

## ОЧАГОВЫЕ ПАРАМЕТРЫ СИЛЬНЫХ ТУРЕЦКИХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ 06.02.2023 г. ( $M_w = 7.8$ и $M_w = 7.7$ ) ПО ДАННЫМ ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОЛН

© 2023 г. А. И. Филиппова<sup>1, 2, \*</sup>, А. С. Фомочкина<sup>2, 3</sup>

<sup>1</sup>Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН,  
г. Москва, г. Троицк, Россия

<sup>2</sup>Институт теории прогноза землетрясений и математической геофизики РАН, г. Москва, Россия

<sup>3</sup>РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина, г. Москва, Россия

\*E-mail: aleirk@mail.ru

Поступила в редакцию 30.05.2023 г.

После доработки 16.06.2023 г.

Принята к публикации 20.06.2023 г.

По амплитудным спектрам поверхностных волн проведены расчеты очаговых параметров сильных Турецких землетрясений 06.02.2023 г. ( $M_w = 7.8$  и  $M_w = 7.7$ ) в двух приближениях: мгновенного точечного источника и сдвиговой дислокации эллиптической формы. В результате были выделены плоскости разрыва, получены данные о скалярном сейсмическом моменте, моментной магнитуде, фокальном механизме и глубине очага рассматриваемых событий, а также оценки интегральных параметров, характеризующих геометрию разрыва и его развитие во времени. Показано, что очаги исследуемых землетрясений сформировались под влиянием регионального поля напряжений, а их фокальные механизмы представляли собой левосторонние сдвиги с направлением простирания, близким к простиранию зоны Восточно-Анатолийского разлома для первого события и близким к простиранию системы разломов Сургу–Чардак для второго. 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.

*Ключевые слова:* землетрясение, очаговые параметры, поверхностные волны, Восточно-Анатолийский разлом, Турция.

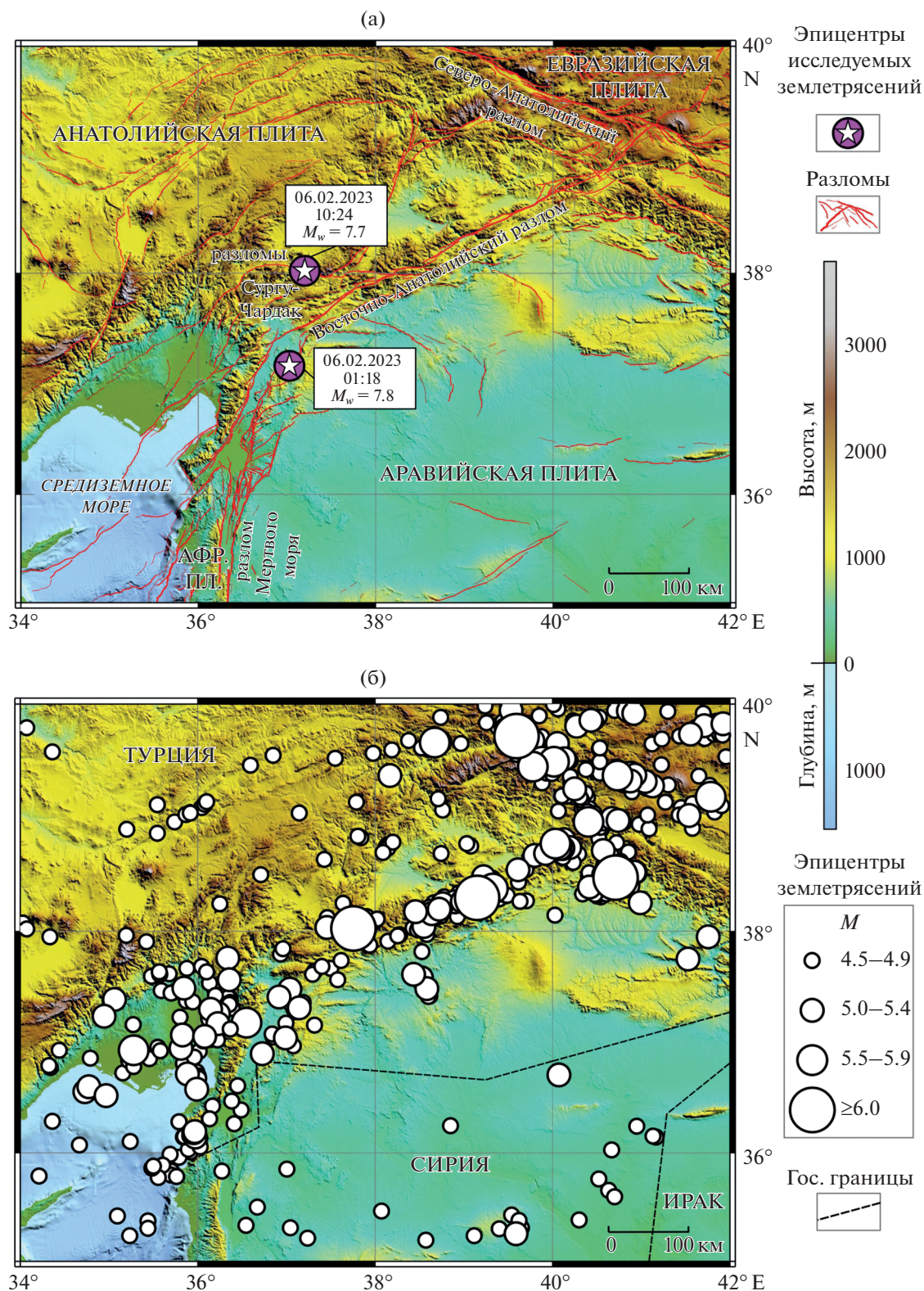
**DOI:** 10.31857/S0002333723060078, **EDN:** DTDKQT

### ВВЕДЕНИЕ

06.02.2023 г. в 1 ч 18 мин (GMT) в провинции Газиантеп (Турция) произошло сильное землетрясение с  $M_w = 7.8$  [Global ..., 2023] (рис. 1а). Через несколько часов после него – в 10 ч 24 мин – в провинции Караманмараш произошло второе сильное землетрясение с  $M_w = 7.7$ . Эпицентры этих событий располагались на расстоянии около 100 км друг от друга, а они сами сопровождалась многочисленными афтершоками [Dal Zilio, Amruero, 2023; Erdik et al., 2023]. Эти землетрясения, унесшие десятки тысяч человеческих жизней, вызвали широкий общественный резонанс и, закономерно, привлекли к себе пристальное внимание мирового научного сообщества [Abdelmeguid et al., 2023; Varbot et al., 2023; Chen et al., 2023; Delouis et al., 2023; Jiang et al., 2023; Karabacak et al., 2023; Kuskuy et al., 2023; Mai et al., 2023; Mel-

gar et al., 2023; Rosakis et al., 2023; Zahradnik et al., 2023; и др.].

Регион, в котором произошли рассматриваемые события, характеризуется высоким уровнем современной сейсмической активности (рис. 1б). Также для него имеются данные о многочисленных исторических землетрясениях с  $M > 6.0$  (например, см. работу [Sesetyan et al., 2023] и ссылки в ней). Исследуемая территория имеет сложное тектоническое строение – здесь вдоль зоны Восточно-Анатолийского разлома проходит граница между Аравийской плитой, движущейся на север, и Анатолийской плитой (или Анатолийским блоком), смешающейся на запад (рис. 1а) [Bird, 2003; McKenzie, 1972; Şengör, Yilmaz, 1981]. На севере к Восточно-Анатолийскому разлому примыкает зона Северо-Анатолийского разлома, являющаяся границей между Евразийской и Анато-



**Рис. 1.** Тектоническая схема (а) и сейсмичность исследуемой территории (б). Разломы приведены по работам [База данных ..., 2018; Zelenin et al., 2022], обозначения литосферных плит – по работе [Bird, 2003], эпицентры землетрясений ( $M \geq 4.5$ , с 1973 г. по 05.02.2023 г.) – по данным ISC-каталога [International ..., 2023], рельеф – согласно глобальной модели ЕТОРО 2022 [ЕТОРО ..., 2023]. Сокращения: Афр. пл. – Африканская плита.

лийской плитой, а на юге – система разломов Мертвого моря, также представляющая собой межплитную границу [Bird, 2003; Bulut et al., 2012]. Именно с движениями вдоль зоны Восточно-Анатолийского разлома связывают первое из рассматриваемых землетрясений, в то время как второе – с движениями вдоль системы разломов Сургу-Чардак (рис. 1а), вероятно, вызванными перераспределением напряжений в результате первого события [Karabulut et al., 2023; Stein et al., 2023].

В настоящей работе по записям поверхностных волн, зарегистрированных на телесеизмических расстояниях, для двух сильных Турецких землетрясений 06.02.2023 г. были рассчитаны их очаговые параметры в приближении мгновенного точечного источника и сдвиговой дислокации эллиптической формы [Букчин, 1989; Bukchin, 1995]. Полученные оценки скалярного сейсмического момента, моментной магнитуды, глубины очага, фокального механизма и интегральных параметров очага, характеризующих геометрию разрыва и его развитие во времени, были сопоставлены с данными, опубликованными на текущий момент времени.

## ДААННЫЕ И МЕТОДЫ

В качестве исходных данных для расчетов очаговых параметров сильных Турецких землетрясений 06.02.2023 г. использовались записи волн Рэлея и Лява на удаленных широкополосных сейсмических станциях сетей II, IU и IC (коды сетей соответствуют международному стандарту) [Albuquerque et al., 1992; 2014; Scripps et al., 1986]. Для анализа отбирались только волновые формы со станций, расположенных в разных азимутах от эпицентров исследуемых событий, с высоким отношением сигнал/шум и нормальной поляризацией поверхностных волн. Всего, таким образом, для каждого землетрясения были отобраны записи 20 сейсмических станций. В первом случае диапазон эпицентральных расстояний составил 2607–9404 км (рис. 2а), во втором – 2309–9689 км (рис. 2б).

Спектры волн Рэлея и Лява определялись с помощью метода спектрально-временного анализа [Левшин и др., 1986]. Диапазон периодов, в котором поверхностные волны выделялись наиболее надежно, подбирался для каждой станции отдельно. В результате для первого землетрясения фильтрация выполнялась на периодах 70–250 с, причем на всех станциях за исключением DGAR и MACI (коды станций соответствуют международному стандарту), где надежно выделяются только волны Рэлея, спектры были получены для обоих типов поверхностных волн (рис. 2а). Для второго события диапазон анализируемых периодов составил 70–210 с, кроме ЛНТ-компоненты

станции KURK, волны Лява на которой были отфильтрованы только до 140 с. На станциях DGAR, SUR и ESK были отобраны только волны Рэлея, на станции MBAR – только волны Лява (рис. 2б).

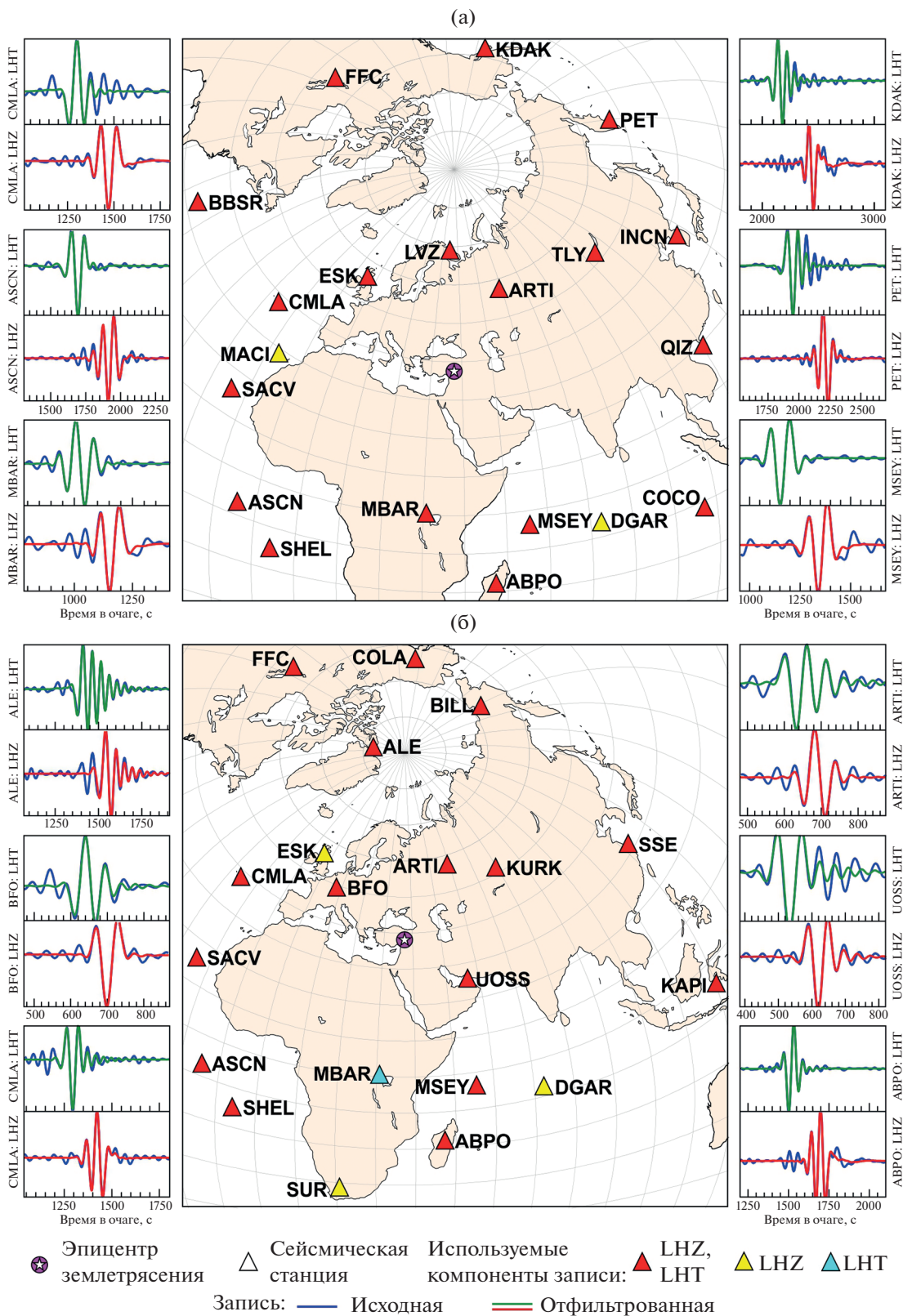
На первом этапе вычислений очаги исследуемых землетрясений рассматривались в приближении мгновенного точечного источника. По полученным амплитудным спектрам поверхностных волн в полных диапазонах отфильтрованных периодов для каждого из них рассчитывался тензор сейсмического момента в приближении двойного диполя (*double-couple*) и глубина очага [Букчин, 1989]. В результате определялись следующие параметры: скалярный сейсмический момент ( $M_0$ ), глубина очага ( $h$ ) и четыре эквивалентных решения фокального механизма, отличающиеся направлениями простирания и подвижки. Моментные магнитуды ( $M_w$ ) рассчитывались по полученным значениям скалярного сейсмического момента по соотношению из работы [Hanks, Kanamori, 1979].

Для нахождения единственного решения фокального механизма в качестве дополнительных данных могут использоваться знаки первых вступлений *P*-волн [Lasserre et al., 2001] или фазовый спектр поверхностных волн [Букчин, 1989]. Поскольку для рассматриваемых сейсмических событий распределения знаков *P*-волн, опубликованных на данный момент в различных бюллетенях [EMSC/CSEM, 2023; International ..., 2023], весьма противоречивы, для каждого из них в качестве единственного и окончательного решения выбирался один из четырех эквивалентных фокальных механизмов, полученный по амплитудным спектрам поверхностных волн и наилучшим образом удовлетворяющий их фазовому спектру.

Строение земной коры под сейсмическими станциями и в окрестностях очагов землетрясений задавалось моделью 3SMAC [Nataf, Ricard, 1996]. Для описания строения верхней мантии и расчета затухания поверхностных волн использовалась сферически симметричная модель PREM [Dziewonski, Anderson, 1981]. Отметим, что применяемая нами процедура инверсии очаговых параметров является устойчивой относительно выбора модели среды [Середкина, Козьмин, 2017; Seredkina et al., 2020].

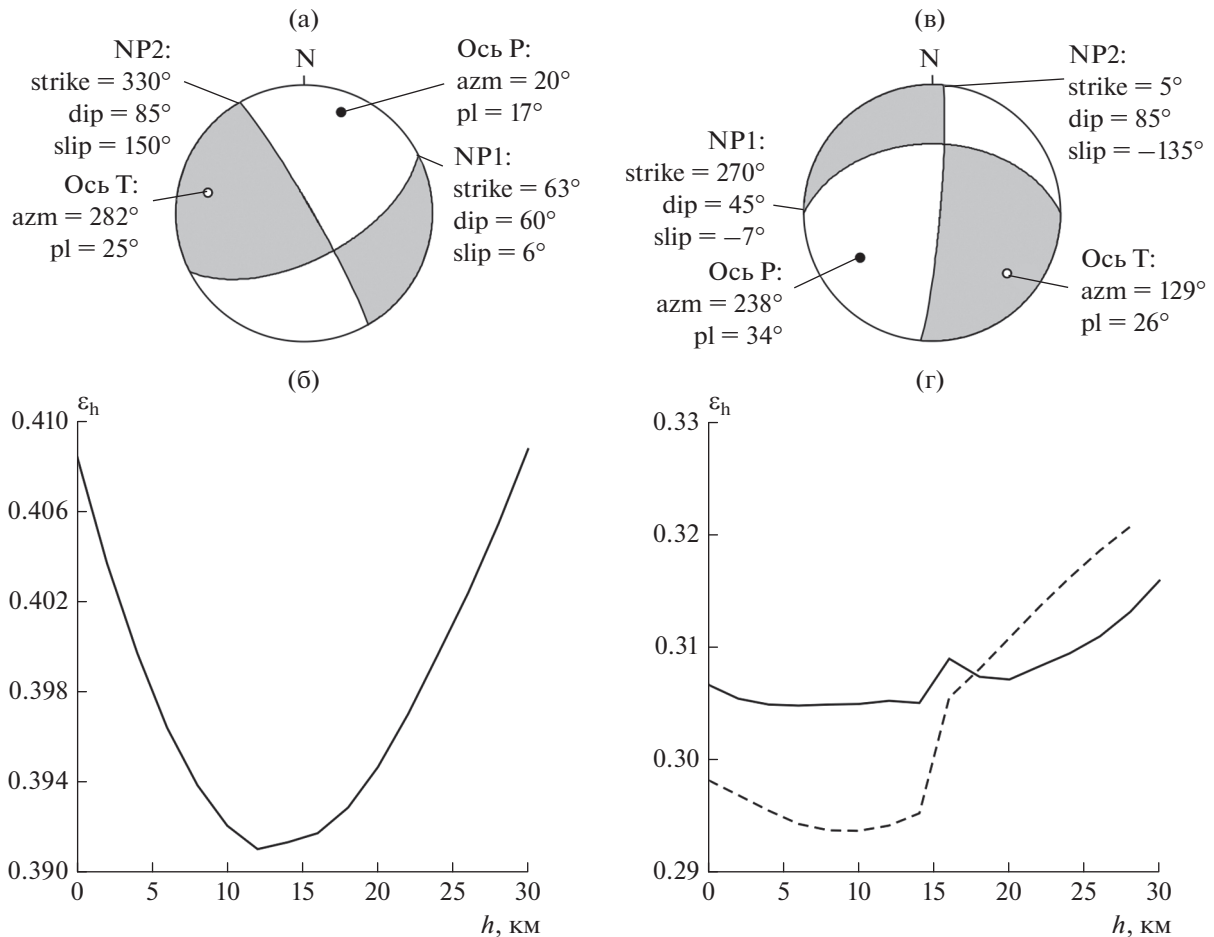
На втором этапе вычислений очаги исследуемых землетрясений моделировались в виде сдвиговой дислокации эллиптической формы [Букчин, 1995]. Для первого из них расчеты проводились в диапазоне периодов 70–150 с, для второго – 70–120 с. Всего оценивались шесть интегральных параметров, характеризующих геометрию разрыва и развитие очага во времени: продолжительность процесса в очаге ( $\Delta t$ ), длины большой и малой осей эллипса источника ( $l_{\max}$  и  $l_{\min}$ ), абсолют-





**Рис. 2.** Используемые сейсмические станции с примерами фильтрации записей для первого (а) и второго (б) сильных Турецких землетрясений 06.02.2023 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)).





**Рис. 3.** Очаговые параметры первого (а), (б) и второго (в), (г) сильных Турецких землетрясений 06.02.2023 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.

ное значение средней скорости мгновенного центра (v), угол между большой осью эллипса источника и осью простирания ( $\phi_l$ ), угол между направлением движения мгновенного центра и осью простирания ( $\phi_v$ ). Для возможной идентификации истинной плоскости разрыва [Букчин, 2017] расчеты проводились для обеих нодальных плоскостей фокальных механизмов, полученных на предыдущем этапе. Используемый метод ранее успешно применялся для исследований сильных землетрясений [Bukchin et al., 2020; Clévéde et al., 2004; 2012].

Качество полученных результатов оценивалось с помощью функции нормированной невязки ( $\epsilon$ ) [Bukchin, 1995; Lasserre et al., 2001]. Эта функция характеризует отличие синтетических спектров поверхностных волн, соответствующих расчетным значениям очаговых параметров, от спектров наблюдаемых записей, отфильтрован-

ных методом спектрально-временного анализа. Для оценки разрешения определяемых параметров строились частные функции нормированной невязки. Для этого расчеты проводились лишь для одного параметра (например, глубины (рис. 3б, 3г)), а остальным присваивались фиксированные значения, обеспечивающие минимум функции  $\epsilon$ .

### РЕЗУЛЬТАТЫ

Результаты расчетов очаговых параметров сильных Турецких землетрясений 06.02.2023 г. в приближении мгновенного точечного источника представлены на рис. 3. Скалярный сейсмический момент составил  $M_0 = 6.19 \times 10^{20}$  Н м для первого события и  $M_0 = 4.29 \times 10^{20}$  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. 3а, 3в). Для глубины очага первого землетрясения нами было получено значение 12 км, причем данный параметр характеризуется хорошим разрешением (рис. 3б). Для второго события глубина в приближении мгновенного точечного источника имела невысокое разрешение – от 6 до 14 км (сплошная кривая на рис. 3г), поэтому глубина была пересчитана с учетом пространственно-временных размеров очага (пунктирная кривая на рис. 3г). В результате оценка глубины составила 8–10 км. Таким образом, оба землетрясения произошли в верхней части земной коры, где скорости  $P$ - и  $S$ -волн равняются примерно 5.8 и 3.3 км/с соответственно [Acarel et al., 2019].

Значения функции нормированной невязки ( $\epsilon$ ) для полученных в приближении мгновенного точечного источника моделей очагов исследуемых землетрясений составили 0.391 и 0.305 для первого и второго событий соответственно. При этом стоит отметить, что  $\epsilon$  зависит не только от качества полученного решения, но и от количества используемых данных, в том числе от диапазона периодов. Это частично является причиной более высокого значения  $\epsilon$  для первого землетрясения, так как для него инверсия проводилась в более широком диапазоне периодов.

На рис. 4 приведены частные функции нормированной невязки для шести интегральных параметров очагов исследуемых сейсмических событий, характеризующих геометрию разрывов и их развитие во времени. Как уже упоминалось ранее, расчеты проводились для обеих нодальных плоскостей, показанных на рис. 3а, 3в, с целью возможной идентификации истинной плоскости разрыва. Известно, что, рассматривая очаг землетрясения в приближении мгновенного точечного источника, по сейсмологическим данным невозможно выделить одну из нодальных плоскостей как истинную плоскость разрыва в силу симметричности излучения. Однако с учетом конечных размеров очага такая идентификация становится принципиально возможной. В работе [Букчин, 2017] показано, что для истинной плоскости разрыва интегральные параметры очага, рассчитанные по поверхностным волнам, характеризуются меньшими значениями функции нормированной невязки. В случае если длина большой оси эллипса очага в несколько раз превосходит длину его малой оси, идентификация плоскости разрыва возможна для фокальных механизмов, представляющих собой чистый сдвиг, и не может быть выполнена в случае чистых взбросов или сбросов.

Для интегральных параметров первого из рассматриваемых землетрясений минимальные значения функции нормированной невязки для но-

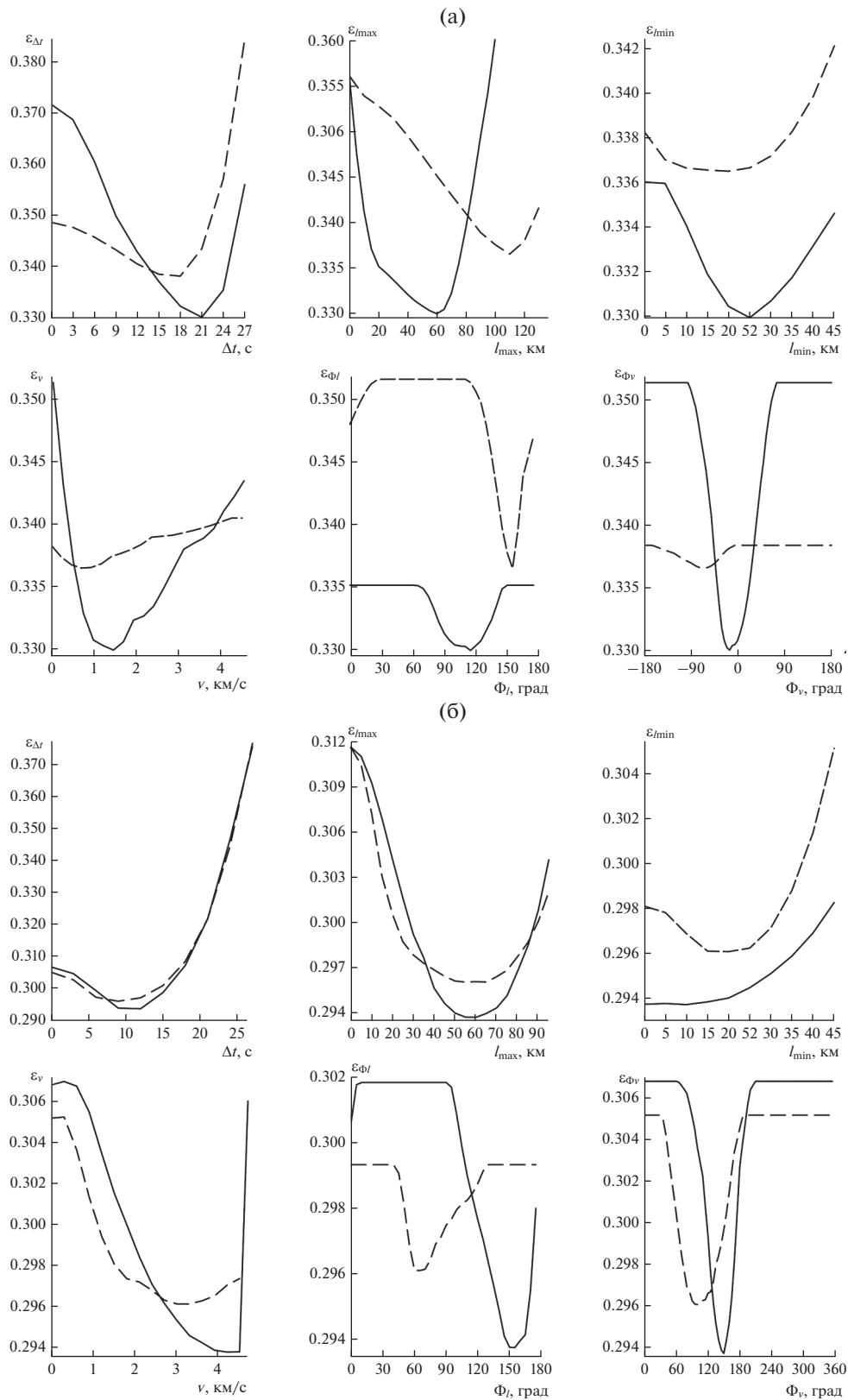
дальных плоскостей с простиранием  $63^\circ$  (NP1 на рис. 3а) и  $330^\circ$  (NP2) составили 0.330 и 0.337 соответственно (рис. 4а), что позволяет нам выделить NP1 как истинную плоскость разрыва. Таким образом, это землетрясение представляет собой левосторонний сдвиг с простиранием, близким к простиранию зоны Восточно-Анатолийского разлома (рис. 1а). Интегральные параметры второго землетрясения, рассчитанные для двух нодальных плоскостей, характеризуются меньшим отличием невязок. Так, для плоскости с простиранием  $270^\circ$  (NP1 на рис. 3в) минимальное значение  $\epsilon$  равняется 0.294, а для NP2 (простирание  $5^\circ$ ) – 0.296 (рис. 4б). Тем не менее, как показывают результаты наших предыдущих исследований очагов отдельных землетрясений и их тектонической позиции [Фомочкина, Филиппова, 2023; Bukchin et al., 2020; Filippova et al., 2022], даже столь малое отличие невязок позволяет выделить NP1 в качестве истинной плоскости разрыва. Следовательно, второе из рассматриваемых землетрясений представляет собой левосторонний сдвиг по системе разломов Сургу–Чардак (рис. 1а).

В результате для истинной плоскости разрыва для первого землетрясения были получены следующие значения интегральных параметров (рис. 4а): интегральная длительность источника  $\Delta t = 21$  с, длины большой и малой осей эллипса источника  $l_{\max} = 60$  км и  $l_{\min} = 25$  км, абсолютное значение средней скорости мгновенного центроида  $v = 1.5$  км/с, угол между большой осью эллипса источника и осью простирания  $\phi_l = 115^\circ$ , угол между направлением движения мгновенного центроида и осью простирания  $\phi_v = 350^\circ$ . Для второго события значения интегральных параметров составили (рис. 4б):  $\Delta t = 10$ – $12$  с,  $l_{\max} = 55$ – $60$  км,  $l_{\min} = 0$ – $15$  км,  $v = 4.0$ – $4.5$  км/с,  $\phi_l = 150^\circ$ – $155^\circ$ ,  $\phi_v = 150^\circ$ . Отметим, что для него разрешение интегральных параметров в целом несколько хуже, чем для первого землетрясения.

Если предположить Гауссовское распределение плотности момента и принять в качестве реальных оценок длительности очага и его пространственных размеров значения, соответствующие 99% доверительному уровню, то реальное время действия источника ( $t$ ) превышает интегральную оценку длительности очага в 2.5 раза, а реальные размеры очаговой области превышают интегральные оценки в 3 раза [Bukchin et al., 2020]. Следовательно, 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.

## ОБСУЖДЕНИЕ

Значения скалярного сейсмического момента и моментной магнитуды для исследуемых земле-



**Рис. 4.** Частные функции нормированной невязки для интегральных параметров очагов первого (а) и второго (б) сильных Турецких землетрясений 06.02.2023 г., рассчитанные для нодальных плоскостей NP1 (сплошные линии) и NP2 (пунктир), показанных на рис. 3а, 3в.



трясений, опубликованные на текущий момент времени сейсмологическими агентствами и полученные в результате специальных исследований, имеют довольно большой разброс (табл. 1, табл. 2). Для оценок, основанных только на сейсмологических данных, это может быть частично связано с различиями в используемых частотных диапазонах. Кроме того, в некоторых случаях отклонения могут быть связаны с недостатками принятых моделей. Так, в работе [Jiang et al., 2023] были получены максимальные магнитуды для обоих рассматриваемых событий, однако они могут быть завышены из-за высоких погрешностей на отдельных станциях, связанных с неучитываемыми при расчетах эффектами направленности излучения. Для первого землетрясения большинство сейсмологических агентств дает совпадающую с нашей оценкой магнитуды  $M_w = 7.8$  (табл. 1). Интересно, что то же самое значение было получено во всех работах, где сейсмический момент и моментная магнитуда вычислялись с помощью спутниковой радарной интерферометрии [Barbot et al., 2023; Mai et al., 2023; Melgar et al., 2023] (табл. 2). Для второго землетрясения оценки этих параметров имеют больший разброс (табл. 1, табл. 2), но в среднем согласуются с нашими результатами ( $M_0 = 4.29 \times 10^{20}$  Н м,  $M_w = 7.7$ ).

Опубликованные значения глубин очагов рассматриваемых землетрясений также характеризуются большим разбросом. Для обоих событий минимальная глубина 7.5 км получена в работе [Zhradnik et al., 2023], однако разрешение этого параметра, как упоминают сами авторы, довольно низкое. Максимальное значение глубины для первого землетрясения, равное 32.6 км (NEIC<sup>cmf</sup> в табл. 1), получено в результате инверсии длиннопериодных объемных и поверхностных волн [Dziewonski, Woodhouse, 1983]. Для второго события максимальная глубина (19 км) рассчитана по данным длиннопериодных объемных волн с помощью метода [Sipkin, 1982] (NEIC<sup>bw</sup> в табл. 1). При этом большинство оценок не превышает 18 км в первом случае и 14 км во втором (табл. 1), что в целом не противоречит нашим результатам (рис. 3б, 3г).

Различные механизмы очагов рассматриваемых землетрясений (рис. 3а, 3в, табл. 1) неплохо согласуются между собой. Это подтверждается малыми значениями угла  $\Phi$  (табл. 1), представляющего собой угол в 3D-пространстве, на который нужно повернуть один двойной диполь, чтобы получить другой [Kagan, 2007]. Диапазон изменения  $\Phi$  составляет от  $0^\circ$ , что соответствует полностью идентичным двойным диполям, до  $120^\circ$ . В качестве референтных двойных диполей принимались фокальные механизмы, полученные в данной работе (рис. 3а, 3в). Некоторые отличия наших решений от представленных в табл. 1, мо-

гут быть объяснены особенностями определения тензора момента для мелкофокусных источников. Они связаны, во-первых, с неоднозначностью определения компонент  $M_{\theta}$  и  $M_{\phi}$  девиаторных тензоров сейсмического момента. Указанная неоднозначность возникает в случае, если глубина исследуемого землетрясения существенно меньше длин волн, используемых для расчетов очаговых параметров [Букчин, 2006; Bukchin et al., 2010]. Во-вторых, оба исследуемых события не могут быть полностью описаны в приближении двойного диполя, принятом нами при расчетах, поскольку они характеризовались сложной геометрией очага. На это указывает существенная (до 24% для первого землетрясения и до 66% для второго) несдвиговая компонента в тензорах, опубликованных в GCMT- и NEIC-каталогах [Global ..., 2023; National ..., 2023]. Сложный очаг, включающий в себя несколько фаз разрыва, отличающихся по своим механизмам, также был выявлен в результате специальных исследований [Barbot et al., 2023; Chen et al., 2023; Karabulut et al., 2023; Zhradnik et al., 2023; и др.] (см. далее).

Выделенные нами по значениям функций нормированной невязки для интегральных характеристик очага (рис. 4) плоскости разрыва (NP1 на рис. 3а, 3в), а также характер движений по ним (левосторонний сдвиг), подтверждаются результатами, полученными с помощью спутниковой радарной интерферометрии [Barbot et al., 2023; Mai et al., 2023; Melgar et al., 2023], полевых наблюдений [Karabacak et al., 2023], совместного анализа сейсмологических и геодезических данных [Zhradnik et al., 2023]. Таким образом, фокальный механизм, полученный для первого землетрясения, хорошо согласуется с известными представлениями о кинематике движений по Восточно-Анатолийскому разлому. Так, согласно работам [Bulut et al., 2012; Güvercin et al., 2022; и ссылки в них] для него характерны сдвиговые смещения с небольшой взбросовой компонентой, при этом скорость движений по разлому изменяется от 1–4 мм/год на западе до ~10 мм/год на востоке. Левосторонние смещения также установлены по геологическим данным для системы разломов Сургу–Чардак [Balkaya et al., 2021]. Интересно, что очаг не только первого, но и второго из рассматриваемых событий сформировался под влиянием сжатия СВ–ЮЗ ориентации и растяжения СЗ–ЮВ ориентации (рис. 3а, 3в), что соответствует региональному полю напряжений, установленному в результате глобальных [Heidbach et al., 2018] и региональных реконструкций [Yilmaz et al., 2006].

Рассчитанные в данной работе длительность источника и длина разрыва для первого из рассматриваемых землетрясений ( $t = 52.5$  с,  $L = 180$  км) существенно ниже, чем практически все имеющиеся оценки этих параметров (табл. 3). Такое

**Таблица 1.** Очаговые параметры сильных Турецких землетрясений 06.02.2023 г. в приближении точечного источника по данным различных сейсмологических агентств

Землетрясение	Агентство	$h$ , км	$M_0 \times 10^{20}$ , Н · м	$M_w$	Нодальная плоскость			$t$ , с	$\Phi$ , °
					strike, °	dip, °	slip, °		
06.02.2023 г. 01 ч 18 мин	GCMT	14.9	6.10	7.8	54	70	11	37.8	15
	NEIC <sup>w,*</sup>	17.5	5.39	7.8	228	89	−1	56.0	34
	NEIC <sup>cmt</sup>	32.6	6.78	7.8	234	79	14	45.1	45
	GEOFON	10 <sup>f</sup>	4.30	7.7	51	75	−4	—	19
	CPPT	14	—	7.8	56	67	11	—	12
	ERD	8.6	—	7.7	233	74	18	—	52
	INGV	23	—	7.7	237	79	0	—	42
	IPGP	13	11.7	8.0	230	81	−18	—	43
	KOERI	10	—	7.7	222	64	−27	—	63
	MOS	—	—	—	218	74	−2	—	52
OCA	11	—	7.8	65	70	11	—	11	
06.02.2023 г. 10 ч 24 мин	GCMT	12 <sup>f</sup>	4.97	7.7	261	42	−8	35.8	9
	NEIC <sup>w,*</sup>	13.5	2.64	7.6	277	78	4	31.5	34
	NEIC <sup>bw</sup>	19	2.47	7.5	276	82	−6	—	37
	GEOFON	15	3.00	7.6	89	88	10	—	47
	CPPT	12	—	7.8	256	24	−14	—	23
	ERD	7	—	7.6	90	86	13	—	49
	INGV	14	—	7.7	275	62	1	—	18
	IPGP	13	4.14	7.7	270	60	−9	—	15
	KOERI	10	—	7.6	273	67	−9	—	22
	MOS	—	—	—	250	59	−22	—	21
OCA	10	—	7.7	275	90	20	—	51	

Примечания: GCMT – The Global CMT Project, Lamont Doherty Earth Observatory, Columbia University, USA (<https://www.globalcmt.org>); NEIC – National Earthquake Information Center, USA (<https://earthquake.usgs.gov>); GEOFON – GFZ German Research Centre for Geosciences, Helmholtz Centre Potsdam, Germany (<https://www.gfz-potsdam.de>); CPPT – CEA, Sciences de la Terra et de l'Environnement, France (<https://www-dase.cea.fr/>); ERD – Earthquake Research Department, Ankara, Turkey (<https://deprem.afad.gov.tr>); INGV – Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Italy (<http://terremoti.ingv.it>); IPGP – Institut de physique du globe de Paris, Paris, France (<http://geoscope.ipgp.fr>); KOERI – Kandilli Observatory and Earthquake Research Institute, Istanbul, Turkey (<http://www.koeri.boun.edu.tr>); MOS – Федеральный исследовательский центр «Единая геофизическая служба» РАН, г. Обнинск, Россия (<http://www.ceme.gsras.ru>); OCA – SismoAzur (<https://sismoazur.oca.eu>). Для всех агентств, за исключением MOS, где очаг изначально моделируется в приближении двойной пары сил, приведены параметры одной из нодальных плоскостей наилучшего (в геометрическом смысле) двойного диполя (*best double-couple*). Верхние индексы у NEIC указывают на тип используемых данных и процедуру их инверсии: *w* – *W*-фаза [Kanamori, Rivera, 2008; Hayes et al., 2009]; *cmt* – длиннопериодные объемные и поверхностные волны [Dziewonski, Woodhouse, 1983]; *bw* – длиннопериодные объемные волны [Sipkin, 1982]; \* – наиболее предпочтительное решение из приведенных в NEIC. Верхний индекс *f* соответствует фиксированным значениям глубины.

несоответствие может быть связано со сложным характером очага. Так, согласно моделям из работ [Abdelmeguid et al., 2023; Barbot et al., 2023; Karabulut et al., 2023; Mai et al., 2023; Melgar et al., 2023; National ..., 2023; Rosakis et al., 2023; Zahradnik et al., 2023], основанным на различных исходных данных, это землетрясение началось на разломе Нарли, оперяющем Восточно-Анатолийский разлом и имеющем практически субмеридиональную ориентацию. Начальная фаза разрыва

продолжалась 10–20 с, а его длина составила около 10–40 км. Далее разрыв распространялся била-терально вдоль Восточно-Анатолийского разлома, захватив различные его сегменты. Судя по полученным нами значениям длительности источника и длины разрыва, а также установленному про-стиранию плоскости разрыва (63°), можно сде-лать вывод о том, что они описывают не весь разрыв, а только его северо-восточную часть, от-носящуюся к северо-восточным сегментам Во-

**Таблица 2.** Скалярный сейсмический момент и моментная магнитуда сильных Турецких землетрясений 06.02.2023 г. по литературным данным

Источник	06.02.2023 г. 01 ч 18 мин		06.02.2023 г. 10 ч 24 мин	
	$M_0 \times 10^{20}$ , Н · м	$M_w$	$M_0 \times 10^{20}$ , 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] <sup>P-волны</sup>	10.3	8.0	5.03	7.8
[Mai et al., 2023] <sup>SAR</sup>	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

Примечания: Верхние индексы в первом столбце указывают на тип используемых данных: *P*-волны – длиннопериодные записи *P*-волн; SAR – спутниковая радарная интерферометрия (данные Sentinel-1).

**Таблица 3.** Длительность источника и длина разрыва для сильных Турецких землетрясений 06.02.2023 г.

Источник	06.02.2023 г. 01 ч 18 мин		06.02.2023 г. 10 ч 24 мин	
	<i>t</i> , с	<i>L</i> , км	<i>t</i> , с	<i>L</i> , км
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 из работы [Ji et al., 2002], отличается от оценок длительности для точечного источника (табл. 1).

сточно-Анатолийского разлома и соответствующую второму сегменту в модели [National ..., 2023], сегментам ABCD в работе [Zahradnik et al., 2023], северо-восточным сегментам в работах [Barbot et al., 2023; Chen et al., 2023; Delouis et al., 2023; Mai et al., 2023]. Оценки длительности разрыва для этих сегментов составляют около 50 с, а его длины – от 140 до 190 км, что согласуется с нашими результатами. При этом следует отметить, что в подавляющем большинстве упомянутых исследований эти сегменты характеризуются максимальными смещениями и значениями выделившегося сейсмического момента, то есть они представляют собой основную фазу разрыва. Полученные нами для второго землетрясения значения  $t = 30$  с и  $L = 180$  км близки к оценкам, приведенным в табл. 3, за исключением работы [Okuwaki et al., 2023]. Примечательно, что только в этой работе была получена наиболее простая модель очага (без сегментов, но со сложной геомет-

рией разлома) для рассматриваемого события, в то время как остальные результаты свидетельствуют о билатеральном характере разрыва вдоль нескольких сегментов.

Рассчитанные нами значения средней скорости мгновенного центра (рис. 4), не могут быть напрямую сопоставлены с имеющимися оценками скоростей разрыва для исследуемых землетрясений. Даже для землетрясений, разрыв у которых распространялся преимущественно в одном направлении, в некоторых случаях этот параметр существенно меньше, чем скорость разрыва [Clévéde et al., 2012; Gómez et al., 1997], в других, напротив, больше [Bukchin et al., 2020] или примерно равен скорости разрыва [Filipova et al., 2022]. Тем не менее, рассмотрим далее основные результаты, касающиеся скоростей разрыва, полученные для сильных Турецких землетрясений 06.02.2023 г. на текущий момент времени.



Опубликованные данные о скоростях разрывов для рассматриваемых событий весьма противоречивы. Так, для первого из них в работе [Melgar et al., 2023] было получено значение 3.2 км/с, а согласно работе [Mai et al., 2023] разрыв распространялся в юго-западном направлении со скоростью около 2.0 км/с, а в северо-восточном — от 2.5 до 3.0 км/с. То есть полученные в этих работах скорости разрыва ( $V_r$ ) меньше, чем скорости  $S$ -волн ( $V_s$ ) [Acarel et al., 2019]. Это также подтверждается результатами [Delouis et al., 2023], свидетельствующими о том, что для большей части разрыва  $V_r < V_s$ , и лишь на небольших по протяженности участках между различными сегментами  $V_r > V_s$ . В частности, такой участок был выделен на северо-востоке первого сегмента рассматриваемого землетрясения, приуроченного к разлому Нарли [Rosakis et al., 2023]. В то же время результаты других исследований показывают, что  $V_r > V_s$  практически для всего разрыва [Abdelmeguid et al., 2023; Okuwaki et al., 2023]. Существенный разброс в оценках скорости присутствует и для второго землетрясения. Ее значения изменяются от 2.8 км/с ( $V_r < V_s$ ), характеризующих распространение разрыва в восточном направлении, до 4.8 км/с ( $V_r > V_s$ ) для западного направления [Melgar et al., 2023]. Скорость разрыва, превышающая скорости  $S$ -волн, для этого события также получена в работе [Okuwaki et al., 2023].

## ВЫВОДЫ

По результатам проведенного нами анализа сильных Турецких землетрясений 06.02.2023 г., основанного на данных поверхностных волн, зарегистрированных на телесеismicких расстояниях, были сделаны следующие выводы.

1. В приближении мгновенного точечного источника для первого землетрясения, произошедшего в 1 ч 18 мин, были получены значения скалярного сейсмического момента ( $M_0 = 6.19 \times 10^{20}$  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  $M_0 = 4.29 \times 10^{20}$  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  $63^\circ$  (соответствует простиранию зоны Восточно-Анатолийского разлома), углом падения  $60^\circ$  и углом по-

движки  $6^\circ$ ; для второго — плоскость с направлением простирания  $270^\circ$  (соответствует общему простиранию системы разломов Сургу–Чардак), углом падения  $45^\circ$  и углом подвижки  $-7^\circ$ . 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 выделенного сейсмического момента. Полученные нами для второго землетрясения значения  $t = 30$  с и  $L = 180$  км характеризуют полностью весь разрыв.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- База данных активных разломов Евразии. Масштаб: 1 : 1 000 000. ГИН РАН. 2018. <http://neotec.ginras.ru/database.html>
- Букчин Б.Г. Об определении параметров очага землетрясения по записям поверхностных волн в случае неточного задания характеристик среды // Изв. АН СССР. Сер. Физика Земли. 1989. № 9. С. 34–41.
- Букчин Б.Г. Особенности излучения поверхностных волн мелкофокусным источником // Физика Земли. 2006. № 8. С. 88–93.
- Букчин Б.Г. Описание очага землетрясения в приближении вторых моментов и идентификация плоскости разлома // Физика Земли. 2017. № 2. С. 76–83. <https://doi.org/10.7868/S0002333717020041>
- Левшин А.Л., Яновская Т.Б., Ландер А.В., Букчин Б.Г., Бармин М.П., Ратникова Л.И., Итс Е.Н. Поверхностные сейсмические волны в горизонтально-неоднородной Земле. М.: Наука. 1986. 278 с.
- Середкина А.И., Козьмин Б.М. Очаговые параметры Таймырского землетрясения 9 июня 1990 г. // Докл. РАН. 2017. Т. 473. № 2. С. 214–217. <https://doi.org/10.7868/S0869565217060202>
- Фомочкина А.С., Филиппова А.И. Очаговые параметры Улахан-Чистайского землетрясения 20 января 2013 г. (Якутия) по данным поверхностных волн // Вопросы инженерной сейсмологии. 2023. Т. 50. № 3. С. 17–29. <https://doi.org/10.21455/VIS2023.3-2>
- Abdelmeguid M., Zhao C., Yalcinkaya E., Gazetas G., Elbanna A., Rosakis A. Revealing The dynamics of the Feb 6th 2023 M7.8 Kahramanmaraş/Pazarcik earthquake: near-field records and dynamic rupture modeling. Pre-print, EarthArXiv. 2023. <https://arxiv.org/pdf/2305.01825.pdf> Last accessed 17 May 2023.
- Albuquerque Seismological Laboratory/USGS. 2014. Global Seismograph Network (GSN - IRIS/USGS) [Data set]. International Federation of Digital Seismograph Networks. <https://doi.org/10.7914/SN/IU>
- Albuquerque Seismological Laboratory (ASL)/USGS. 1992. New China Digital Seismograph Network [Data set].

- International Federation of Digital Seismograph Networks. <https://doi.org/10.7914/SN/IC>
- Acarel D., Cambaz M.D., Turhan F., Mutlu A.K., Polat R.* Seismotectonics of Malatya fault, Eastern Turkey // *Open Geosciences*. 2019. V. 11. № 1. P. 1098–1111. <https://doi.org/10.1515/geo-2019-0085>
- Balkaya M., Ozden S., Akyüz H.S.* Morphometric and morphotectonic characteristics of Sürgü and Çardak Faults (East Anatolian Fault Zone) // *J. Advanced Research in Natural and Applied Sciences*. 2021. V. 7. № 3. P. 375–392. <https://doi.org/10.28979/jarnas.939075>
- Barbot S., Luo H., Wang T., Hamiel Y., Piatibratova O., Javed M.T., Braitenberg C., Gurbuz G.* Slip distribution of the February 6, 2023  $M_w$  7.8 and  $M_w$  7.6, Kahramanmaraş, Turkey earthquake sequence in the East Anatolian fault zone // *Seismica*. 2023. V. 2. № 3. <https://doi.org/10.26443/seismica.v2i3.502>
- Bird P.* An updated digital model of plate boundaries // *Geochem. Geophys. Geosyst.* 2003. V. 4. № 3. 1027. <https://doi.org/10.1029/2001GC000252>
- Bukchin B.* Determination of stress glut moments of total degree 2 from teleseismic surface wave amplitude spectra // *Tectonophysics*. 1995. V. 248. P. 185–191. [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(94\)00271-A](https://doi.org/10.1016/0040-1951(94)00271-A)
- Bukchin B., Clévéde E., Mostinskiy A.* Uncertainty of moment tensor determination from surface wave analysis for shallow earthquakes // *J. Seismol.* 2010. V. 14. P. 601–614. <https://doi.org/10.1007/s10950-009-9185-8>
- Bukchin B.G., Fomochkina A.S., Kossobokov V.G., Nekrasova A.K.* Characterizing the foreshock, main shock, and aftershock sequences of the recent major earthquakes in Southern Alaska, 2016–2018 // *Frontiers in Earth Science*. 2020. V. 8. 584659. <https://doi.org/10.3389/feart.2020.584659>
- Bulut F., Bohnhoff M., Eken T., Janssen C., Kiliç T., Dresen G.* The East Anatolian fault zone: seismotectonic setting and spatiotemporal characteristics of seismicity based on precise earthquake locations // *J. Geophys. Res.* 2012. V. 117. B07304. <https://doi.org/10.1029/2011JB008966>
- Chen W., Rao G., Kang D., Wan Z., Wang D.* Early report of the source characteristics, ground motions, and casualty estimates of the 2023  $M_w$  7.8 and 7.5 Turkey earthquakes // *J. Earth Sci.* 2023. V. 34. P. 297–303. <https://doi.org/10.1007/s12583-023-1316-6>
- Clévéde E., Bukchin B., Favreau P., Mostinskiy A., Aoudia A., Panza G.F.* Long-period spectral features of the Sumatra-Andaman 2004 earthquake rupture process // *Geophys. J. Int.* 2012. V. 191. P. 1215–1225. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2012.05482.x>
- Clévéde E., Bouin M.-P., Bukchin B., Mostinskiy A., Patau G.* New constraints on the rupture process of the 1999 August 17 Izmit earthquake deduced from estimates of stress glut rate moments // *Geophys. J. Int.* 2004. V. 159. P. 931–942. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2004.02304.x>
- Dal Zilio L., Ampuero J.P.* Earthquake doublet in Turkey and Syria // *Commun. Earth Environ.* 2023. V. 4. 71. <https://doi.org/10.1038/s43247-023-00747-z>
- Delouis B., van den Ende M., Ampuero J.-P.* Kinematic rupture model of the February 6th 2023  $M_w$  7.8 Turkey earthquake from a large set of near-source strong motion records combined by GNSS offsets reveals intermittent supershear rupture. Pre-print. 2023. <https://doi.org/10.22541/essoar.168286647.71550161/v1>
- Dziewonski A.M., Anderson D.L.* Preliminary Reference Earth Model // *Phys. Earth Planet. Inter.* 1981. V. 25. № 4. P. 297–356. [https://doi.org/10.1016/0031-9201\(81\)90046-7](https://doi.org/10.1016/0031-9201(81)90046-7)
- Dziewonski A.M., Woodhouse J.H.* An experiment in systematic study of global seismicity: Centroid-moment-tensor solutions for 201 moderate and large earthquakes of 1981 // *J. Geophys. Res.* 1983. V. 88. P. 3247–3271. <https://doi.org/10.1029/JB088iB04p03247>
- EMSC/CSEM. European-Mediterranean Seismological Centre. Available from <https://www.emsc-csem.org/Earthquake/>. Last accessed 17 May 2023.
- Erdik M., Tümsa M.B.D., Pınar A., Altunel E., Zülfikar A.C.* A preliminary report on the February 6, 2023 earthquakes in Türkiye. 2023. Available from <http://doi.org/>. Last accessed 12 May 2023. <https://doi.org/10.32858/temblor.297>
- ETOPO 2022: 15 Arc-Second Global Relief Model. <https://doi.org/10.25921/fd45-gt74>. Available from <https://www.ncei.noaa.gov/products/etopo-global-relief-model> Last accessed 15 May 2023.
- Filippova A.I., Bukchin B.G., Fomochkina A.S., Melnikova V.I., Radziminovich Ya.B., Gileva N.A.* Source process of the September 21, 2020  $M_w$  5.6 Bystraya earthquake at the south-eastern segment of the Main Sayan fault (Eastern Siberia, Russia) // *Tectonophysics*. 2022. V. 822. 229162. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2021.229162>
- Global CMT Web Page, 2023. *On-line Catalog*. Lamont-Doherty Earth Observatory (LDEO) of Columbia University, Columbia, SC, USA. Available from <http://www.globalcmt.org> Last accessed 15 May 2023.
- Gómez J.M., Bukchin B., Madariaga R., Rogozhin E.A., Bogachkin B.M.* Rupture process of the 19 August 1992 Susamyr, Kyrgyzstan, earthquake // *J. Seismol.* 1997. V. 1. P. 219–235. <https://doi.org/10.1023/A:1009780226399>
- Güvercin S.E., Karabulut H., Konca A.Ö., Doğan U., Ergintav S.* Active seismotectonics of the East Anatolian Fault // *Geophys. J. Int.* 2022. V. 230. P. 50–69. <https://doi.org/10.1093/gji/ggac045>
- Hanks T., Kanamori H.* A moment magnitude scale // *J. Geophys. Res.* 1979. V. 84. B5. P. 2348–2350.
- Hayes G.P., Rivera L., Kanamori H.* Source inversion of the W-phase: real-time implementation and extension to low magnitudes // *Seism. Res. Lett.* 2009. V. 80. № 5. P. 817–822. <https://doi.org/10.1785/gssrl.80.5.817>
- Heidbach O., Rajabi M., Cui X., Fuchs K., Müller B., Reinecker J., Reiter K., Tingay M., Wenzel F., Xie F., Ziegler M.O., Zoback M.-L., Zoback M.* The World Stress Map database release 2016: Crustal stress pattern across scales // *Tectonophysics*. 2018. V. 744. P. 484–498. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2018.07.007>
- International Seismological Centre, 2023. *On-line Bulletin*. Internatl. Seis. Cent., Thatcham, United Kingdom. Available from <http://www.isc.ac.uk>. Last accessed 15 May 2023.
- Ji C., Wald D.J., Helmberger D.V.* Source description of the 1999 Hector Mine, California, earthquake, part I: Wavelet domain inversion theory and resolution analysis // *Bull. Seismol. Soc. Am.* 2002. V. 92. P. 1192–1207. <https://doi.org/10.1785/0120000916>

- Jiang X.Y., Song X.D., Li T., Wu K.X. Moment magnitudes of two large Turkish earthquakes on February 6, 2023 from long-period coda // *Earthq. Sci.* 2023. V. 36. № 2. P. 169–174. <https://doi.org/10.1016/j.eqs.2023.02.008>
- Kagan Y.Y. Simplified algorithms for calculating double-couple rotation // *Geophys. J. Int.* 2007. V. 171. № 1. P. 411–418. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2007.03538.x>
- Kanamori H., Rivera L. Source inversion of W-phase: speeding up seismic tsunami warning // *Geophys. J. Int.* 2008. V. 175. № 1. P. 222–238. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2008.03887.x>
- Karabacak V., Özkaymak Ç., Sözbilir H., Tatar O., Aktuğ B., Özdağ Ö.C., Çakır R., Aksoy E., Koçbulut F., Softa M., Akgün A., Demir A., Arslan G. The 2023 Pazarcik (Kahramanmaraş, Türkiye) earthquake ( $M_w$  7.7): implications for surface rupture dynamics along the East Anatolian Fault Zone // *J. Geolog. Soc.* 2023. V. 180. jgs2023-020. <https://doi.org/10.1144/jgs2023-020>
- Karabulut H., Güvercin S.E., Hollingsworth J., Konca A.Ö. Long silence on the East Anatolian Fault Zone (Southern Turkey) ends with devastating double earthquakes (6 February 2023) over a seismic gap: implications for the seismic potential in the Eastern Mediterranean region // *J. Geolog. Soc.* 2023. V. 180. jgs2023-021. <https://doi.org/10.1144/jgs2023-021>
- Kusky T.M., Bozkurt E., Meng J., Wang L. Twin Earthquakes Devastate southeast Türkiye and Syria: first report from the epicenters // *J. Earth Sci.* 2023. V. 34. № 2. P. 291–296. <https://doi.org/10.1007/s12583-023-1317-5>
- Lasserre C., Bukchin B., Bernard P., Tapponier P., Gaudemer Y., Mostinsky A., Dailu R. Source parameters and tectonic origin of the 1996 June 1 Tianzhu ( $M_w = 5.2$ ) and 1995 July 21 Yongen ( $M_w = 5.6$ ) earthquakes near the Haiyuan fault (Gansu, China) // *Geophys. J. Int.* 2001. V. 144. № 1. P. 206–220. <https://doi.org/10.1046/j.1365-246x.2001.00313.x>
- Mai P.M., Aspiotis T., Aquib T.A., Cano E.V., Castro-Cruz D., Espindola-Carmona A., Li B., Li X., Liu J., Matrau R. et al. The destructive earthquake doublet of 6 February 2023 in south-central Türkiye and northwestern Syria: initial observations and analyses // *The Seismic Record.* V. 3. № 2. P. 105–115. <https://doi.org/10.1785/0320230007>
- McKenzie D.P. Active tectonics of the Mediterranean region // *Geophys. J. R. Astron. Soc.* 1972. V. 30. P. 109–185. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1972.tb02351.x>
- Melgar D., Taymaz T., Ganas A., Crowell B.W., Öcalan T., Kahraman M., Tsironi V., Yolsal-Çevikbilen S., Valkaniotis S., Irmak T.S. et al. Sub- and super-shear ruptures during the 2023  $M_w$  7.8 and  $M_w$  7.6 earthquake doublet in SE Türkiye // *Seismica.* 2023. V. 2. № 3. <https://doi.org/10.26443/seismica.v2i3.387>
- Nataf H.-C., Ricard Y. 3SMAC: on a priori tomographic model of the upper mantle based on geophysical modeling // *Phys. Earth Planet. Inter.* 1996. V. 95. № 1–2. P. 101–122. [https://doi.org/10.1016/0031-9201\(95\)03105-7](https://doi.org/10.1016/0031-9201(95)03105-7)
- National Earthquake Information Center. 2023. *On-line Catalog.* US Geological Survey, USA Available from <https://earthquake.usgs.gov> Last accessed 15 May 2023.
- Okuwaki R., Yagi Y., Taymaz T., Hicks S.P. Multi-scale rupture growth with alternating directions in a complex fault network during the 2023 south-eastern Türkiye and Syria earthquake doublet. Pre-print, EarthArXiv. 2023. Last accessed 17 May 2023. <https://doi.org/10.31223/X5RD4W>
- Rosakis A.J., Abdelmeguid M., Elbanna A. Evidence of early supershear transition in the Feb 6th 2023 Mw 7.8 Kahramanmaraş Turkey earthquake from near-field records. Pre-print, EarthArXiv. 2023. Last accessed 17 May 2023. <https://doi.org/10.31223/X5W95G>
- Scripps Institution of Oceanography. 1986. Global Seismograph Network - IRIS/IDA [Data set]. International Federation of Digital Seismograph Networks. <https://doi.org/10.7914/SN/II>
- Şengör A.M.C., Yılmaz Y. Tethyan evolution of Turkey: a plate tectonic approach // *Tectonophysics.* 1981. V. 75. P. 181–241. [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(81\)90275-4](https://doi.org/10.1016/0040-1951(81)90275-4)
- Seredkina A., Melnikova V., Radziminovich Ya., Gileva N. Seismicity of the Erguna region (Northeastern China): evidence for local stress redistribution // *Bull. Seism. Soc. Am.* 2020. V. 110. P. 803–815. <https://doi.org/10.1785/0120190182>
- Sesetyan K., Stucchi M., Castelli V., Gomez Caper A.A. Kahramanmaraş – Gaziantep Türkiye M7.7 earthquake, 6 February 2023 (04:17 GMT + 03:00). Large historical earthquakes of the earthquake-affected region: a preliminary report. 16.02.2023 (V1). 2023. Available from [https://eqe.boun.edu.tr/sites/eqe.boun.edu.tr/files/kahramanmaraş-gaziantep\\_earthquake\\_06-02-2023\\_large\\_hist\\_eqs\\_v1.pdf](https://eqe.boun.edu.tr/sites/eqe.boun.edu.tr/files/kahramanmaraş-gaziantep_earthquake_06-02-2023_large_hist_eqs_v1.pdf) Last accessed 17 May 2023.
- Sipkin S. Estimation of earthquake source parameters by the inversion of waveform data: synthetic waveforms // *Phys. Earth Planet. Inter.* 1982. V. 30. № 2–3. P. 242–259. [https://doi.org/10.1016/0031-9201\(82\)90111-X](https://doi.org/10.1016/0031-9201(82)90111-X)
- Stein R.S., Toda S., Özbakir A.D., Sevilgen V., Gonzalez-Huizar H., Lotto G., Sevilgen S. Interactions, stress changes, mysteries, and partial forecasts of the 2023 Kahramanmaraş, Türkiye, earthquakes. *Temblor*, 2023. Last accessed 15 May 2023. <https://doi.org/10.32858/temblor.299>
- Yılmaz H., Over S., Özden S. Kinematics of the East Anatolian Fault Zone between Turkoglu (Kahramanmaraş) and Celikhan (Ardahan), eastern Turkey // *Earth Planet. Sp.* 2006. V. 58. P. 1463–1473. <https://doi.org/10.1186/BF03352645>
- Zahradnik J., Turhan F., Sokos E., Gallovič F. Asperity-like (segmented) structure of the 6 February 2023 Turkish earthquakes. Pre-print, EarthArXiv. 2023. Last accessed 17 May 2023. <https://doi.org/10.31223/X5T666>
- Zelenin E.A., Bachmanov D.M., Garipova S.T., Trifonov V.G., Kozhurin A.I. The Active Faults of Eurasia Database (AFEAD): the ontology and design behind the continental-scale dataset // *Earth System Science Data.* 2022. V. 14. № 10. P. 4489–4503. <https://doi.org/10.5194/essd-14-4489-2022>



## Source Parameters of Strong Turkish Earthquakes on February 6, 2023 ( $M_w = 7.8$ and $M_w = 7.7$ ) from Surface Wave Data

A. I. Filippova<sup>a, b, \*</sup> and A. S. Fomochkina<sup>b, c</sup>

<sup>a</sup> Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere, and Radio Wave Propagation, Russian Academy of Sciences, Moscow, Troitsk, 108840 Russia

<sup>b</sup> Institute of the Theory of Earthquake Prediction and Mathematical Geophysics, Russian Academy of Sciences, Moscow, 117997 Russia

<sup>c</sup> Gubkin Russian State University of Oil and Gas (National Research University), Moscow, 119991 Russia

\*e-mail: aleirk@mail.ru

**Abstract**—Based on the amplitude spectra of surface waves, the source parameters of the strong Turkish earthquakes of February 6, 2023 ( $M_w = 7.8$  and  $M_w = 7.7$ ) were calculated in two approximations: an instantaneous point source and an elliptical shear dislocation. As a result, rupture planes were identified, data were obtained on the scalar seismic moment, moment magnitude, focal mechanism, and source depth of the considered seismic events, and the integral parameters characterizing the rupture geometry and its development in time were estimated. It is shown that the sources of the earthquakes under study were formed under the influence of the regional stress field and their focal mechanisms were left lateral faults with a strike direction close to the strike of the East Anatolian fault zone for the first event and close to the strike of the Sürgü-Çardak fault system for the second. For the first earthquake, our estimates of the rupture duration and its length ( $t = 52.5$  s,  $L = 180$  km) probably refer not to the entire rupture, but only to its main phase, confined to the northeastern segments of the East Anatolian fault and characterized by maximum displacements and values of the released seismic moment. The values of  $t = 30$  s and  $L = 180$  km that we obtained for the second earthquake fully characterize the entire rupture.

*Keywords:* earthquake, source parameters, surface waves, East-Anatolian Fault, Turkey