

УДК 550.341

## Сравнительный анализ Аляскинских землетрясений 2018 г. 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.** Описывая источник в приближении тензора момента, рассматривается мгновенная точечная сдвиговая дислокация (двойной диполь) на заданной глубине. Такой источник задаётся пятью параметрами: его глубиной, фокальным механизмом, определяемым углами простирания, падения и подвижки, и сейсмическим моментом. Четыре первых параметра определены прямым перебором их возможных значений на сетке в параметрическом пространстве, а пятый параметр – минимизируя отличия наблюдаемых длиннопериодных амплитудных спектров поверхностных волн от их теоретических значений. Как известно, фокальный механизм не может быть однозначно определён из амплитудных спектров поверхностных волн, и для выбора оптимального решения в качестве дополнительной информации использованы знаки первых вступлений. Переходя к рассмотрению более коротких периодов, описан очаг в приближении вторых моментов тензора избыточных напряжений, и получаем интегральные оценки протяжённости, ориентации очага и его развития во времени. С помощью данной методики были изучены два Аляскинских землетрясения, произошедшие в 2018 г.: одно – с магнитудой  $M_w=7.9$  в январе и второе – с  $M_w=7.1$  в ноябре. На основании полученных оценок фокальных механизмов и вторых моментов для обоих событий была определена возможность идентификации плоскости разлома, а также построена билатеральная модель очага.

**Ключевые слова:** записи поверхностных волн, двойной диполь, плоскость разлома, вторые моменты.

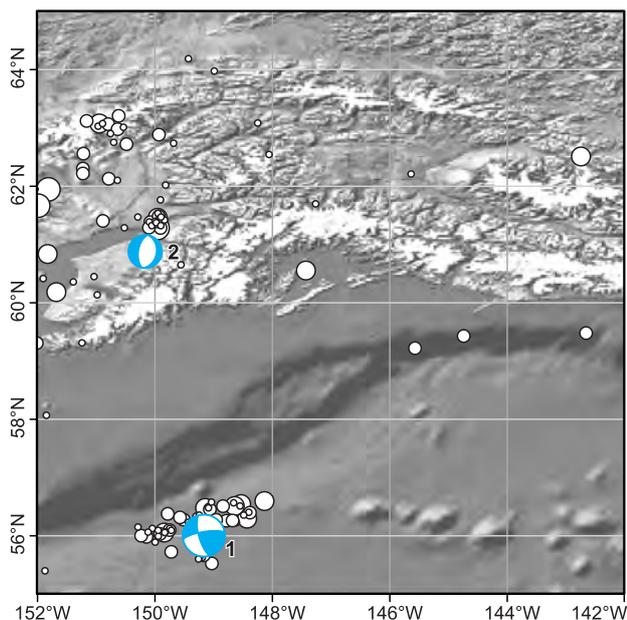
**Для цитирования:** Фомочкина А.С., Букчин Б.Г. Сравнительный анализ Аляскинских землетрясений 2018 г. по записям поверхностных волн // Российский сейсмологический журнал. – 2020. – Т. 2, № 1. – С. 76–84. DOI: <https://doi.org/10.35540/2686-7907.2020.1.07>

### Введение

В 2018 г. на Аляске произошли два крупных землетрясения: первое – 23 января с магнитудой  $M_w=7.9$  [Фомочкина, Букчин, 2018], второе – 30 ноября с  $M_w=7.1$ . Оба они локализируются в непосредственной близости к Алеутской дуге, которая простирается примерно на 3000 км от Аляскинского залива на восток и до Камчатского полуострова на запад. Это область, где Тихоокеанская плита погружается в мантию под плиту Северной Америки и представляет собой субдукцию, формирующую Алеутские острова и глубоководный Алеутский жёлоб. Эпицентры рассматриваемых землетрясений находятся в непосредственной близости от эпицентра мегаземлетрясения с  $M_w=9.2$ , произошедшего 27 марта 1964 года. Реактивация данного региона на уровне землетрясений с  $M_w>7$  заслуживает особого внимания. Поэтому в предлага-

емой статье для каждого из двух землетрясений определяются параметры источника в приближении тензора момента, а также получены интегральные оценки протяжённости, ориентации очага и его развития во времени в приближении вторых моментов тензора избыточных напряжений. Идентификация плоскости разлома является очень важной информацией для понимания механики сейсмического разрыва [Букчин, 2017], поэтому на основании полученных оценок фокальных механизмов и вторых моментов для обоих событий определяется возможность идентификации плоскости разлома, а также строится билатеральная модель очага.

На рис. 1 приведено расположение эпицентров рассматриваемых землетрясений, а также сейсмичность региона за предшествующие пять лет (землетрясения с  $M_w>4.5$ ). На данном рисунке также виден основной разлом, который проходит по океаническому жёлобу.



**Рис. 1.** Расположение эпицентров землетрясений 2018 г. на Аляске: 1 – 23 января с  $M_w=7.9$ ; 2 – 30 ноября с  $M_w=7.1$

### Приближение источника точечным двойным диполем

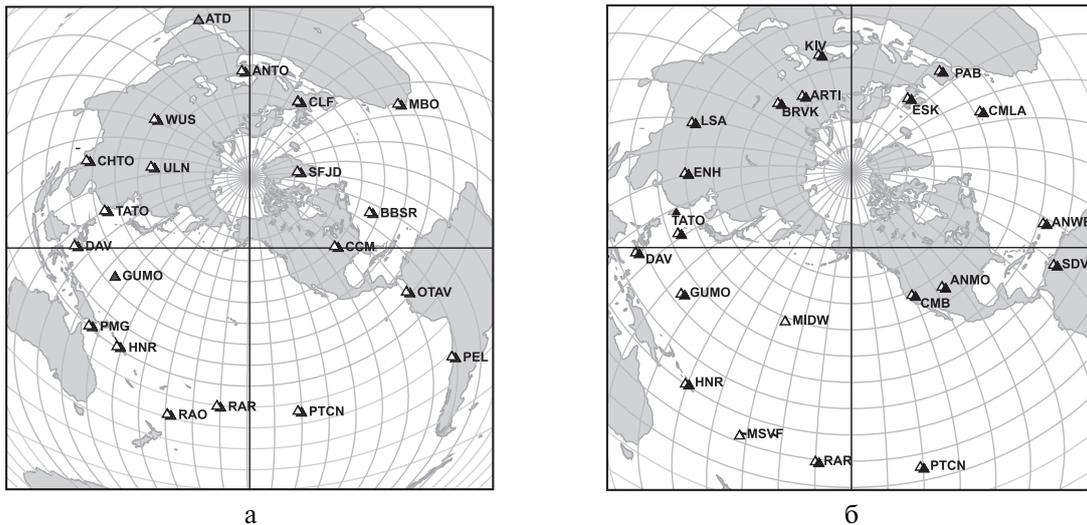
Анализируя длинноволновый спектр поверхностных волн (период много больше длительности действия очага), мы аппроксимируем источник мгновенным точечным двойным диполем. Такой источник задаётся пятью параметрами: глубиной, фокальным механизмом, определяемым тремя углами (простираения  $\psi$ , падения  $d$  и подвижки  $l$ ) или двумя ортогональными единичными векторами (главной осью растяжения  $T$  и главной осью сжатия  $P$ ), и сейсмическим моментом  $M_0$ . Эти параметры мы определяем прямым перебором их значений в параметрическом пространстве и минимизацией отклонения наблюдений от их теоретических значений (невязки). Значения параметров, минимизирующих невязку, мы рассматриваем как оценки этих параметров. Для оценки степени разрешения каждого из этих параметров 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 функция Грина, которая зависит от строения среды под источником и под приёмником, а также от средней медленности вдоль лучей. В качестве соответствующей

модели среды, описывающей кору и верхнюю мантию, используется модель со слабой горизонтальной неоднородностью [Бабуш и др., 1976; Woodhouse, 1974], которая рассчитывается с помощью программы 3SMAC [Nataf et al., 1996], а более глубокие слои описываются моделью PREM [Dziewonski et al., 1981].

Как известно, фокальный механизм не определяется однозначно амплитудными спектрами поверхностных волн [Mendiguren, 1972]. 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 фокального механизма необходимо использовать дополнительные наблюдения. С этой целью мы используем знаки первых вступлений  $P$ -волн [Lasserre et al., 2001]. Наблюдённые знаки первых вступлений подвергаются предварительной процедуре отбора и сглаживания. 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.

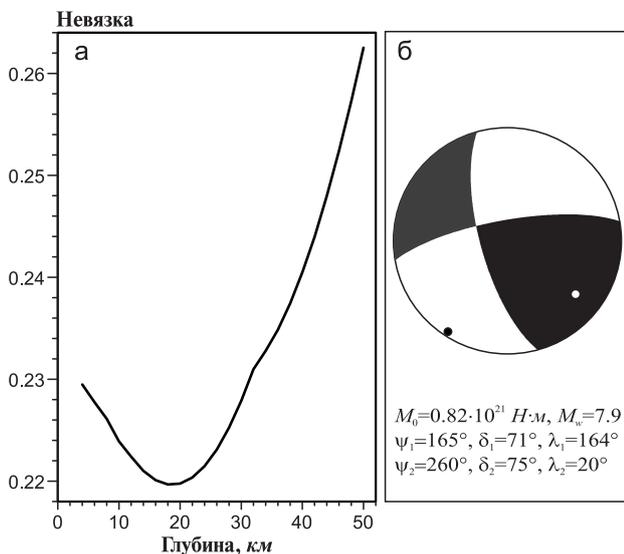
Для оценки параметров первого землетрясения, произошедшего 23 января 2018 г., мы использовали амплитудные спектры основных мод Лява и Релея в спектральной полосе от 150 до 250 с. С помощью программ спектрально-временного анализа и плавающей фильтрации на 21 станции мировых сетей IRIS и GEOSCOPE были отобраны как записи волн Лява, так и записи волн Релея. Лишь на двух станциях (GUMO и ATD) записи волн Релея не были отобраны. Карта расположения станций приведена на рис. 2а. Для оценки фокального механизма и глубины источника второго землетрясения, произошедшего 30 ноября 2018 г., использовались спектры 18 основных мод Лява и 19 мод Релея в полосе периодов от 70 до 250 с. Карта распределения использованных станций сейсмических сетей приведена на рис. 2б. Эпицентры находятся в центре представленных карт.

Оптимальным из четырёх эквивалентных решений, полученных из анализа амплитудных спектров поверхностных волн, считаем то, что наилучшим образом согласуется с зарегистрированными знаками первых вступлений.



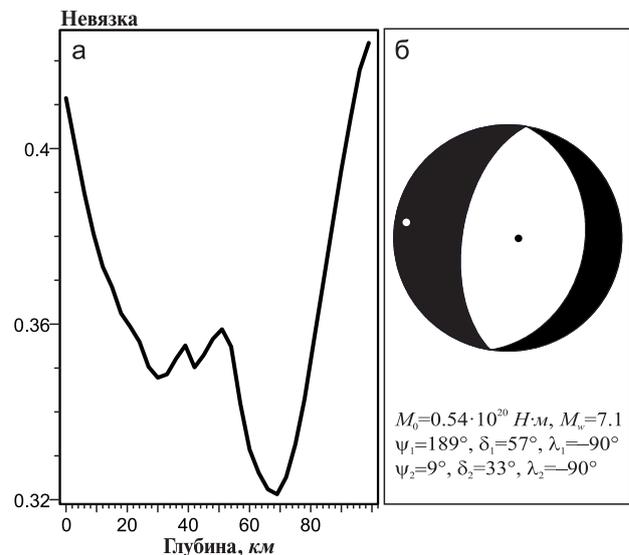
**Рис. 2.** Карта распределения станций, использованных для определения параметров землетрясений на Аляске в приближении двойного диполя: а – для события 23.01.2018 г.; б – для события 30.11.2018 г. Тёмные треугольники соответствуют волнам Лява, светлые треугольники – волнам Релея

Функция невязки для глубины (оценка глубины равна 20 км) и фокальный механизм (сдвиг с незначительным взбросом) для первого события приведены на рис. 3а и 3б. Полученная величина сейсмического момента  $0.82 \cdot 10^{21}$  Н·м соответствует магнитуде  $M_w=7.9$ , значение функции невязки равно 0.219.



**Рис. 3.** Функция невязки и фокальный механизм для землетрясения 23.01.2018 г. в проекции нижней полусферы

Функция невязки для глубины (оценка глубины равна 63 км) и фокальный механизм (сброс) для второго события приведены на рис. 4а и 4б. Полученная величина сейсмического момента  $0.54 \cdot 10^{20}$  Н·м соответствует магнитуде  $M_w=7.1$ , значение функции невязки равно 0.320.



**Рис. 4.** Функция невязки и фокальный механизм для землетрясения 30.11.2018 г. в проекции нижней полусферы

**Описание очага в приближении вторых моментов**

Переходя к анализу спектров поверхностных волн на более коротких периодах, 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 центраида, углом

между большой осью источника и осью простирания, углом между направлением движения мгновенного центра 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 глубины, продолжительности землетрясения, формы очаговой области и скорости распространения разрыва использовались спектры 20 основных мод Лява и 17 мод Релея (на всех рассматриваемых станциях, кроме ATD, FURI и GUMO) в полосе периодов от 70 до 100 с для первого события и 20 основных мод Лява и 20 мод Релея в полосе периодов от 40 до 60 с — для второго события. Карты расположения станций приведены на рис. 5. Эпицентры находятся в центре представленных карт.

На рис. 6 представлены частные функции невязки для события 23 января 2018 года. Сплошными линиями представлены функции, полученные в предположении, что нодальная плоскость с углом простирания  $260^\circ$  является плоскостью разлома. Пунктирными линиями на том же рисунке представлены результаты аналогичных расчётов, полученные в предположении, что плоскостью разлома является нодальная плоскость с углом простирания  $165^\circ$ . Как видно из рисунка, минимальная невязка во втором случае оказалась значительно меньше, что позволяет нам сделать выбор в пользу разлома с субмеридиональным простиранием.

На рис. 7 представлены частные функции невязки для второго рассматриваемого события. Сплошными линиями представлены функции, полученные в предположении, что нодальная плоскость с углом простирания  $189^\circ$  является плоскостью разлома. Пунктирными линиями на том же рисунке представлены результаты аналогичных расчётов, полученные в предположении, что плоскостью разлома является нодальная плоскость с углом простирания  $9^\circ$ . Как видно из рисунка, минимальные невязки в этих двух случаях незначительно отличаются друг от друга, что не позволяет нам сделать выбор в пользу одной из нодальных плоскостей и однозначно идентифицировать плоскость разлома.

Полученные результаты подтверждают выводы, сделанные в [Букчин, 2017], где показано, что идентификация плоскости разлома землетрясения при его описании в приближении вторых моментов невозможна в случае, когда большая ось очага, значительно превосходящая

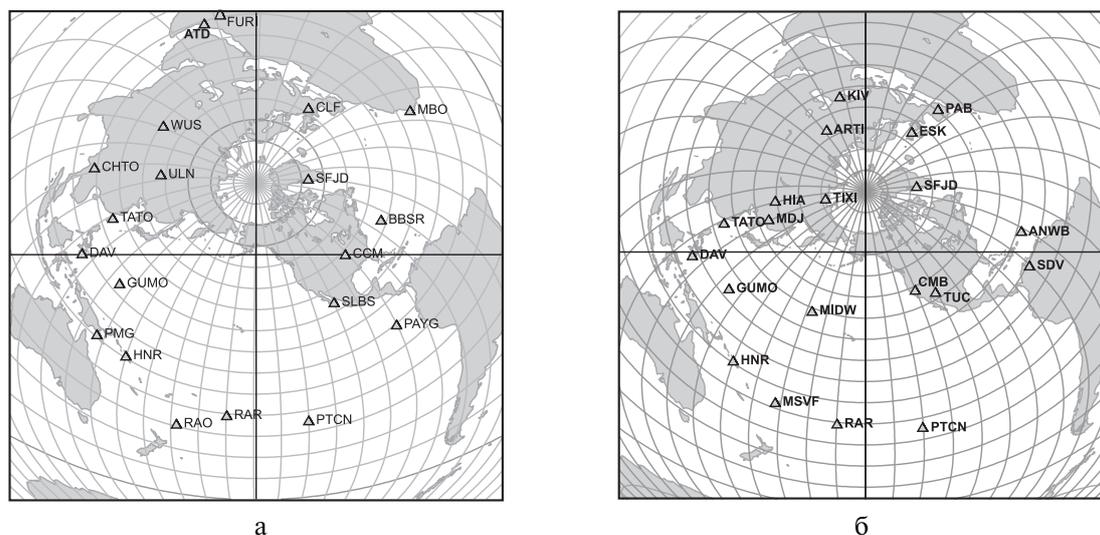


Рис. 5. Карты расположения станций, использованных для определения вторых моментов землетрясений на Аляске: а — для события 23.01.2018 г.; б — для события 30.11.2018 г.

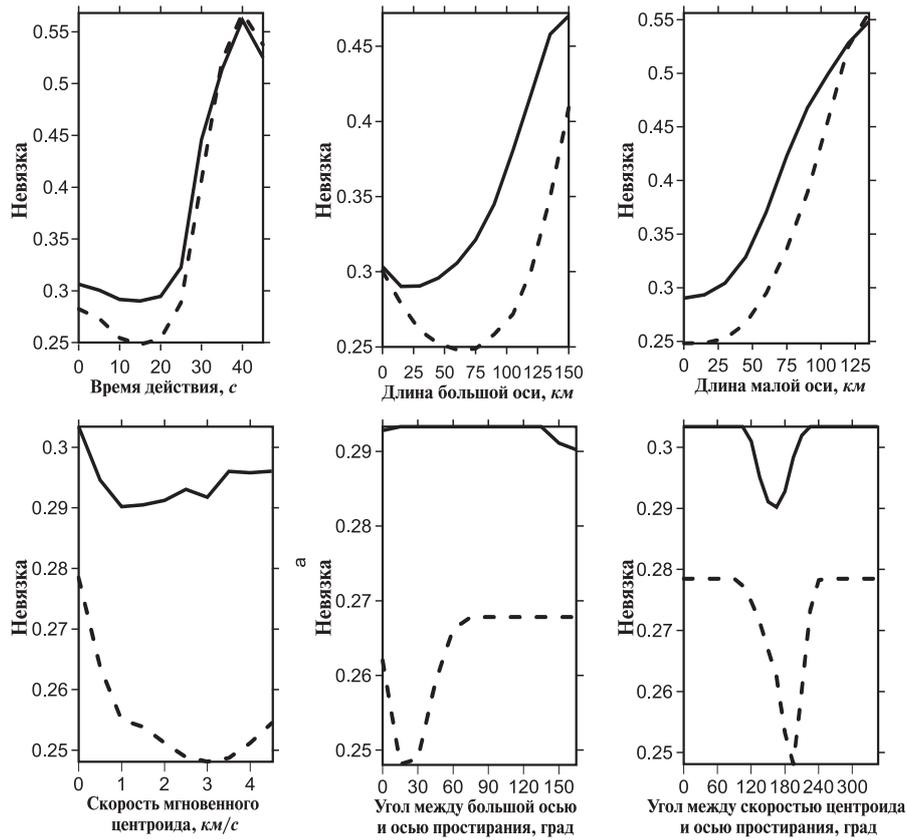


Рис. 6. Частные функции невязки, характеризующие разрешение интегральных характеристик для землетрясения 23.01.2018 г.

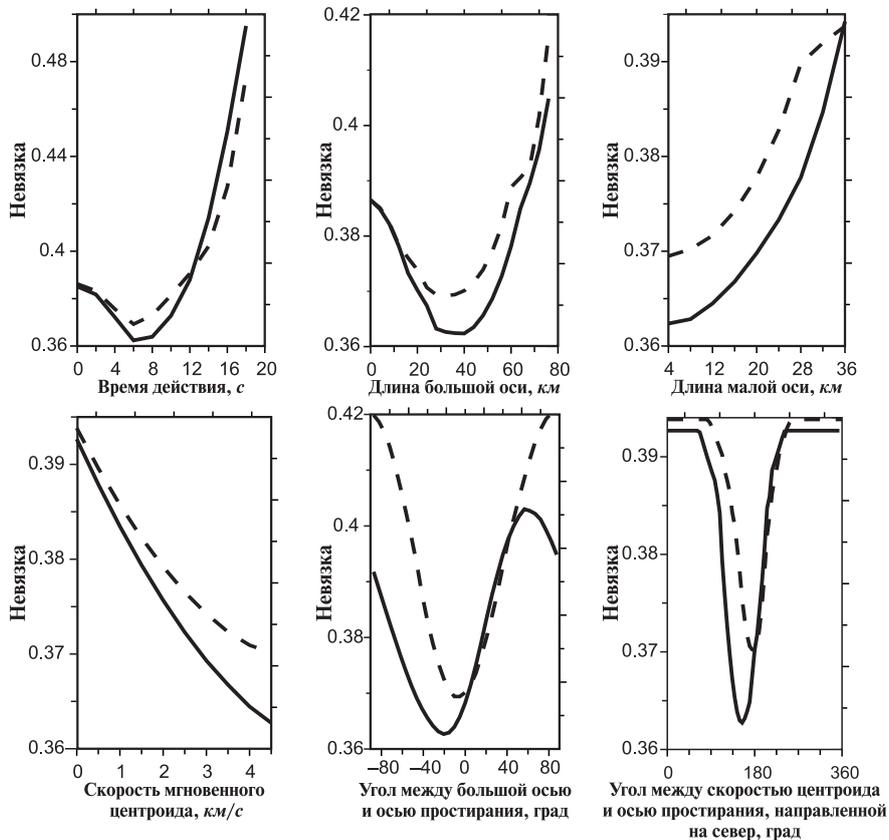


Рис. 7. Частные функции невязки, характеризующие разрешение интегральных характеристик для землетрясения 30.11.2018 г.

по длине малую ось, и распространение разрыва направлены вдоль линии пересечения нодальных плоскостей. Тем самым, мы ещё раз убедились, что плоскость разлома землетрясения может быть идентифицирована в случае сдвига по простирацию (землетрясение 23 января) и не может быть идентифицирована в случае сдвига по падению (землетрясение 30 ноября).

Соотношение между интегральными оценками времени действия источника и размеров очаговой области и их реальными значениями будем оценивать 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.

Умножая интегральную оценку длительности очагового процесса первого события 15 с на 2.5, получаем для времени действия источника 37.5 с. Умножая оценку длины большой оси очага 60 км на 3, получаем для максимальной протяжённости источника значение 180 км. Для второго события получаем следующие оценки: время действия источника – 15 с, максимальная протяжённость – 105 км.

На рис. 8 представлены схемы модели очага рассматриваемых землетрясений. Приведённые на схеме эллипсы характеризует форму очаговой области, её протяжённость и ориентацию. Оси представляют собой большую и малую оси соответствующей очаговой области.

Для построения оценки величины эффекта направленности излучения мы рассматриваем одномерную билатеральную модель разлома (ориентированную вдоль скорости центроида) с постоянной скоростью подвижки. Точка нуклеации делит источник на две части. Обозначим  $\beta$  длину меньшей части,  $\lambda$  – общую длину очага. Тогда источник определяется двумя параметрами: модулем постоянной скорости разрыва  $|v|$  и отношением  $\alpha = \beta/\lambda$ . Эти два параметра могут быть выражены через вторые моменты скорости избыточных напряжений. На рис. 9 представлены результаты оценки для рассматриваемых землетрясений. Звёздочкой отмечена точка нуклеации.

### Обсуждение результатов

Рассмотренные землетрясения, произошедшие на Аляске в 2018 г., принципиально отличаются друг от друга механизмами. Первое представляет собой сдвиг с незначительным взбросом, а второе – чистый сброс, при этом очаги обоих землетрясений вытянуты вдоль оси простираания.

В табл. 1 приведены результаты сравнения наших значений и значений глубин, полученных различными службами: USGS (United States Geological Survey, <https://www.usgs.gov/>), ESMC (The European-Mediterranean Seismological Centre, <https://www.emsc-csem.org/>), GCMT (The Global Centroid-Moment-Tensor, <https://www.globalcmt.org/>). Также в данной таблице приводятся значения глубин, полученные для исследуемых событий в [Lay et al., 2018; Liu et al., 2019].

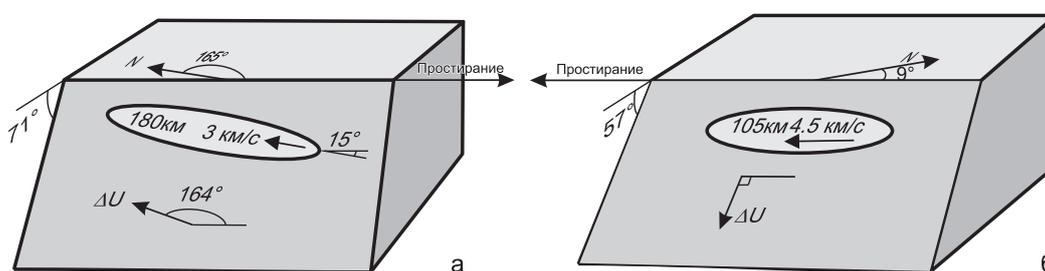


Рис. 8. Построенные модели очагов землетрясений 23.01.2018 г. (а) и 30.11.2018 г. (б)

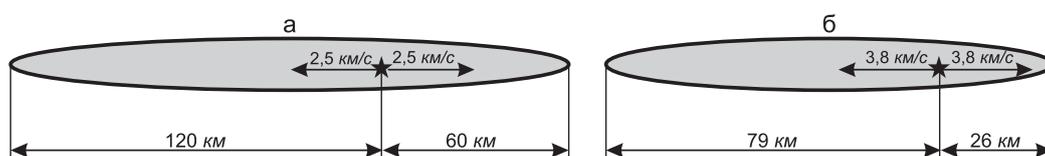


Рис. 9. Построенная билатеральная модель очагов землетрясений 23.01.2018 г. (а) и 30.11.2018 г. (б)

**Таблица 1.** Сравнение полученных значений глубины для событий

Дата землетрясения, дд.мм.гггг	Наша оценка, км	USGS, км	ESMC, км	GCMТ, км	Данные из [Lay et al., 2018; Liu et al., 2019], км
24.01.2018	18	14.7	33	33.6	23.5
30.11.2018	70	46.7	57	48.2	45–65

Как видно из табл. 1, глубины всех событий, полученные разными службами, оцениваются со значительным разбросом. Существенных отличий в фокальных механизмах от параметров, которые дают центры USGS, GCMТ и ESMC, нет.

В табл. 2 приведены значения продолжительности действия источника в сравнении с оценками GCMТ.

**Таблица 2.** Сравнение полученных значений продолжительности событий

Дата землетрясения, дд.мм.гггг	Наша оценка, с	GCMТ, с
24.01.2018	37.5	44.6
30.11.2018	15.0	16.4

Остальные параметры, которые получены нами в приближении вторых моментов, для рассматриваемых землетрясений не даются указанными службами.

Анализ фокальных механизмов исследуемых событий позволил для первого выбрать одну из нодальных плоскостей в качестве плоскости разлома, а для второго – утверждать, что плоскость разлома не идентифицируется рассматриваемым методом. Идентификация плоскости разлома является важной задачей для лучшего понимания механики сейсмического разрыва. Следует отметить, что для события января 2018 г. плоскость разлома, выбранная нами, не совпадает с плоскостью разлома, которая приведена на сайте USGS. Однако, как отмечается USGS, угол уклона на плоскости разлома довольно изменчив, что свидетельствует о его сложности. Расположение афтершоков также указывает на сложность структуры [USGS]. При использовании нашей методики выбор плоскости разлома был однозначен, что позволяет нам считать её предпочтительной.

### Выводы

Рассмотренные землетрясения, произошедшие на Аляске в 2018 г., принципиально отлича-

ются друг от друга механизмами. Первое представляет собой сдвиг с незначительным взбросом, а второе – чистый сброс, при этом очаги для обоих землетрясений вытянуты вдоль оси простирания. Именно отличие в механизмах позволило для первого события выбрать одну из нодальных плоскостей в качестве плоскости разлома, а для второго – нет. Также для каждого из событий была построена билатеральная модель.

### Литература

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. Описание очага землетрясения в приближении вторых моментов, и идентификация плоскости разлома // Физика Земли. – 2017. – № 2. – С. 76–83.

Букчин Б.Г., Левшин А.Л., Ратникова Л.И., Дост Б., Ноет Г. Оценка пространственно-временных характеристик очага Спитакского землетрясения по широкополосным записям поверхностных волн // Проблемы прогноза землетрясений и интерпретация сейсмических данных. Вычислительная сейсмология. – Вып. 25. – М.: Наука, 1992. – С. 238–250.

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. – Вып. 6. – М.: Наука, 1973. – С. 236–249.

Фомочкина А.С., Букчин Б.Г. Построение модели Аляскинского землетрясения 2018 г. по спектрам поверхностных волн // Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных. Материалы XIII Международной сейсмологической школы / Отв. ред. А.А. Маловичко. – Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2018. – С. 282–286.

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

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.

*Dziewonski A.M., Anderson D.L.* Preliminary reference Earth model // *Physics of the Earth and Planetary Interiors*. – 1981. – V. 25. – P. 297–356.

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

*Lay T., Ye L., Bai Y., Cheung K.F., Kanamori H.* The 2018 Mw 7.9 Gulf of Alaska earthquake: Multiple fault rupture in the Pacific plate // *Geophysical Research Letters*. – 2018. – V. 45. – P. 9542–9551. doi: 10.1029/2018GL079813

*Liu C., Lay T., Xie Z., Xiong X.* Intraslab deformation in the 30 November 2018 Anchorage, Alaska, Mw 7.1 earthquake // *Geophysical Research Letters*. – 2019. – V. 46. – P. 2449–2457. doi: 10.1029/2019GL082041

*Mendiguren J.* Inversion of surface wave data in source mechanism studies // *Journal of Geophysical Research*. – 1977. – V. 82. – P. 889–894.

*Nataf H.-C., Ricard Y.* 3SMAC: an a priori tomographic model of the upper mantle based on geophysical modeling // *Physics of the Earth and Planetary Interiors*. – 1996. – V. 95. – P. 101–122.

*USGS. Earthquakes* [Site]. – URL: <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/us2000cmu3/finite-fault>

*Woodhouse J.H.* Surface waves in the laterally varying structure // *Geophysical Journal of the Royal Astron. Soc.* – 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, зав. лаб. ИТПЗ РАН, г. Москва, Россия. E-mail: [bukchin@mitp.ru](mailto:bukchin@mitp.ru)

## The comparative analysis of 2018 Alaska earthquakes 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 the source of an earthquake in approximation of instant point shift dislocation. Such a source is given by its depth, the focal mechanism determined by three angles (strike, dip and slip) and the seismic moment characterizing the earthquake intensity. We determine the source depth and focal mechanism by a systematic exploration of 4D parametric space, and seismic moment - by solving the problem of minimization of the misfit between observed and calculated surface wave spectra for every combination of all other parameters. As is well known, the focal mechanism cannot be uniquely determined from the surface wave's amplitude spectra only. We used P-wave first arrival polarities to select the optimal solution. Analyzing the surface wave spectra at shorter periods, we describe the source in approximation of the stress glut second moments. Using these moments we determine integral estimates of the geometry, the duration of the seismic source and rupture propagation. The results of application of this technique for two Alaska earthquakes that occurred in 2018 (with Mw=7.9 in January and with Mw=7.1 in November) are presented. The possibility of the fault plane identification, which based on the obtained estimates of the focal mechanisms and second moments, is analyzed for both events. Bilateral model of the source is constructed.

**Keywords** surface wave records, double couple, fault plane, second moment.

**For citation** Fomochkina, A.S., & Bukchin, B.G. (2020). The comparative analysis of 2018 Alaska earthquakes from surface wave records. *Rossiiskii seismologicheskii zhurnal* [Russian Journal of Seismology], 2(1), 76-84. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.35540/2686-7907.2020.1.07>

## References

- Babich, V.M., Chikachev, B.A., & Yanovskaya, T.B. (1976). [Surface waves in a vertically inhomogeneous elastic half-space with weak horizontal inhomogeneity]. *Izvestiya 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.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 seismicheskikh dannykh. Vychislitel'naia seismologiya*, vyp. 25 [Computational seismology, v. 25] (pp. 238-250). Moscow, Russia: Nauka Publ. (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.
- Dziewonski, A.M., & Anderson, D.L. (1981). Preliminary reference Earth model. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 25, 297-356.
- Fomochkina, A.S., & Bukchin, B.G. (2018). [Building a model of the Alaska earthquake 2018 from surface wave spectra]. In *Materialy XIII Mezhdunarodnoi seismologicheskoi shkoly "Sovremennye metody obrabotki i interpretatsii seismologicheskikh dannykh"* [Proceedings of the XIII International Seismological Workshop "Modern Methods of Processing and Interpretation of Seismological Data"] (pp. 282-286). Obninsk, Russia: GS RAS Publ. (In Russ.).
- 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*, vyp. 6 [Computational seismology, v. 6] (pp. 236-249). Moscow, Russia: Nauka Publ. (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 (Mw=5.2) and July 21st, 1995 Yongden (Mw=5.6) earthquakes, near Haiyuan fault (Gansu, China). *Geophysical Journal International*, 144, 206-220.
- Lay, T., Ye, L., Bai, Y., Cheung, K.F., Kanamori, H. (2018). The 2018 Mw 7.9 Gulf of Alaska earthquake: Multiple fault rupture in the Pacific plate. *Geophysical Research Letters*, 45, 9542-9551. doi: 10.1029/2018GL079813
- Liu, C., Lay, T., Xie, Z., & Xiong, X. (2019). Intraslab deformation in the 30 November 2018 Anchorage, Alaska, Mw 7.1 earthquake. *Geophysical Research Letters*, 46, 2449-2457. doi: 10.1029/2019GL082041
- Mendiguren, J. (1977). Inversion of surface wave data in source mechanism studies. *Journal of Geophysical Research*, 82, 889-894.
- Nataf, H.-C., & Ricard, Y. (1996). 3SMAC: An a priori tomographic model of the upper mantle based on geophysical modeling. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 95, 101-122.
- USGS. Earthquakes. (2019). Retrieved from <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/us2000cmj3/finite-fault>
- Woodhouse, J.H. (1974). Surface waves in the laterally varying structure. *Geophysical Journal of the Royal Astron. Soc.*, 90, 713-728.

## Information about authors

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

**Bukchin Boris Grigor'yevich**, PhD, Head of Laboratory of the IEPT RAS, Moscow, Russia. E-mail: bukchin@mitp.ru