

ОЧАГОВЫЕ ПАРАМЕТРЫ ТУРЕЦКИХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ 6 ФЕВРАЛЯ 2023 Г. ПО ТЕЛЕСЕЙСМИЧЕСКИМ ДАННЫМ

Филиппова А.И.^{1,2}, Фомочкина А.С.^{1,3}

¹*Институт теории прогноза землетрясений и математической
геофизики РАН, Москва*

²*Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения
радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН, Москва, Троицк*

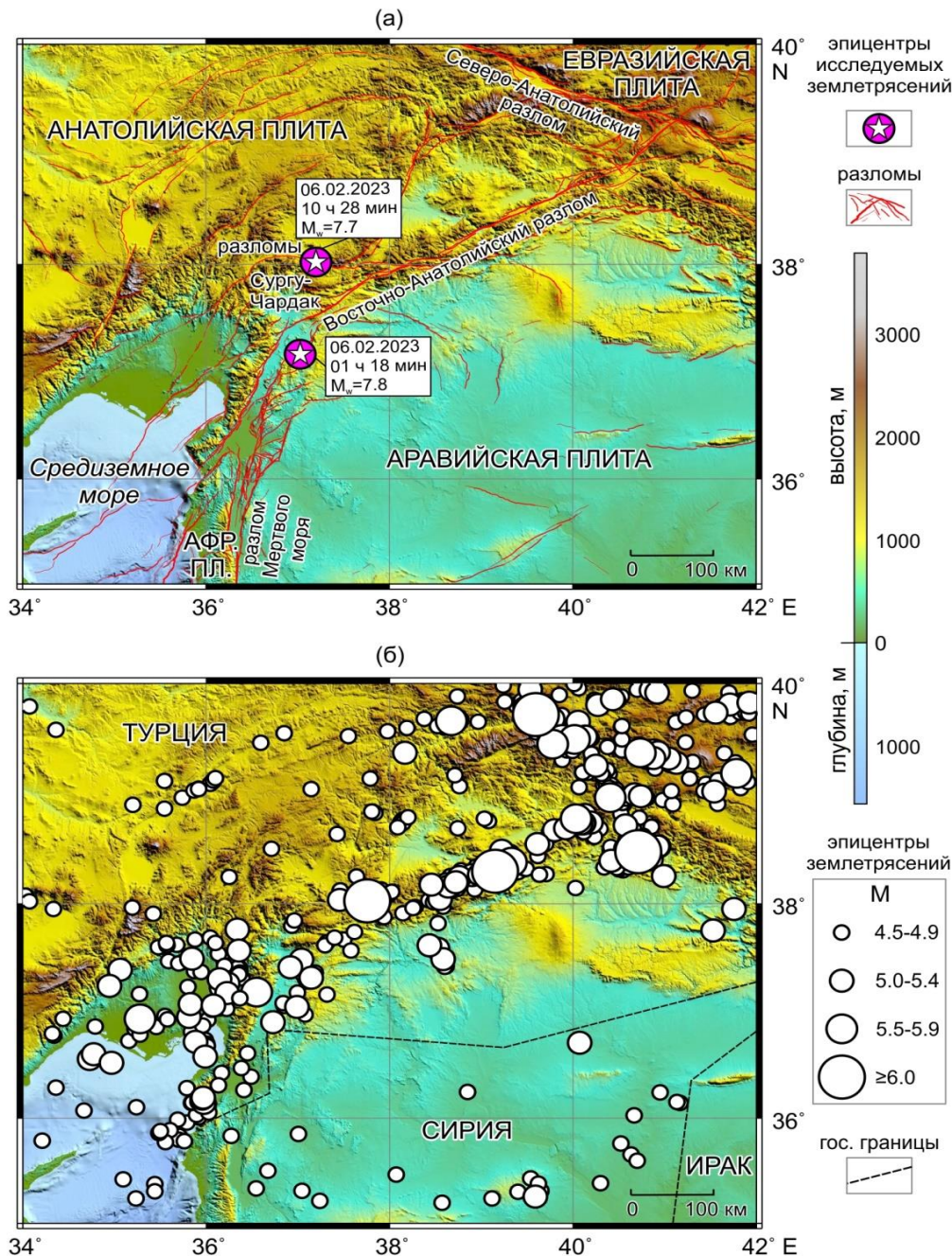
³*РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина, г. Москва, Россия
E-mail: aleirk@mail.ru*

**III Всероссийская научная конференция с
международным участием**

**«Современные методы оценки сейсмической
опасности и прогноза землетрясений»,
посвященная памяти Соловьева А.А.**

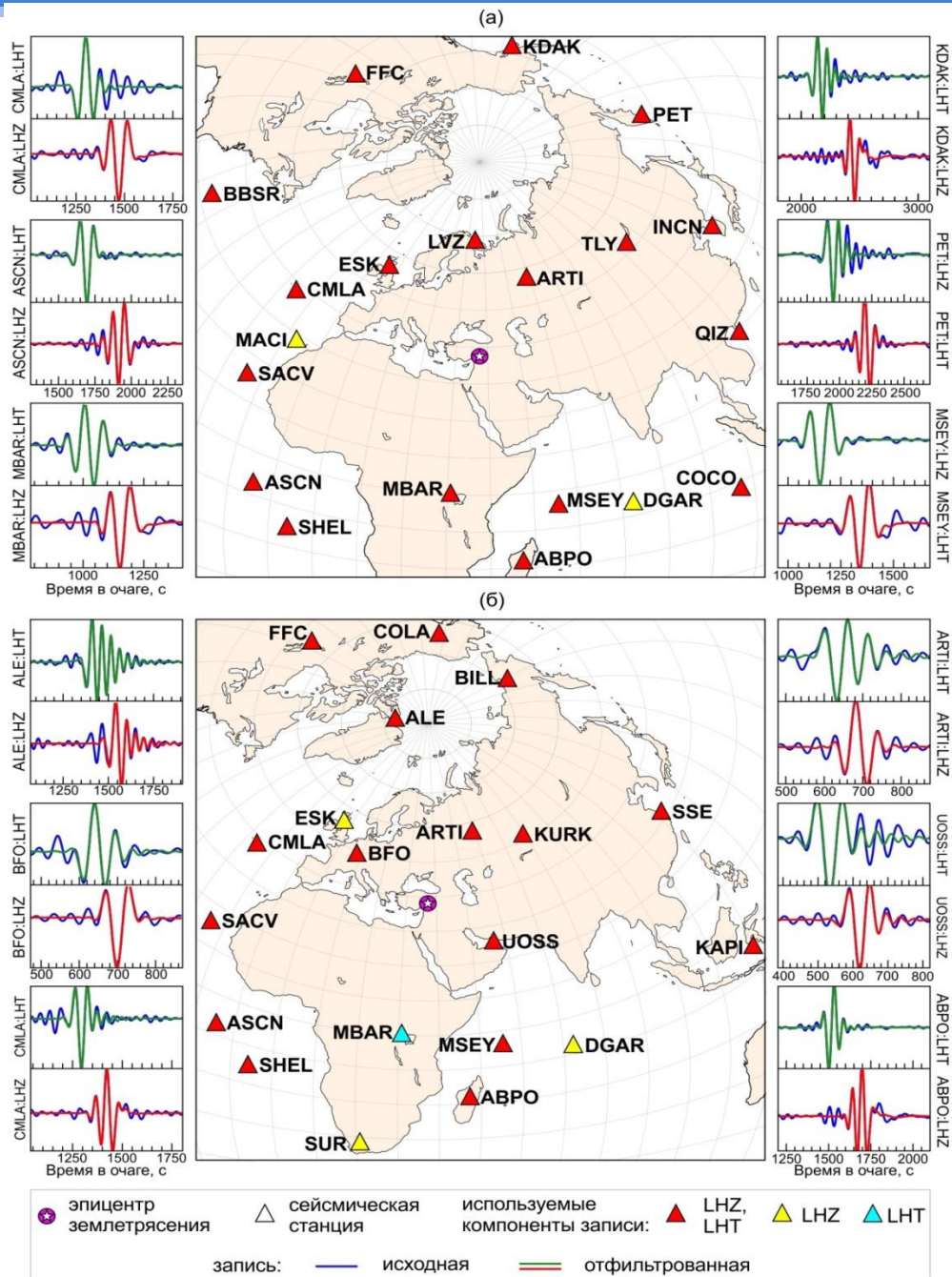
25-26 октября 2023 г., Москва





По записям поверхностных волн, зарегистрированных на телесеизмических расстояниях, для двух сильных Турецких землетрясений 6 февраля 2023 г. ($M_w=7.8$ и $M_w=7.7$) были рассчитаны их очаговые параметры в приближении мгновенного точечного источника и плоской подвижки [Букчин, 1989; Bukchin, 1995].

Рис. 1. Тектоническая схема (а) и сейсмичность исследуемой территории (б). Разломы приведены по [База данных..., 2018; Zelenin et al., 2022], обозначения литосферных плит – по [Bird, 2003], эпицентры землетрясений ($M \geq 4.5$, с 1973 г. по 5 февраля 2023 гг.) – по данным ISC-каталога [International..., 2023], рельеф – согласно глобальной модели ETOPO 2022 [ETOP0..., 2023]. Сокращения: Афр. пл. – Африканская плита.



20 станции сетей II, IU и IC [Albuquerque..., 1992, 2014; Scripps..., 1986]. Эпицентральные расстояния: 2607–9404 км (рис. 2а) и 2309–9689 км (рис. 2б).

Спектры поверхностных волн: метод спектрально-временного анализа [Левшин и др., 1986]. Диапазон периодов: 70–250 с для первого землетрясения и 70–210 с для второго.

Рис. 2. Используемые сейсмические станции с примерами фильтрации записей для первого (а) и второго (б) сильных Турецких землетрясений 6 февраля 2023 г. Коды станций соответствуют международному стандарту. LHZ – вертикальная компонента записи, LHT – трансверсальная компонента записи (результат вращения горизонтальных компонент, направленных на восток (LHE) и север (LHN)).

Приближение мгновенного точечного источника [Букчин, 1989]

Очаг землетрясения моделируется разрывом сплошности по плоской площадке. Силовой эквивалент очага – двойной диполь (double-couple).

$$M_{ij} = M_0 (n_i d_j + n_j d_i)$$

\mathbf{n} , \mathbf{d} – единичные векторы нормали к плоскости разлома и подвижки

Периоды: $T_1=70-250$ с, $T_2=70-210$ с

Определяемые параметры:

- сейсмический момент (моментная магнитуда)
- глубина очага
- положение нодальных плоскостей (азимут, падение, простирание)

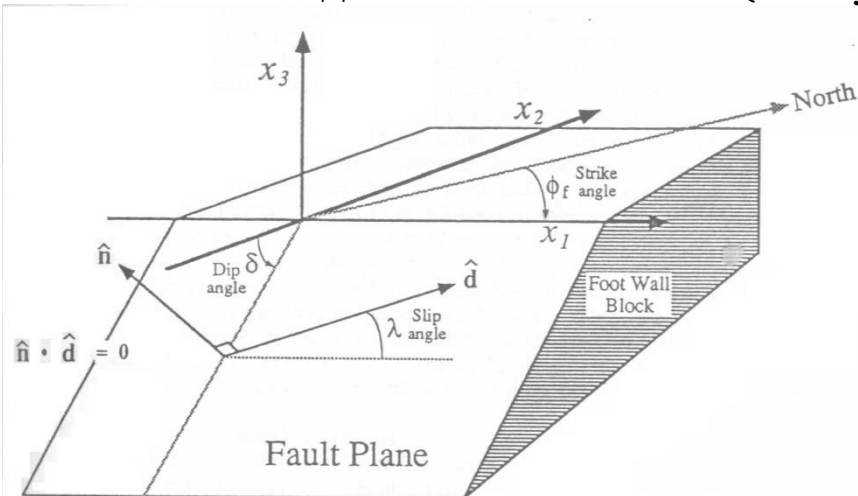


Рис. 3. Параметры нодальных плоскостей

Strike – азимут простирания ($0-360^\circ$)

Dip – угол падения ($0-90^\circ$)

Slip/Rake – угол подвижки ($-180...+180^\circ$)
(определяет смещение висячего блока относительно лежащего)

Приближение сдвиговой дислокации эллиптической формы [Bukchin, 1995]

Определяемые параметры

Шесть интегральных параметров, характеризующих геометрию разрыва и развитие очага во времени:

- продолжительность процесса в очаге (Δt)
- длины большой и малой осей эллипса источника (l_{\max} и l_{\min})
- абсолютное значение средней скорости мгновенного центра (v)
- угол между большой осью эллипса источника и осью простирания (ϕ_1)
- угол между направлением движения мгновенного центра и осью простирания (ϕ_v).

Для возможной идентификации истинной плоскости разрыва [Букчин, 2017] расчеты проводились для обеих нодальных плоскостей фокальных механизмов, полученных на предыдущем этапе.

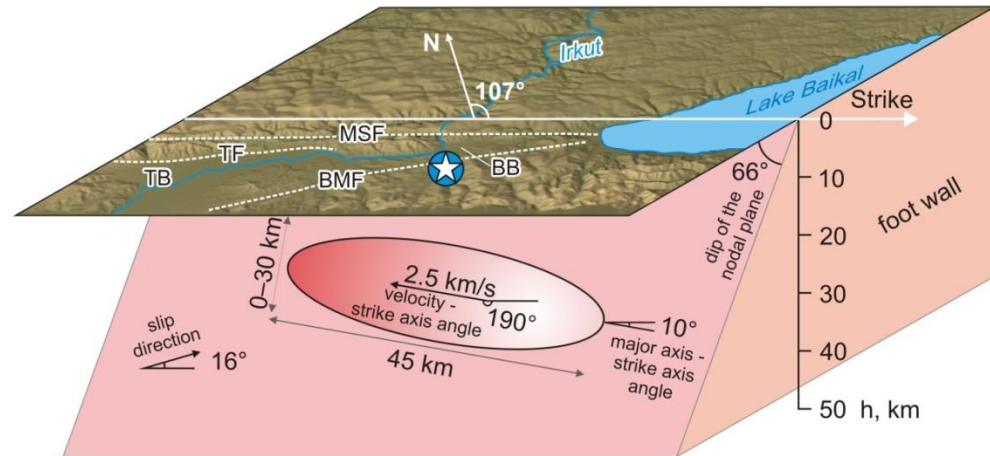


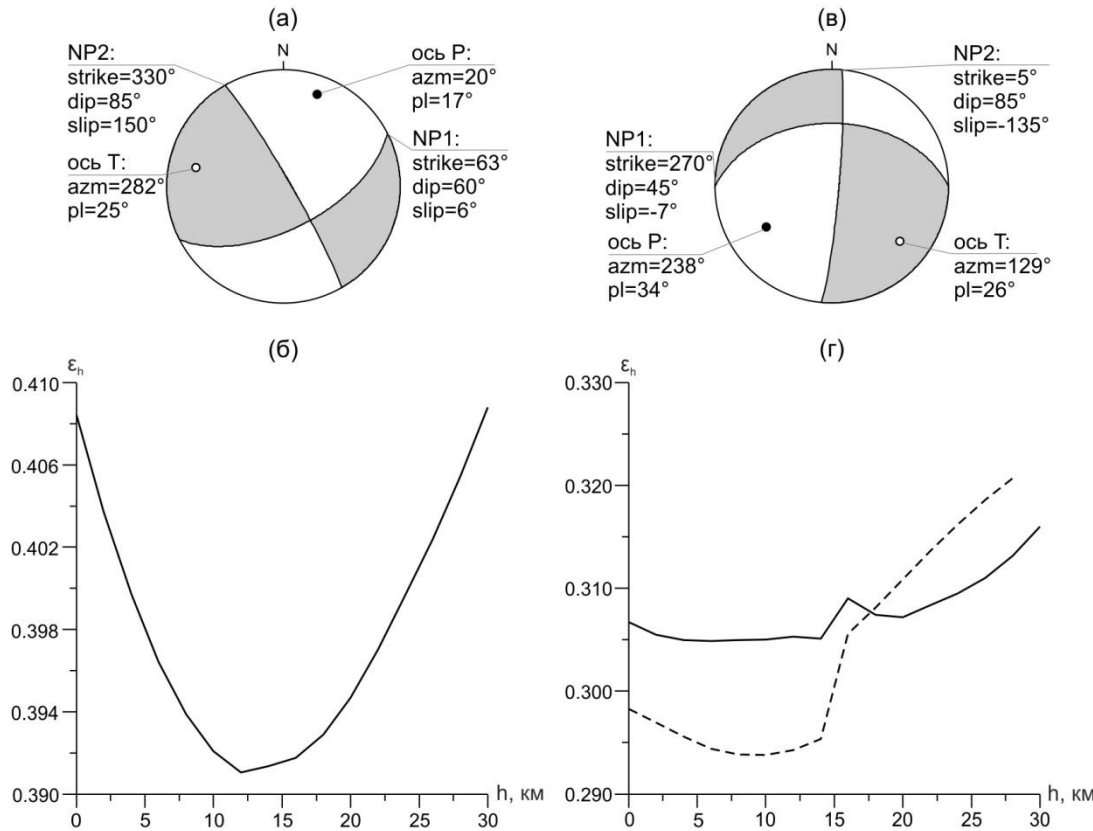
Рис. 4. Пример определяемых параметров для случая Быстринского землетрясения ($M_w=5.6$, 2020 г., Прибайкалье) [Filippova et al., 2022]

Периоды: $T_1=70-150$ с, $T_2=70-120$ с

Модели среды

Строение коры в окрестности очага и под сейсмическими станциями - 3SMAC [Nataf, Ricard, 1996]

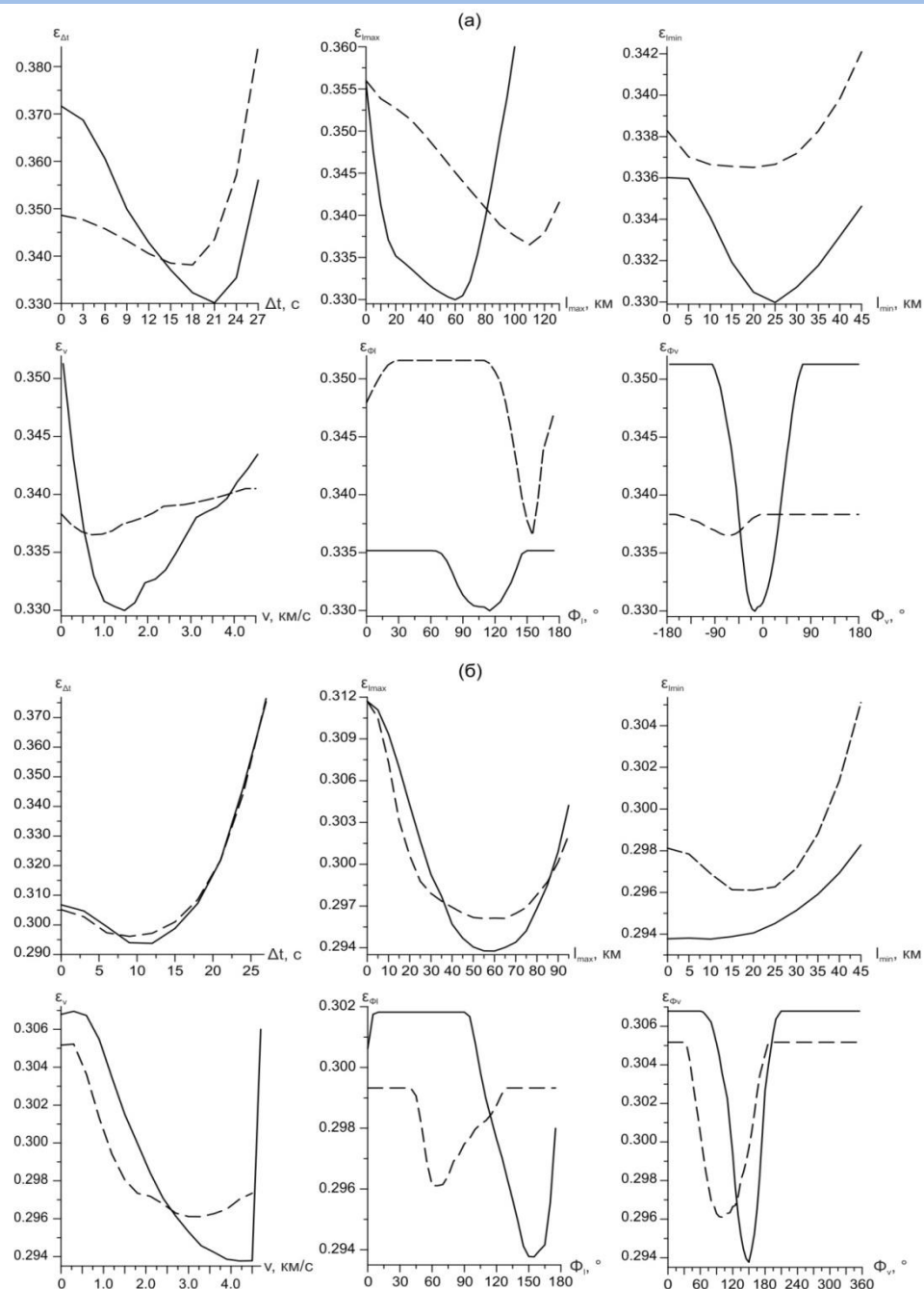
Строение мантии и расчет затухания поверхностных волн - PREM [Dziewonski, Anderson, 1981]



Скалярный сейсмический момент составил $M_0=6.19 \cdot 10^{20}$ Н·м для первого события и $M_0=4.29 \cdot 10^{20}$ Н·м для второго, что соответствует моментным магнитудам $M_w=7.8$ и $M_w=7.7$.

Полученные нами фокальные механизмы показывают, что очаги исследуемых землетрясений сформировались под влиянием сжатия СВ-ЮЗ ориентации и растяжения СЗ-ЮВ ориентации (рис. 5а, в).

Рис. 5. Очаговые параметры первого (а, б) и второго (в, г) сильных Турецких землетрясений 6 февраля 2023 г. в приближении мгновенного точечного источника: механизм очага (а, в) и зависимость частной функции нормированной невязки от глубины очага (б, г). Обозначения: NP – нодальная плоскость, ось Т/Р – ось растяжения/сжатия, strike – направление простирания, dip – угол падения, slip – угол подвижки, azm – азимут, pl – угол погружения. На рис. (г) пунктирная линия соответствует частной функции нормированной невязки, рассчитанной с учетом пространственно-временных размеров очага.



Время действия источника (t) и длина разрыва (L) для первого события составили 52.5 с и 180 км, а для второго – около 30 с и 180 км.

Плоскость разрыва

Для первого события - простирание 63° (соответствует простиранию зоны Восточно-Анатолийского разлома); для второго – простирание 270° (соответствует общему простиранию системы разломов Сургу-Чардак). Таким образом, оба землетрясения представляют собой левосторонние сдвиги, что согласуется с известными данными о кинематике разломов, к которым они приурочены [Balkaya et al., 2021; Bulut et al., 2012; Güvercin et al., 2022].

Рис. 6. Частные функции нормированной невязки для интегральных параметров очагов первого (а) и второго (б) сильных Турецких землетрясений 6 февраля 2023 г., рассчитанные для нодальных плоскостей NP1 (сплошные линии) и NP2 (пунктир), показанных на рис. 5а, в.

Таблица 1. Очаговые параметры сильных Турецких землетрясений 6 февраля 2023 г. в приближении точечного источника по данным различных сейсмологических агентств.

Землетрясение	Агентство	h, км	$M_0 \cdot 10^{20}$, Н·м	M_w
06.02.2023 01 ч 18 мин	GCMT	14.9	6.10	7.8
	NEIC ^{w,*}	17.5	5.39	7.8
	NEIC ^{cmt}	32.6	6.78	7.8
	GEOFON	10 ^f	4.30	7.7
	CPPT	14	-	7.8
	ERD	18	-	7.8
	INGV	23	-	7.7
	IPGP	13	-	8.0
	KOERI	10	-	7.8
	MOS	-	-	-
	OCA	11	-	7.8
06.02.2023 10 ч 24 мин	GCMT	12 ^f	4.97	7.7
	NEIC ^{w,*}	13.5	2.64	7.6
	NEIC ^{bw}	19	2.47	7.5
	GEOFON	15	3.00	7.6
	CPPT	12	-	7.8
	ERD	16	-	7.6
	INGV	14	-	7.7
	IPGP	13	-	7.7
	KOERI	10	-	7.6
	MOS	-	-	-
	OCA	10	-	7.7

Таблица 2. Скалярный сейсмический момент и моментная магнитуда сильных Турецких землетрясений 6 февраля 2023 г. по литературным данным.

Источник	06.02.2023 01 ч 17 мин		06.02.2023 10 ч 24 мин	
	$M_0 \cdot 10^{20}$, Н·м	M_w	$M_0 \cdot 10^{20}$, Н·м	M_w
Barbot et al., 2023	5.40	7.8	3.30	7.6
Jiang et al., 2023	-	8.0	-	7.9
Mai et al., 2023 ^{P-волны}	10.3	8.0	5.03	7.8
Mai et al., 2023 ^{SAR}	6.13	7.8	3.32	7.7
Melgar et al., 2023	6.51	7.8	3.64	7.6
Okuwaki et al., 2023	9.60	7.9	3.20	7.6
Zahradnik et al., 2023	4.50	7.7	2.30	7.5

Примечание. Верхние индексы у [Mai et al., 2023] указывают на тип используемых данных: P-волны – длинопериодные записи P-волн, SAR – спутниковая радарная интерферометрия (данные Sentinel-1).

Таблица 3. Механизмы очагов сильных Турецких землетрясений 6 февраля 2023 г. в приближении точечного источника по данным различных сейсмологических агентств.

Землетрясение	Агентство	Нодальная плоскость			t, с	Φ, °
		strike, °	dip, °	slip, °		
06.02.2023 01 ч 17 мин	GCMT	54	70	11	37.8	15
	NEIC ^{w,*}	228	89	-1	56.0	34
	NEIC ^{cmt}	234	79	14	45.1	45
	GEOFON	51	75	-4	-	19
	CPPT	56	67	11	-	12
	ERD	233	74	18	-	52
	INGV	237	79	0	-	42
	IPGP	230	81	-18	-	43
	KOERI	222	64	-27	-	63
	MOS	218	74	-2	-	52
06.02.2023 10 ч 24 мин	OCA	65	70	11	-	11
	GCMT	261	42	-8	35.8	9
	NEIC ^{w,*}	277	78	4	31.5	34
	NEIC ^{bw}	276	82	-6	-	37
	GEOFON	89	88	10	-	47
	CPPT	256	24	-14	-	23
	ERD	90	86	13	-	49
	INGV	275	62	1	-	18
	IPGP	270	60	-9	-	15
	KOERI	273	67	-9	-	22
MOS	250	59	-22	-	21	
OCA	275	90	20	-	51	

Φ - угол в 3-D пространстве, на который нужно повернуть один двойной диполь, чтобы получить другой [Kagan, 2007]. Диапазон изменения Φ составляет от 0°, что соответствует полностью идентичным двойным диполям, до 120°. В качестве референтных двойных диполей принимались фокальные механизмы, полученные в данной работе (рис. 5а, в).

Причины различий в решениях:

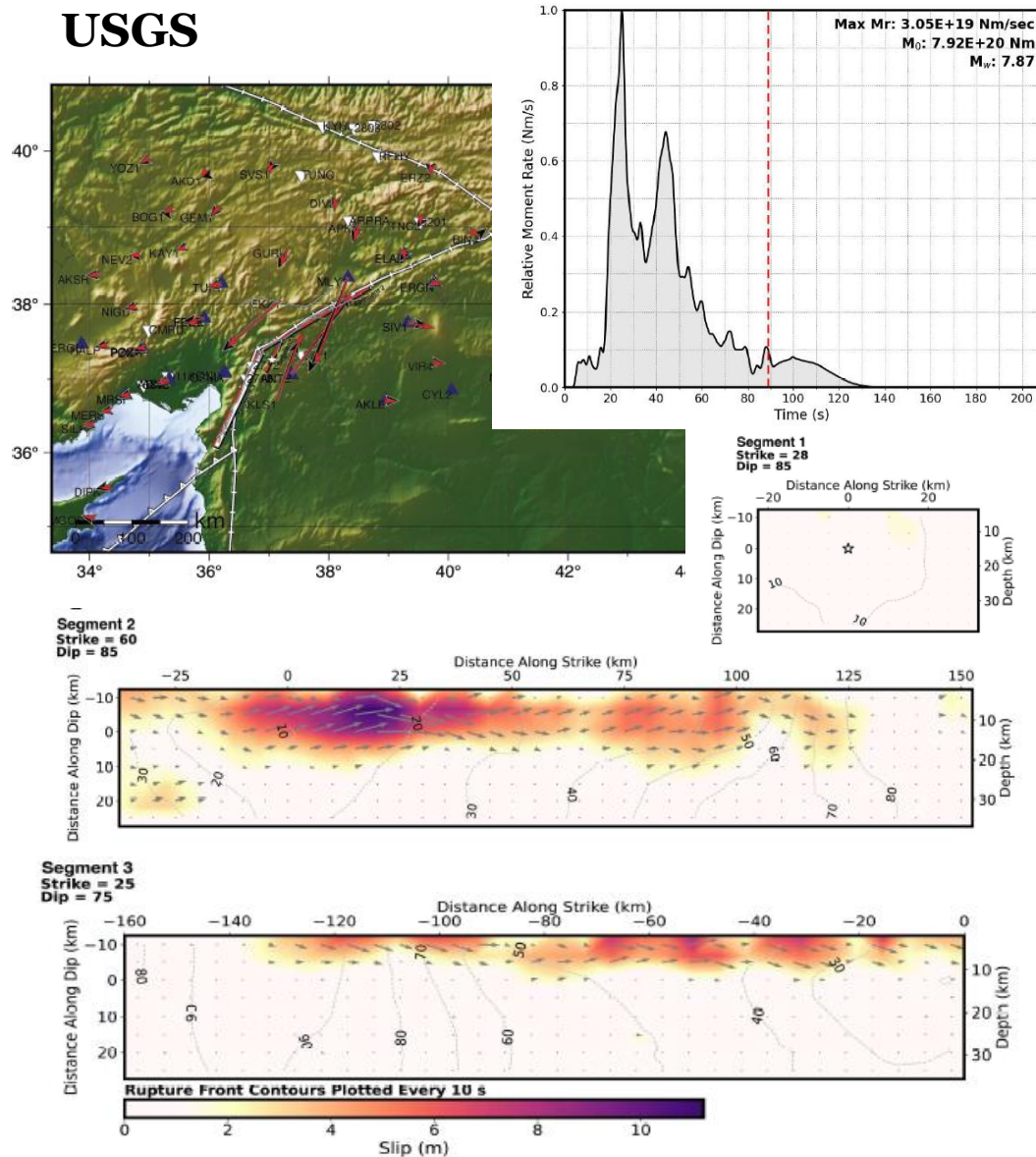
- Неоднозначность определения компонент $M_{r\theta}$ и $M_{r\phi}$ девиаторных тензоров сейсмического момента [Букчин, 2006; Bukchin et al., 2010].
- Оба исследуемых события не могут быть полностью описаны в приближении двойного диполя, принятом нами при расчетах, поскольку они характеризовались сложной геометрией очага [Barbot et al., 2023; Chen et al., 2023; Karabulut et al., 2023; Zahradnik et al., 2023; и др.]

Таблица 4. Длительность источника и длина разрыва для сильных Турецких землетрясений 6 февраля 2023 г.

Источник	06.02.2023 01 ч 17 мин		06.02.2023 10 ч 24 мин	
	t, с	L, km	t, с	L, km
NEIC	90*	300	38*	160
Barbot et al., 2023	-	310	-	150
Chen et al., 2023	80	270	30	110
Delouis et al., 2023	90	300	-	-
Karabacak et al., 2023	-	270	-	-
Karabulut et al., 2023	80–100	300	40	140
Mai et al., 2023	80	320–350	35	150–170
Melgar et al., 2023	60	350	30	160
Okuwaki et al., 2023	75	350	15	80
Zahradnik et al., 2023	70	300	25	100

Примечание. * – длительность, полученная для источника конечных размеров по методу [Ji et al., 2002], отличается от оценок длительности для точечного источника (табл. 3).

$t_1=52.5$ с, $L_1=180$ км и $t_2=30$ с, $L_2=180$ км



1. В приближении мгновенного точечного источника для первого землетрясения, произошедшего в 1 ч 17 мин, были получены значения скалярного сейсмического момента ($M_0=6.19 \cdot 10^{20}$ Н·м), моментной магнитуды ($M_w=7.8$) и глубины очага ($h=12$ км). Для второго землетрясения (10 ч 24 мин) значения этих параметров составили $M_0=4.29 \cdot 10^{20}$ Н·м, $M_w=7.7$, $h=8-10$ км. Очаги обоих событий сформировались под влиянием сжатия СВ-ЮЗ ориентации и растяжения СЗ-ЮВ ориентации, что соответствует региональному полю напряжений.

2. Проведенные для двух нодальных плоскостей расчеты интегральных параметров очага, характеризующих геометрию разрыва и его развитие во времени, позволили идентифицировать истинные плоскости разрыва для рассматриваемых землетрясений. Для первого события это плоскость с направлением простирания 63° (соответствует простиранию зоны Восточно-Анатолийского разлома), углом падения 60° и углом подвижки 6° ; для второго – плоскость с направлением простирания 270° (соответствует общему простиранию системы разломов Сургу-Чардак), углом падения 45° и углом подвижки -7° . Таким образом, оба землетрясения представляют собой левосторонние сдвиги, что согласуется с известными данными о кинематике разломов, к которым они приурочены.

3. Для первого землетрясения полученные нами оценки длительности разрыва и его длины ($t=52.5$ с, $L=180$ км), вероятно, относятся не ко всему разрыву, а только к его основной фазе, приуроченной к северо-восточным сегментам Восточно-Анатолийского разлома и характеризующейся максимальными смещениями и значениями выделившегося сейсмического момента. Полученные нами для второго землетрясения значения $t=30$ с и $L=180$ км характеризуют полностью весь разрыв.



р. Олха
Иркутская обл.