

УДК 550.341

## Определение параметров очагов региональных землетрясений по записям поверхностных волн

© 2020 г. А.С. Фомочкина<sup>1,2</sup>, Б.Г. Букчин<sup>2</sup>

<sup>1</sup>РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина, г. Москва, Россия; <sup>2</sup>ИТПЗ РАН, г. Москва, Россия

**Аннотация.** Рассматривается возможность построения моделей очагов двух региональных землетрясений: в заливе Акаба, Египет (27 июня 2015 г.,  $M_w=5.5$ ) и в регионе Мёртвого моря (4 июля 2018 г.,  $M_w=4.8$ ) по записям поверхностных волн. Для этой цели были использованы записи фундаментальных мод волн Лява и Релея, зарегистрированные станциями сетей IRIS, GEOSCOPE и GEOFON. На первом этапе мы описываем источник в нулевом приближении тензора момента, рассматривая мгновенную точечную сдвиговую дислокацию (двойной диполь) на заданной глубине. По амплитудным спектрам поверхностных волн были получены четыре эквивалентных решения. Для однозначного выбора решения были использованы дополнительные данные, такие как знаки первых вступлений  $P$ -волны (для землетрясения в заливе Акаба), или для каждого из решений рассчитаны фазовые спектры (для землетрясения в регионе Мёртвого моря). По минимальным значениям построенных совместных невязок для каждого события было выбрано единственное решение. Затем, рассматривая очаг в предположении плоского источника, были получены следующие интегральные параметры: продолжительность процесса в очаге, длины большой и малой осей источника, скорость мгновенного центроида, угол между большой осью источника и осью простирания, угол между направлением движения мгновенного центроида и осью простирания. Качество полученных решений оценивается с помощью функции нормированной невязки. Данная функция характеризует отличие теоретических амплитудных спектров от наблюдаемых. В случае землетрясения в регионе Мёртвого моря разрешение данной функции для некоторых параметров оказалось настолько мало, что получить решение не удалось. Также для рассматриваемых землетрясений была проанализирована неоднозначность, связанная с существенным превышением длин поверхностных волн над глубиной мелкофокусного источника.

**Ключевые слова:** записи поверхностных волн, двойной диполь, мелкофокусный источник, вторые моменты.

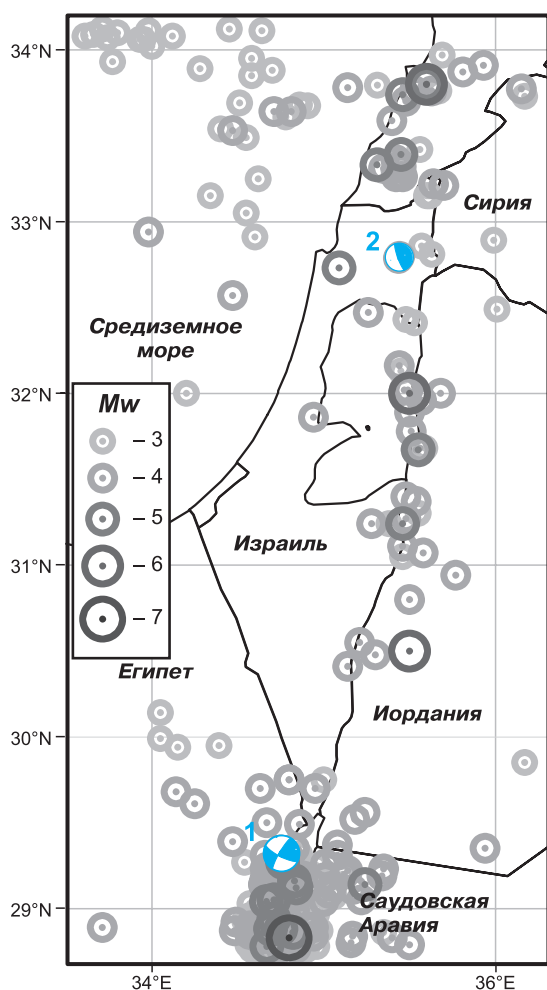
**Для цитирования:** Фомочкина А.С., Букчин Б.Г. Определение параметров очагов региональных землетрясений по записям поверхностных волн // Российский сейсмологический журнал. – 2020. – Т. 2, № 4. – С. 16–27. DOI: <https://doi.org/10.35540/2686-7907.2020.4.02>

### Введение

Исследование небольших региональных землетрясений имеет свои особенности. В данной работе рассматриваются два землетрясения: 27 июня 2015 г. в заливе Акаба, Египет ( $\varphi=29.040^\circ\text{N}$ ,  $\lambda=34.667^\circ\text{E}$ ) с  $M_w=5.6$  и 4 июля 2018 г. в регионе Мёртвого моря ( $\varphi=32.797^\circ\text{N}$ ,  $\lambda=35.444^\circ\text{E}$ ) с  $M_w=4.8$ . Оба эти землетрясения находятся на границе Аравийской и Африканской плит. Хотя и Африканская плита на западе, и Аравийская плита на востоке движутся в северо-восточном направлении, Аравийская плита движется немного быстрее, что приводит к левостороннему сдвигу вдоль данной границы [Гатинский и др., 2008]. Расположение рассма-

триваемых землетрясений и сейсмичность региона с 1965 г. по данным USGS [USGS, 2019] показаны на рис. 1. Размер и интенсивность цвета кругов на данном рисунке соответствуют магнитудам землетрясений от 3 до 7 баллов: чем больше и темнее круг, тем больше его магнитуда.

В предлагаемой статье для каждого из двух землетрясений определяются параметры источника в приближении тензора момента. Такой источник задаётся пятью параметрами: его глубиной, фокальным механизмом, определяемым углами простирания, падения и подвижки, и сейсмическим моментом. По амплитудным спектрам мы получаем четыре эквивалентных решения [Букчин, 1989]. Для однозначного выбора решения используются дополнительные



**Рис. 1.** Сейсмичность региона и эпицентры землетрясений: 1 – в заливе Акаба (27.06.2015 г.); 2 – в регионе Мёртвого моря (04.07.2020 г.)

данные. Также получены параметры очага в предположении плоского источника: интегральные оценки протяжённости и ориентации очага и его развитие во времени [Букчин, 2017]. Для землетрясения в заливе Акаба удалось получить все шесть искомым параметров, для землетрясения в регионе Мёртвого моря – только три.

Известно, что в общем случае тензор момента сейсмического источника не может быть однозначно определён по записям поверхностных волн, длины которых существенно превышают его глубину. Так как рассматриваемые землетрясения являются мелкофокусными (глубина очага землетрясения в заливе Акаба – 20 км, в регионе Мёртвого моря – 25 км), то в статье также приводится исследование данной неоднозначности.

### Описание данных и методов исследования

Анализируя длинноволновый спектр поверхностных волн (период много больше длительно-

сти действия очага), мы аппроксимируем источник мгновенным точечным двойным диполем. Такой источник задаётся пятью параметрами: глубиной, фокальным механизмом, определяемым тремя углами (простираения, падения и подвижки) или двумя ортогональными единичными векторами (главной осью растяжения  $T$  и главной осью сжатия  $P$ ), и сейсмическим моментом. Эти параметры мы определяем прямым перебором их значений в параметрическом пространстве и минимизацией отличия наблюдений от их теоретических значений (невязки). Значения параметров, минимизирующих невязку, мы рассматриваем как оценки этих параметров. Для оценки степени разрешения каждого из них мы строим частные функции невязки [Букчин и др., 1992]. Скорости поверхностных волн в реальной Земле не известны с достаточной точностью. Поэтому, как правило, мы используем для определения параметров источника лишь амплитудные спектры поверхностных волн. Для подсчёта теоретических значений используется модель со слабой горизонтальной неоднородностью среды [Бабич и др., 1976; Woodhouse, 1974].

Как известно, фокальный механизм не определяется однозначно амплитудными спектрами поверхностных волн. В общем случае существуют четыре различных механизма, возбуждающие амплитудные спектры с одной и той же диаграммой излучения. Эти четыре эквивалентных решения представляют собой две пары механизмов, симметричных относительно вертикальной оси, отличающихся внутри каждой пары противоположным направлением подвижки. Для получения единственного решения для фокального механизма необходимо использовать дополнительные наблюдения. С этой целью используются знаки первых вступлений  $P$ -волн [Lasserre et al., 2001] или для каждого из решений рассчитываются фазовые спектры. Строится совместная невязка, и уже минимальное значение совместной невязки позволяет выбрать искомое решение. Поверхностные волны Лява и Релея выделяются на записях с помощью программ спектрально-временного анализа и плавающей фильтрации [Ландер и др., 1973]. Лишь сигналы с достаточно высоким отношением сигнал/шум и нормальной поляризацией используются для определения параметров источника.

Для оценки параметров землетрясения, произошедшего в заливе Акаба, мы использовали амплитудные спектры основных мод Лява и Релея в спектральной полосе от 70 до 100 с. С помощью программ спектрально-временного анализа и плавающей фильтрации на семи

станциях мировых сетей IRIS [Scripps ..., 1986], GEOSCOPE [GEOSCOPE, 1982] и GEOFON [The GE Seismic Network, 1993] были отобраны как записи волн Лява (станции ARU, MAKZ и PALK), так и записи волн Релея (на всех используемых станциях). Карта расположения станций приведена на рис. 2а.

Для оценки фокального механизма и глубины источника землетрясения, произошедшего в регионе Мёртвого моря, мы также использовали спектры основной моды волн Лява на трёх станциях (ARU, BRVK и BFO) и волн Релея (на всех используемых станциях) в полосе периодов от 40 до 80 с. Карта расположения использованных станций сейсмических сетей приведена на рис. 2б.

Учитывая, что упругая сила в поверхностной волне, действующая на горизонтальную плоскость, равна нулю на свободной поверхности, в общем случае тензор момента сейсмического источника не может быть однозначно определён по записям поверхностных волн, длины которых существенно превышают его глубину. В этом случае элементы тензора момента  $M_{rt}$  и  $M_{rf}$  ( $r$  соответствует вертикальной оси,  $t$  – направлению на юг и  $f$  – направлению на восток) не влияют ни на диаграмму излучения поверхностных волн, ни на начальную фазу источника, и их значения не могут быть получены из наблюдаемых спектров. При этом решения из каталогов Global CMT и ряда других ведущих агентств получены из анализа как объёмных, так и поверхностных волн. Могут ли они в таком случае рассматриваться

как достоверные? Дело в том, что элементы  $M_{rt}$  и  $M_{rf}$  не влияют на излучение поверхностных волн лишь тогда, когда их модули не превосходят значительно модули остальных элементов тензора момента. Если же их значения являются доминирующими, то они вносят вклад в излучение. Так, источник с тензором момента, в котором лишь эти два элемента отличны от нуля, излучает поверхностные волны на любой ненулевой глубине. В работах [Bukchin et al., 2010; Букчин, 2006] было показано, что фокальный механизм мелкофокусного источника (в случае, когда глубина много меньше длин поверхностных волн) и его сейсмический момент могут быть однозначно определены, только если угол падения одной из нодальных плоскостей достаточно мал, т.е. плоскость является субгоризонтальной. Величина порогового значения этого угла определяется глубиной источника, спектральным диапазоном наблюдаемых волн и строением среды в окрестности очага землетрясения. Также в этих работах было найдено условие существования двойных диполей, излучающих такое же поле поверхностных волн, что и эталонный тензор, являющийся в общем случае девiatorом. Такие двойные диполи мы называем эквивалентными. Для рассматриваемых землетрясений в заливе Акаба и регионе Мёртвого моря были получены соответствующие семейства эквивалентных решений, где в качестве эталонного источника использовался тензор момента решения, представленного службой Global CMT [Global CMT, 2020].

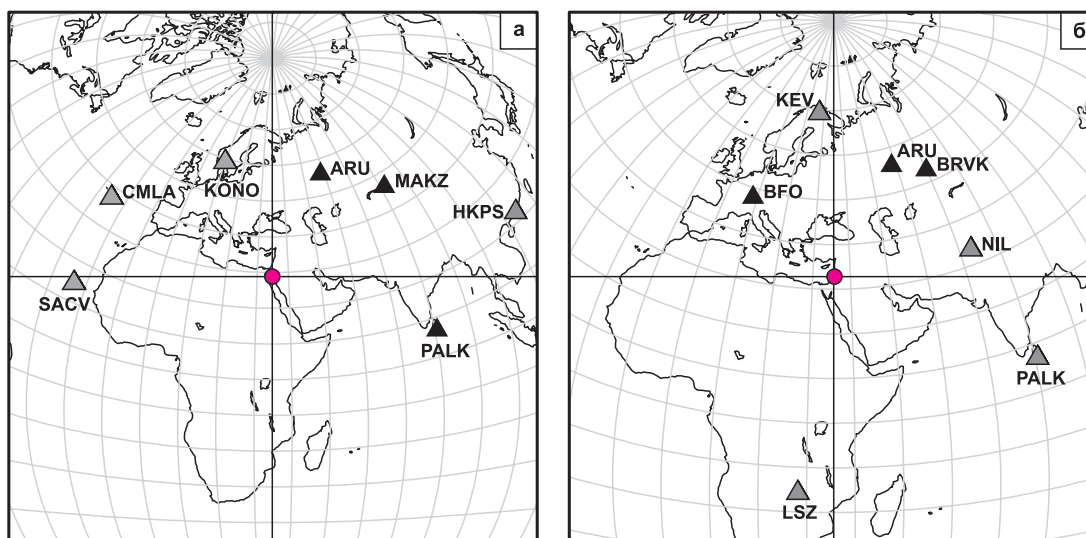


Рис. 2. Карта расположения станций, используемых для определения параметров очагов землетрясений: а – для землетрясения в заливе Акаба; б – для землетрясения в регионе Мёртвого моря.

Светлыми треугольниками показаны станции, где использовались только волны Релея, тёмными – волны Лява и Релея. Кружочками показаны эпицентры исследуемых землетрясений

Переходя к анализу спектров поверхностных волн на более коротких периодах (если это возможно), мы описываем источник вторыми моментами тензора избыточных напряжений.

В этом приближении (в предположении плоского источника) очаг описывается следующими интегральными параметрами: продолжительностью процесса в очаге, длиной большой оси источника, длиной малой оси источника, средней скоростью мгновенного центроида, углом между большой осью источника и осью простирания, углом между направлением движения мгновенного центроида и осью простирания. Если все характеристики среды, глубина эквивалентного мгновенного точечного источника и его тензор сейсмического момента известны (например, определены из анализа спектров поверхностных волн на более длинных периодах), а также одна из нодальных плоскостей идентифицирована как плоскость разлома, то для любой комбинации значений определяемых шести параметров могут быть рассчитаны амплитудные спектры поверхностных волн для всех точек регистрации.

Сравнение рассчитанных значений с наблюдаемыми даёт невязку амплитудных спектров. Значения параметров, при которых эта невязка достигает минимального значения, дают нам оценки этих параметров. Мы определяем их прямым перебором на сетке в шестимерном параметрическом пространстве. Для оценки степени разрешения этих параметров строим частные функции невязки [Bukchin, 1995; Das, Kostrov, 1997].

Для оценки продолжительности землетрясения, формы очаговой области и скорости распространения разрыва для землетрясения в регионе Мёртвого моря использовались спектры тех же записей, что и в приближении тензора момента. Для землетрясения в заливе Акаба записи использовались аналогичным образом, но в полосе периодов от 50 до 70 с.

Соотношение между интегральными оценками времени действия источника и размеров очаговой области и их реальными значениями мы оцениваем для Гауссовского распределения плотности момента. В качестве реального пространственного размера и реального времени действия источника примем значения, соответствующие 99% доверительному уровню. Тогда окажется, что реальное время действия источника превышает его интегральную оценку в 2.5 раза, а реальные размеры главных осей очага в случае плоского двумерного источника превышают их интегральные оценки в 3 раза.

### Обсуждение результатов

По амплитудным спектрам трёх записей основных мод Лява (на станциях ARU, MAKZ и PALK) и семи записей основных мод Релея (на станциях ARU, MAKZ, НКPS, PALK, SACV, CMLA и KONO) для землетрясения в заливе Акаба были получены четыре эквивалентных решения в приближении тензора момента. Оптимальным было выбрано решение, которое наилучшим образом согласуется с зарегистрированными знаками первых вступлений *P*-волн [EMSC, 2019]. Функция невязки для глубины (оценка глубины равна 20 км) и фокальный механизм (сдвиг с незначительным взбросом) для события 27.06.2015 г. приведены на рис. 3а и 3б. Полученная величина сейсмического момента  $0.21 \cdot 10^{18} \text{ Н} \cdot \text{м}$  соответствует магнитуде  $M_w=5.6$ , значение функции невязки равно 0.257.

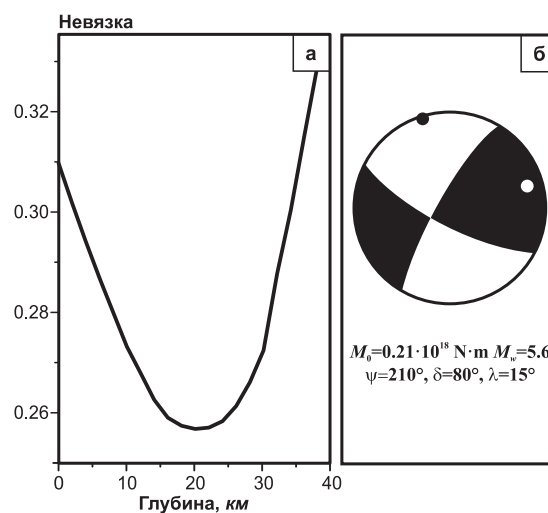


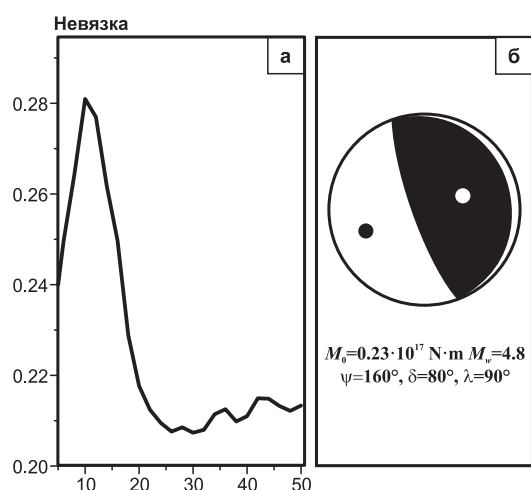
Рис. 3. Функция невязки и фокальный механизм в проекции нижней полусферы для землетрясения в заливе Акаба 27.06.2015 г.

Для землетрясения в регионе Мёртвого моря также были использованы амплитудные спектры трёх записей основных мод Лява (на станциях ARU, BRVK и BFO) и семи записей основных мод Релея (на станциях ARU, BRVK, NIL, PALK, LSZ, BFO и KEV). В табл. 1 представлены фокальные механизмы и фазовые невязки для полученных четырёх эквивалентных решений. Как видно из таблицы, оптимальным является решение № 1.

Функция невязки для глубины (оценка глубины равна 25 км) и фокальный механизм (взброс) для события 04.07.2018 г. приведены на рис. 4а и 4б. Полученная величина сейсмического момента  $0.23 \cdot 10^{17} \text{ Н} \cdot \text{м}$  соответствует магнитуде  $M_w=4.8$ , значение функции невязки равно 0.207.

**Таблица 1.** Фокальные механизмы и фазовые невязки для четырёх эквивалентных решений, полученных из анализа амплитудных спектров поверхностных волн для землетрясения в регионе Мёртвого моря

№ решения	Угол падения, °	Угол простирания, °	Угол подвижки, °	Нормированная фазовая невязка
1	160	80	90	0.473
2	340	80	90	0.535
3	340	80	-90	0.569
4	160	80	-90	0.682



**Рис. 4.** Функция невязки и фокальный механизм в проекции нижней полусферы для землетрясения в регионе Мёртвого моря 04.07.2018 г.

Для сравнения полученных решений рассмотрим решения, предоставляемые такими службами, как Global CMT [Global CMT, 2020] и USGS [USGS, 2019]. В табл. 2 приведён тензор сейсмического момента для землетрясения в заливе Акаба, полученный Global CMT.

**Таблица 2.** Тензор сейсмического момента для землетрясения в заливе Акаба

$M_{rr}$	$M_{tt}$	$M_{pp}$	$M_{rt}$	$M_{rp}$	$M_{tp}$
-0.102	-1.690	1.80	0.300	-0.246	-2.040

На рис. 5 приведено семейство эквивалентных решений (все решения, расположенные на пунктирной линии) для данного тензора момента. Линии уровня на данном рисунке представляют собой различие в норме L2 амплитудных спектров излучаемых таким тензором момента и соответствующим двойным диполем (угол простирания равен 110° на левой половине и 200° — на правой, по оси абсцисс отложен угол падения, по оси ординат — угол подвижки). Красное решение — это "optimal deviatoric" (ODV), заданное исследуемым тензором Global CMT, зелёное

— двойной диполь, который получен Global CMT (оценка глубины и ODV, и у двойного диполя — 28.3 км), синее — двойной диполь, который получен USGS (оценка глубины — 26.3 км) и чёрное — наше решение. Как мы видим, все рассмотренные решения незначительно удалены от эквивалентных ODV Global CMT.

В табл. 3 приведён тензор сейсмического момента для землетрясения в регионе Мёртвого моря, полученный Global CMT.

**Таблица 3.** Тензор сейсмического момента для землетрясения в регионе Мёртвого моря

$M_{rr}$	$M_{tt}$	$M_{pp}$	$M_{rt}$	$M_{rp}$	$M_{tp}$
-1.520	0.224	1.290	1.160	-0.446	-0.408

На рис. 6 приведено семейство эквивалентных решений (все решения, расположенные на пунктирной линии) для данного тензора моментов. Линии уровня на данном рисунке также представляют собой различие амплитудных спектров, излучаемых таким тензором момента и соответствующим двойным диполем (угол простирания равен 160°, по оси абсцисс отложен угол падения, по оси ординат — угол подвижки) в норме L2. Красное решение — это "optimal deviatoric" (ODV), заданное исследуемым тензором Global CMT, зелёное — двойной диполь, который получен Global CMT (оценка глубины и ODV, и у двойного диполя — 13.8 км), чёрные — решения, полученные нами, решение № 1 является лучшим решением по фазовым невязкам. Стоит заметить, что наши решения эквивалентны базовому ODV-решению Global CMT с точки зрения излучения поверхностных волн. В то же время "best double-couple" Global CMT не принадлежит данному семейству, что говорит о различиях в излучении поверхностных волн.

Оценка глубины у Global CMT равна 13.8 км, что гораздо меньше длины поверхностной волны, используемой для анализа. Как подробно описано в [Bukchin et al., 2010; Букчин, 2006] фокальный механизм и сейсмический момент в этом случае могут быть однозначно определены, только если угол падения одной из нодальных плоскостей достаточно мал, т.е. плоскость является субгоризонтальной. Именно такое решение получилось в нашем случае ( $P1=160^\circ/80^\circ/90^\circ$ ,  $P2=340^\circ/10^\circ/90^\circ$ ).

В предположении плоского источника нами также были оценены пространственно-временные параметры для каждой из нодальных плоскостей обоих исследуемых событий. Для оценки степени разрешения этих параметров были построены частные функции невязки.

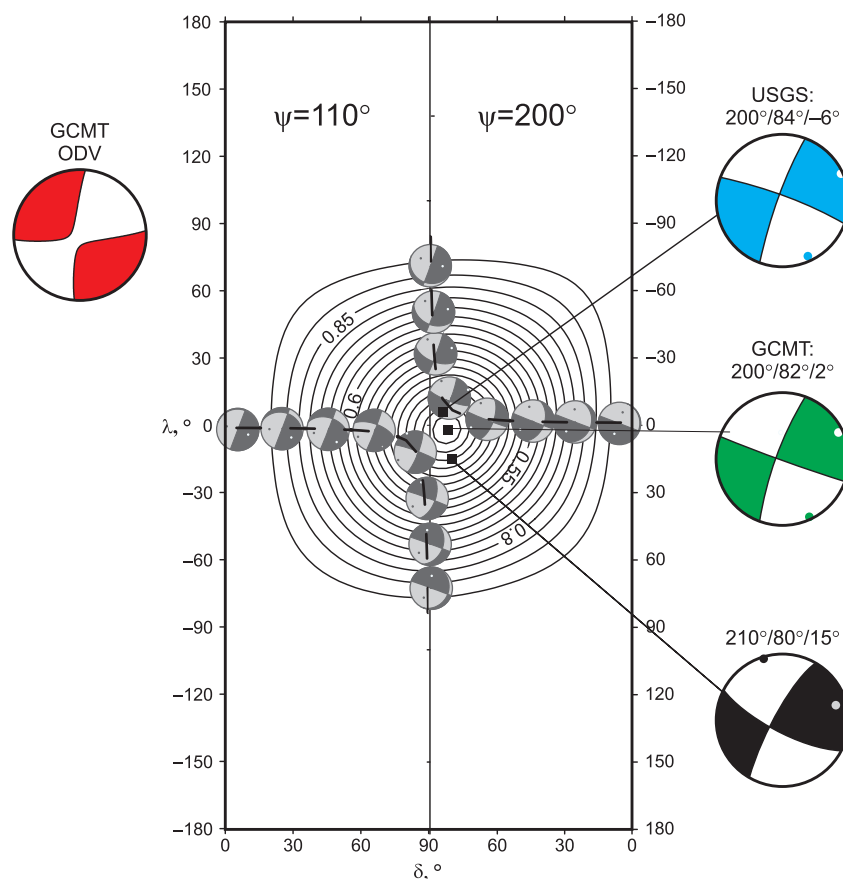


Рис. 5. Семейство эквивалентных решений для землетрясения в заливе Акаба 27.06.2015 г.

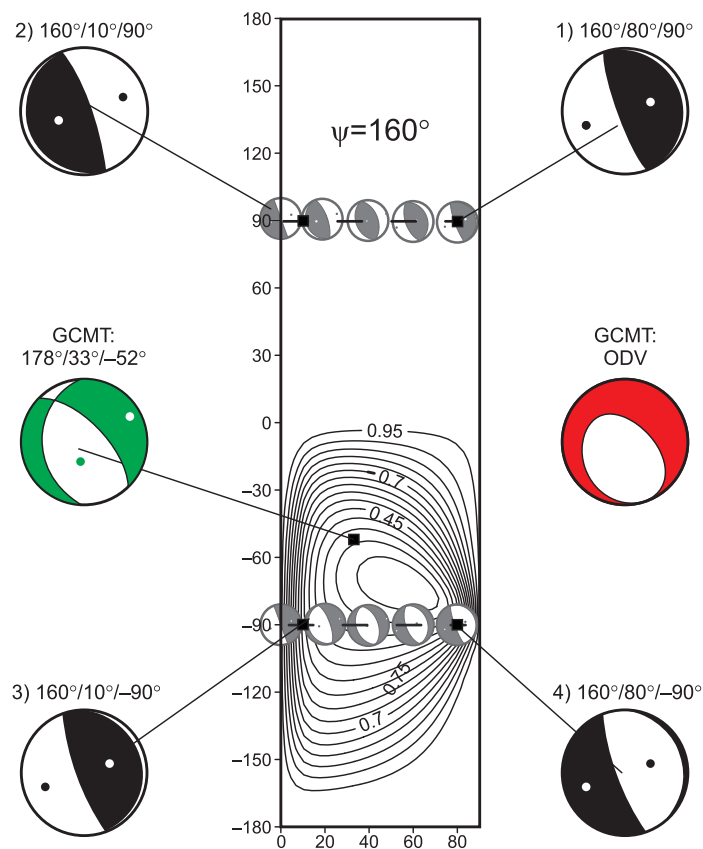


Рис. 6. Семейство эквивалентных решений для землетрясения в регионе Мёртвого моря 04.07.2018 г.

Величиной, характеризующей данное разрешение, мы назвали число  $\alpha = (\varepsilon_{\max} - \varepsilon_{\min}) / \varepsilon_{\max}$ , где  $\varepsilon_{\max}$  — это максимальное значение функции на рассматриваемом отрезке,  $\varepsilon_{\min}$  — минимальное.

На рис. 7 приведены функции разрешения для землетрясения в заливе Акаба в предположении, что плоскость разлома  $210^\circ/80^\circ/15^\circ$ . Оценки параметров уже в пересчёте для реального пространственного размера и реального времени получились следующие: продолжительность — 37.5 с, длина большой оси — 90 км, длина малой оси — 0 км (вытянутый источник), скорость распространения — 2 км/с, угол между большой осью и осью простирания —  $150^\circ$  (что на рисунке соответствует  $-30^\circ$ ), угол между скоростью и осью простирания —  $150^\circ$ .

На рис. 8 приведены функции разрешения для землетрясения в заливе Акаба в предположении, что плоскость разлома  $117^\circ/75^\circ/170^\circ$ . Оценки параметров уже в пересчёте для реального пространственного размера и реального времени получились следующие: продолжительность — 15 с, длина большой оси — 180 км, длина малой оси — 0 км (вытянутый источник), скорость распространения — 2.5 км/с, угол между большой осью и осью простирания —  $0^\circ$ , угол между скоростью и осью простирания —  $145^\circ$ .

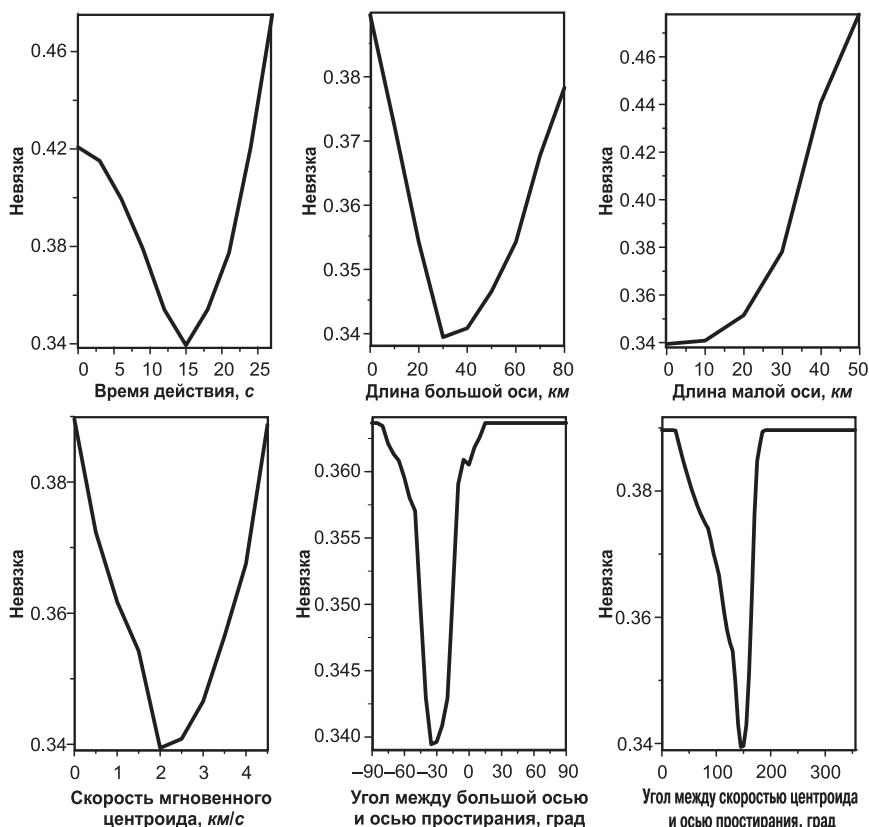
Величины, характеризующие степень разрешения функции невязок в процентах для каждо-

го из параметров, приведены в табл. 4. Обозначения введены следующие:  $\psi$  — угол простирания, соответствующий одной из двух нодальных плоскостей разлома,  $\Delta t$  — продолжительность,  $l_{\max}$  — длина большой оси,  $l_{\min}$  — длина малой оси,  $v$  — скорость распространения,  $\varphi_1$  — угол между большой осью и осью простирания,  $\varphi_v$  — угол между скоростью и осью простирания.

**Таблица 4.** Величины, характеризующие степень разрешения функции невязок для каждого из параметров землетрясения в заливе Акаба в приближении плоского источника

$\psi, ^\circ$	$\Delta t, \%$	$l_{\max}, \%$	$l_{\min}, \%$	$v, \%$	$\varphi_1, \%$	$\varphi_v, \%$
210	29.2	12.8	29.2	12.8	6.9	12.8
117	42.1	15.4	25.0	4.6	11.0	4.6

Как видно из табл. 4, все параметры можно считать надёжно определёнными. В то же время полученные результаты не являются естественными. Мы предполагаем, что такой перекося значений (длительность — 37.5 с и размеры источника — 180 км) может быть связан с большим азимутальным окном между станциями PALK и SACV. К сожалению, найти станции в этом окне с хорошим отношением сигнал/шум не удалось. В приближении двойного диполя данное окно не сыграло роли, т.к. в этом случае излучение является симметричным.



**Рис. 7.** Частные функции разрешения для землетрясения в заливе Акаба 27.06.2015 г. для плоскости с углом простирания  $210^\circ$

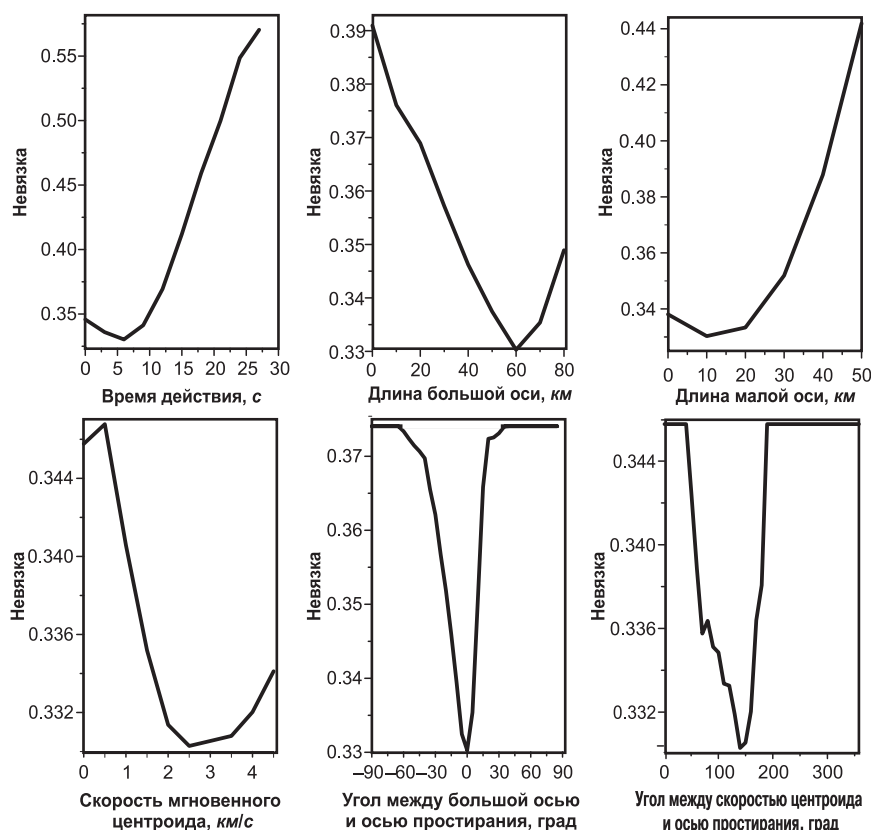


Рис. 8. Частные функции разрешения для землетрясения в заливе Акаба 27.06.2015 г. для плоскости с углом простирания 117°

На рис. 9 приведены функции разрешения для землетрясения в регионе Мёртвого моря в предположении, что плоскость разлома 160°/80°/90°. Оценки параметров уже в пересчёте для реального пространственного размера и реального времени получились следующие: продолжительность – 10 с, длина большой оси – 45 км, длина малой оси – 0 км (вытянутый источник). Оценку скорости распространения, угла между большой осью и осью простирания и угла между скоростью и осью простирания надёжно получить не удалось в связи с плохим разрешением данных частных функций, как это видно в табл. 5 (обозначения те же, что и в табл. 4).

Таблица 5. Величины, характеризующие степень разрешения функции невязок для каждого из параметров землетрясения в регионе Мёртвого моря в приближении плоского источника

$\psi, ^\circ$	$\Delta t, \%$	$I_{max}, \%$	$I_{min}, \%$	$v, \%$	$\phi_1, \%$	$\phi_v, \%$
160	41.7	16.0	30.8	2.8	0.7	2.6
340	33.3	15.4	30.0	0.7	0.9	0.2

На рис. 10 приведены функции разрешения для землетрясения в регионе Мёртвого

моря в предположении, что плоскость разлома 340°/10°/90°. Оценки параметров уже в пересчёте для реального пространственного размера и реального времени получились следующие: продолжительность – 5 с, длина большой оси – 60–75 км, длина малой оси – 0 км (вытянутый источник). Оценку скорости распространения, угла между большой осью и осью простирания и угла между скоростью и осью простирания так же, как и в предыдущем случае, надёжно получить не удалось (табл. 5).

### Заключение

При исследовании двух региональных землетрясений в заливе Акаба и в регионе Мёртвого моря были получены оценки параметров данных очагов в приближении двойного диполя. Было проведено сравнение полученных результатов с решениями Global CMT и USGS. В целом мы считаем результаты вполне согласованными, а полученные различия объясняем, прежде всего, тем, что наши решения эквивалентны базовому ODV-решению Global CMT с точки зрения излучения поверхностных волн. Заметим, что регулярно определяемый Global CMT "best double-



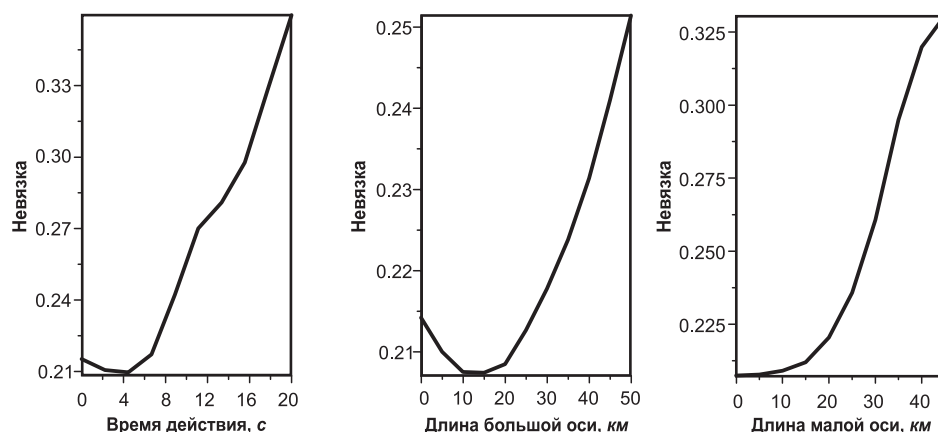


Рис. 9. Частные функции разрешения для землетрясения в регионе Мёртвого моря 04.07.2018 г. для плоскости с углом простирания  $160^\circ$

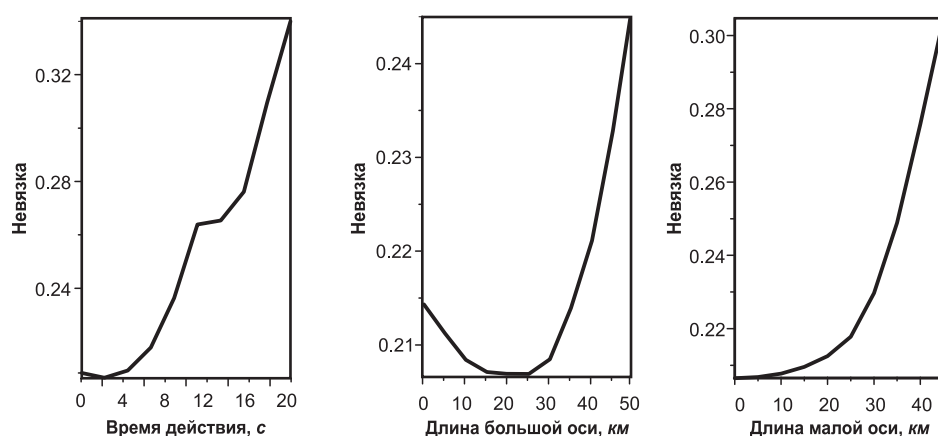


Рис. 10. Частные функции разрешения для землетрясения в регионе Мёртвого моря 04.07.2018 г. для плоскости с углом простирания  $340^\circ$

couple" по существу является не лучшим, а ближайшим к базовому ODV двойному диполю, и их излучения могут значительно отличаться, что особенно сильно проявляется в случае мелкофокусных землетрясений [Bukchin et al., 2010].

В случае, когда магнитуда землетрясения невелика, отфильтровать запись с хорошим отношением сигнал/шум не всегда удаётся. Вследствие этого используемые станции могут быть неравномерно распределены по азимуту относительно источника, что, в свою очередь, может привести к неправильным оценкам параметров источника в приближении вторых моментов тензора избыточных напряжений. Небольшая магнитуда также сказывается на функциях разрешения некоторых параметров, что не позволяет оценить их с достаточной точностью.

Работа выполнена в рамках государственного задания рег. № НИОКТР АААА-А19- 119011490129-0.

### Список литературы

- Бабич В.М., Чихачев Б.А., Яновская Т.Б. Поверхностные волны в вертикально-неоднородном упругом полупространстве со слабой горизонтальной неоднородностью // Известия АН СССР. Физика Земли. — 1976. — № 4. — С. 24–31.
- Букчин Б.Г. Об определении параметров очага землетрясения по записям поверхностных волн в случае неточного задания характеристик среды // Известия АН СССР. Серия Физика Земли. — 1989. — № 9. — С. 34–41.
- Букчин Б.Г. Описание очага землетрясения в приближении вторых моментов, и идентификация плоскости разлома // Физика Земли. — 2017. — № 2. — С. 76–83.
- Букчин Б.Г. Особенности излучения поверхностных волн мелкофокусным источником // Физика Земли. — 2006. — № 8. — С. 88–93.
- Букчин Б.Г., Левшин А.Л., Ратникова Л.И., Дост Б., Нолет Г. Оценка пространственно-временных

характеристик очага Спитакского землетрясения по широкополосным записям поверхностных волн // Проблемы прогноза землетрясений, и интерпретация сейсмических данных. Вычислительная сейсмология. – 1992. – Вып. 25. – С. 238–250.

Гатинский Ю.Г., Рундквист Д.В., Владова Г.Л., Прохорова Т.В. Блоковая структура и геодинамика континентальной литосферы на границах плит // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. – 2008. – № 1, вып. 11. – С. 32–47.

Ландер А.В., Левшин А.Л., Писаренко В.Ф., Погребинский Г.А. О спектрально-временном анализе колебаний // Вычислительные и статические методы интерпретации сейсмических данных. Вычислительная сейсмология. – 1973. – Вып. 6. – С. 236–249.

Bukchin, B. Determination of stress glut moments of total degree 2 from teleseismic surface waves amplitude spectra // Tectonophysics. – 1995. – V. 248. – P. 185–191.

Bukchin B., Clévéde E., Mostinskiy A. Uncertainty of moment tensor determination from surface wave analysis in case of shallow earthquake // Journal of Seismology. – 2010. – V. 14, N 3. – P. 601–614.

Das S., Kostrov B.V. Determination of the polynomial moments of the seismic moment rate density distributions with positivity constraints // Geophysical Journal International. – 1997. – V. 131. – P. 115–126.

EMSC [Site]. – 2019. – URL: <https://www.emsc-csem.org>  
 GEOSCOPE - French Global Network of broadband seismic stations // Institut de Physique du Globe de

Paris & Ecole et Observatoire des Sciences de la Terre de Strasbourg (EOST) [Site]. – 1982. – URL: <http://geoscope.ipgp.fr/networks/detail/G/>. doi:10.18715/GEOSCOPE.G

Global CMT Web Page [Site]. – 2020. – URL: <https://www.globalcmt.org>

Lasserre C., Bukchin B., Bernard P., Tapponnier P., Gaudemer Y., Mostinskiy A., Dailu R. Source parameters and tectonic origin of the June 1st, 1996 Tianzhu ( $M_w=5.2$ ) and July 21st, 1995 Yongden ( $M_w=5.6$ ) earthquakes, near Haiyuan fault (Gansu, China) // Geophysical Journal International. – 2001. – V. 144. – P. 206–220.

Scripps institution of oceanography. IRIS/IDA Seismic Network // International Federation of Digital Seismograph Networks [Site]. – 1986. – URL: <http://www.fdsn.org/networks/detail/II/>. doi:10.7914/SN/II

The GE Seismic Network. Waveform Access // GEOFON Data Centre [Site]. – Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ, 1993. – URL: <https://geofon.gfz-potsdam.de/waveform/archive/network.php?ncode=GE>. doi: 10.14470/TR560404.

USGS. Earthquakes Hazards Program // USGS [Site]. – 2019. – URL: <https://earthquake.usgs.gov>

Woodhouse J.H. Surface waves in the laterally varying structure // Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society. – 1974. – V. 90. – P. 713–728.

### Сведения об авторах

**Фомочкина Анастасия Сергеевна**, канд. техн. наук, доцент Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) имени И.М. Губкина» (РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина); ст. науч. сотр. Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института теории прогноза землетрясений и математической геофизики Российской академии наук (ИТПЗ РАН), г. Москва, Россия. E-mail: [nastja\\_f@bk.ru](mailto:nastja_f@bk.ru)

**Букчин Борис Григорьевич**, канд. физ.-мат. наук, вед. науч. сотр. ИТПЗ РАН, г. Москва, Россия. E-mail: [bukchin@mitp.ru](mailto:bukchin@mitp.ru)

## Determination of regional earthquake parameters from surface wave records

© 2020 A.S. Fomochkina<sup>1,2</sup>, B.G. Bukchin<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Gubkin University, Moscow, Russia; <sup>2</sup>IEPT RAS, Moscow, Russia

**Abstract** We consider in this paper the possibility of the source models construction for two regional earthquakes: in Akaba (June, 27, 2015, Mw=5.5) and in the Dead sea region (July, 4, 2018, Mw=4.8) by surface wave records analysis. Fundamental Love and Rayleigh modes recorded by seismic networks IRIS, GEOSCOPE and GEOFON were used for this purpose. At the first stage, at zero approximation we describe the source by moment tensor, considering the instantaneous point shear dislocation (double-couple) at a given depth. Four equivalent solutions were obtained from the amplitude spectra of surface waves. For an unambiguous choice of a solution, additional data were used, such as the signs of the first P-wave arrivals (for the Aqaba earthquake) or phase spectra (for an earthquake in the Dead Sea) were calculated for each of the four solutions. Based on the minimum values of the constructed joint residuals, a unique solution was chosen for each event. Then, considering the source flat, the following integral parameters were obtained: the duration of the process in the source, the lengths of the major and minor axes of the source, the average instant centroid velocity, the angle between the major axis of the source and the axis of strike, the angle between the direction of motion of the instant centroid and the axis of strike. The quality of the obtained solutions is estimated using the normalized residual function. This function characterizes the difference between the theoretical amplitude spectra and the observed ones. In the case of the earthquake in the Dead Sea, the resolution of this function for some parameters was so small that it was not possible to obtain a solution. Also, for the earthquakes under consideration, the ambiguity associated with a significant excess of the surface wavelengths over the depth of the shallow source was analyzed.

**Keywords** Surface wave records, double-couple, shallow source, second moments.

**For citation** Fomochkina, A.S., & Bukchin, B.G. (2020). [Determination of regional earthquake parameters from surface wave records]. *Rossiiskii seismologicheskii zhurnal* [Russian Journal of Seismology], 2(4), 16-27. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.35540/2686-7907.2020.4.02>

### References

- Babich, V.M., Chikachev, B.A., & Yanovskaya, T.B. (1976). [Surface waves in a vertically inhomogeneous elastic half-space with weak horizontal inhomogeneity]. *Izvestiia Akademii Nauk SSSR. Fizika Zemli* [Izvestiya. Physics of the Solid Earth], 4, 24-31. (In Russ.).
- Bukchin, B. (1995). Determination of stress glut moments of total degree 2 from teleseismic surface waves amplitude spectra. *Tectonophysics*, 248, 185-191.
- Bukchin, B., Clévéde, E., & Mostinskiy, A. (2010). Uncertainty of moment tensor determination from surface wave analysis in case of shallow earthquake. *Journal of Seismology*, 14(3), 601-614.
- Bukchin, B.G. (1989). [On determining the source parameters of an earthquake from surface waves in the medium with ill-defined parameters]. *Izvestiia Akademii Nauk SSSR. Fizika Zemli* [Izvestiya. Physics of the Solid Earth], 9, 34-41. (In Russ.).
- Bukchin, B.G. (2006). [Specific features of surface wave radiation by a shallow source]. *Fizika Zemli* [Izvestiya. Physics of the Solid Earth], 2, 88-93(In Russ.).
- Bukchin, B.G. (2017). [Focus earthquake description in the second moment's approximation, and fault plane identification]. *Fizika Zemli* [Izvestiya. Physics of the Solid Earth], 2, 76-83. (In Russ.).
- Bukchin, B.G., Levshin, A.L., Ratnikova, L.I., Dost, B., & Nolet, G. (1992). [Estimation of the spatio-temporal characteristics of the center of the Spitak earthquake from broadband records of surface waves]. *Problemy prognoza zemletryasenij i interpretaciya sejsmicheskikh dannyh. Vychislitel'naiia seismologiya* [Computational Seismology], 25, 238-250. (In Russ.).
- Das, S., & Kostrov, B.V. (1997). Determination of the polynomial moments of the seismic moment rate density distributions with positivity constraints. *Geophysical Journal International*, 131, 115-126.
- EMSC. (2019). Retrieved from <https://www.emsc-csem.org>
- Gatinsky, Yu.G., Rundquist, D.V., Vladova, G.L., Prokhorova, T.V., & Romanyuk, T.V. (2008). [Block structure and geodynamics of continental lithosphere in Plate boundaries]. *Vestnik KRAUNC. Nauki o Zemle* [Bulletin KRAUNZ. Earth Sciences], 11(1), 32-47. (In Russ.).

- GEOFON Data Centre. (1993). GEOFON Seismic Network. Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ. Other/Seismic Network. doi: 10.14470/TR560404.
- GEOSCOPE Network. (1982). French Global Network of broadband seismic stations. Institut de Physique du Globe de Paris & Ecole et Observatoire des Sciences de la Terre de Strasbourg (EOST). doi: 10.18715/GEOSCOPE.G
- Global CMT. (2020). Retrieved from <https://www.globalcmt.org>
- Lander, A.V., Levshin, A.L., Pisarenko, V.F., & Pogrebinskij, G.A. (1973). [On the spectral-temporal analysis of oscillations]. In *Vychislitel'nye i staticheskie metody interpretatsii seismicheskikh dannykh. Vychislitel'naia seismologiya* [Computational Seismology, v. 6], 6, 236-249. (In Russ.).
- Lasserre, C., Bukchin, B., Bernard, P., Tapponnier, P., Gaudemer, Y., Mostinsky, A., & Dailu, R. (2001). Source parameters and tectonic origin of the June 1st, 1996 Tianzhu ( $M_w=5.2$ ) and July 21st, 1995 Yongden ( $M_w=5.6$ ) earthquakes, near Haiyuan fault (Gansu, China). *Geophysical Journal International*, 144, 206-220.
- Scripps Institution of Oceanography (1986). IRIS/IDA Seismic Network. International Federation of Digital Seismograph Networks. doi: 10.7914/SN/II
- USGS. (2019). Retrieved from <https://earthquake.usgs.gov>
- Woodhouse, J.H. (1974). Surface waves in the laterally varying structure. *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society*, 90, 713-728.

### Information about authors

**Fomochkina Anastasiya Sergeyevna**, PhD, Assistant Professor of the National University of Oil and Gas “Gubkin University” (Gubkin University), Moscow, Russia; Senior Researcher of the Institute of Earthquake Prediction Theory and Mathematical Geophysics, Russian Academy of Sciences (IEPT RAS), Moscow, Russia. E-mail: [nastja\\_f@bk.ru](mailto:nastja_f@bk.ru)

**Bukchin Boris Grigor'yevich**, PhD, Leading Researcher of the IEPT RAS, Moscow, Russia. E-mail: [bukchin@mitp.ru](mailto:bukchin@mitp.ru)