3	7.0	3.64	4.05
36.0	7.0	8.0	4.05	4.62
116.82	7.93	8.45	4.58	4.88
132.42	8.46	8.46	4.89	4.89
132.45	8.20	8.20	4.74	4.74
294.54	8.50	8.50	4.91	4.91
294.60	8.87	8.87	5.13	5.13
301.77	8.89	8.89	5.14	5.14
344.90	9.03	9.03	5.22	5.22
412.59	9.10	9.30	5.26	5.38
476.11	9.64	9.64	5.57	5.57
508.01	9.79	9.79	5.66	5.66
519.66	9.83	9.83	5.68	5.68
555.04	9.95	9.95	5.75	5.75
640.00	9.95	9.95	5.75	5.75

Таблица 3

Времена прихода сейсмических волн на станции для четырех
расположений гипоцентров

1 вариант			2 вариант		
Станции	tp	ts	Станции	tp	ts
DMNI	0006.28	0010.86	DMNI	0006.19	0010.72
BAW	0006.28	0010.87	BAW	0006.20	0010.72
KAM	0006.83	0011.8	KAM	0006.6	0011.42
GMR	0008.09	0013.99	GMR	0007.57	0013.09
KZR	0008.57	0014.83	KZR	0007.94	0013.74
TRI	0009.71	0016.80	TRI	0008.83	0015.28
BGD	0010.10	0017.46	BGD	0009.13	0015.8
BRNG	0013.09	0022.62	BRNG	0011.52	0019.93
AKH	0013.12	0022.69	AKH	0011.55	0019.98
BKR	0017.03	0029.46	BKR	0014.79	0025.59

3 вариант		
Станции	tp	ts
DMNI	0008.77	0015.17
BAW	0008.77	0015.18
KAM	0008.99	0015.56
GMR	0009.57	0016.55
KZR	0009.81	0016.97
TRI	0010.41	0018.00
BGD	0010.62	0018.37
BRNG	0012.41	0021.47
AKH	0012.44	0021.51
BKR	0015.08	0026.08

4 вариант		
Станции	tp	ts
DMNI	0014.46	0025.01
BAW	0014.46	0025.01
KAM	0014.57	0025.21
GMR	0014.88	0025.74
KZR	0015.01	0025.97
TRI	0015.35	0026.56
BGD	0015.47	0026.77
BRNG	0016.60	0028.71
AKH	0016.61	0028.74
BKR	0018.47	0031.95

Поскольку координаты эпицентра известны, то с помощью прямой геодезической задачи можно посчитать эпицентральные расстояния для каждой из этих станций. На следующем этапе по прямой одномерной задаче сейсмологии, для каждой станции задав соответствующее эпицентральное расстояние и глубину, при которой должны считываться значения Р и S волн, получим нужные нам результаты для 0, 20, 50 и 100км. Для получения более точных результатов продольных и поперечных волн, следует взять те значения, которые соответствуют одной и той же ветви годографа, иначе будут возникать определенные невязки времен. Полученные конечные результаты Р и S волн для каждой станции мы импортируем в программы Нуро71 и Нуро_Bur. Следует отметить, что и в прямой одномерной задаче сейсмологии и в этих программах мы поставили одну и ту же скоростную колонку, чтобы расчеты проводились с одинаковыми данными.

Как видно из рисунка, выбрана далеко не оптимальная сеть, станции которой не окружают эпицентр.

В табл.4 приведены данные тестового эпицентра землетрясения и заданные глубины в 4 вариантах 0, 20, 50, 100км и для каждого варианта отдельно подсчитаны эпицентры и глубины.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные результаты показывают, что метод Гейгера дает в основном не плохие результаты. По-видимому, работа с НУРО71 требует определённого опыта, что говорит о неустойчивости метода в определении глубины. Это же следует из поведения функционала невязок времен (Бурмин, 1992, 2012).

Таблица 4

Результаты определения гипоцентров в модельных данных

Тестируемые программы	Эпицентр землетрясения		Время в очаге (мин:сек)	Глубины в км			
	ϕ	λ		0	20	50	100
	41.07	44.14					
Нуро71 Ереван	41.069	44.134	-0:00:01	9.61			
Нуро71 Гюмри	41.2685	44.1745	0:01.33	5.00			
Нуро71 ГС РАН	41.061	44.156	0.50	8.29			
Нуро NAS	41.07811	44.12704	-0.30	4-13			
Нуро_Bur	41.07458	44.13903	0:00.01	0.00			
Нуро71 Ереван	41.081	44.131	-0:01.04		18.96		
Нуро71 Гюмри	41.1007	44.0925	-0:01.08		17.14		
Нуро71 ГС РАН	41 4.3	44 8.3	-0:00.40		19.80		
Нуро NAS	41.09012	44.11015	-0.1		18-25		
Нуро_Bur	41.07553	44.13429	0:00.00		20.27		
Нуро71 Ереван	41.11	44.091	0:01.21			21.25	
Нуро71 Гюмри	41.1178	44.0658	0:00.63			31.58	
Нуро71 ГС РАН	41 4.6	44 7.8	-0:00.10			48.06	
Нуро NAS	41.10099	44.09883	-0.1			40-49	
Нуро_Bur	41.07536	44.13008	0:00.00			50.00	
Нуро71 Ереван	41.049	44.206	0:06.99				16.12
Нуро71 Гюмри	41.1178	44.0658	0:00.63				34.84
Нуро71 ГС РАН	41 4.6	44 7.8	0:00.00				97.98
Нуро NAS	41.09607	44.10222	0.6				85-95
Нуро_Bur	41.07668	44.12657	0:00.00				100.11

Из табл.3 следует, что подход, реализованный в алгоритме и программе «Нуро_Bur», дает более высокую точность при определении параметров гипоцентров землетрясений, как для поверхностных, так и для глубоко-фокусных землетрясений.

Авторы надеются, что все, кто принимал участие в тестировании методов и программ определения параметров гипоцентров, критически

отнесутся к полученным результатам и в дальнейшем расширят круг тестовых примеров и предложат их всем заинтересованным лицам.

Авторы выражают признательность В.Ю. Бурмину, И.П. Габсатаровой, Н.Н. Носковой, В.Э. Асминг, А. Левоняну, которые приняли активное участие в тестировании программ определения гипоцентров землетрясений, которыми они пользуются в своей повседневной работе.

Литература

- Асминг В.Э., Фёдоров А.В., Виноградов А.Н., Виноградов Ю.А., Горюнов В.А., Евтюгина З.И. Система автоматического мониторинга сейсмичности северо-запада России и западного сектора Арктики //Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных. Материалы XI Международной сейсмологической школы / Отв. ред. А.А. Маловичко. – Обнинск, ФИЦ ЕГС РАН, 2016, с.34 – 36. РИНЦ
- Бурмин В.Ю. Новый подход к определению параметров гипоцентров близких землетрясений // Вулканология и сейсмология, 1992, № 3, с.73–82.
- Бурмин В.Ю. Обратные кинематические задачи сейсмологии. Новые подходы и результаты: Saarbrücken, Germany, Palmarium Academic Publishing, 2012, 146с.
- Михайлова Н.Н., Аристова И.Л., Германова Т.И. Годограф сейсмических волн по результатам регистрации сигналов от химических взрывов// Геофизика и проблемы нераспространения: Вестник НЯЦ РК, 2002, Вып. 2(10), с.46-54.
- Asming V., Prokudina A. System for automatic detection and location of seismic events for arbitrary seismic station configuration NSDL // ESC 2016-373, 35th General Assembly of the European Seismological Commission, 4-10 September, 2016.
- Geiger L. Hard Bestimmung bei Erdbeben ans den Ankufzeiten Gesell, Wiss Goett 1910, N 4, p.331-349 (68).

Рецензент С. Маркарян

ԵՐԿՐԱՇԱՐԺԵՐԻ ՀԻՊՈԿԵՆՏՐՈՆՆԵՐԻ ԿՈՈՐԴԻՆԱՏՆԵՐԻ ՈՐՈՇՄԱՆ ՏԱՐԲԵՐ ՄՈՏԵՑՈՒՄՆԵՐԻ ՀԱՄԱԴՐՈՒՄԸ ՄԱԹԵՄԱՏԻԿԱԿԱՆ ՄՈՂԵԼԱՎՈՐՄԱՆ ՄԻՋՈՑՈՎ

Ավետիսյան Ա.Ս., Ղազարյան Կ.Ս.

Ամփոփում

Աշխատանքում դիտարկվում է երկրաշարժերի հիպոկենտրոնների կոորդինատների երկու մոտեցումների համադրման արդյունքները: Տարբեր օրինակներով ցույց է տրված, որ երկրաշարժերի հիպոկենտրոնների կոորդինատների որոշումը հիպոկենտրոնային հեռավորությունների անհամապատասխանությունների ֆունկցիոնալի մինիմիզացման հիման վրա տալիս են ավելի ճշգրիտ և կայուն արդյունքներ, համեմատած սեյսմիկ ալիքների տարածման ժամանակների անհամապատասխանությունների ֆունկցիոնալի մինիմիզացման հիման վրա ստացված արդյունքների հետ:

**COMPARISON OF TWO APPROACHES TO DETERMINE THE
COORDINATES OF THE HYPOCENTERS OF EARTHQUAKES ON THE
BASIS OF MATHEMATICAL MODELING**

A.M. Avetisyan, K.S. Kazaryan

Abstract

We consider the results of a comparison of the two approaches to determine the coordinates of earthquake hypocenters. Various examples show that the determination of earthquakes hypocenters coordinates on the basis of minimizing the functional residuals hypocentral distances gives more accurate and consistent results compared to the approach based on the minimization of the functional residuals of the travel time seismic waves.