

УДК 550.34

## Мониторинг сейсмических процессов и физических параметров очагов землетрясений Северного Тянь-Шаня

© 2020 г. А.А. Мамбетсадыкова, М. Омуралиев

ИС НАН КР, г. Бишкек, Кыргызстан

**Аннотация.** Осуществлён мониторинг сейсмических процессов и физических параметров очагов близких землетрясений за 2019 г. в пределах территории  $\varphi=41.5\text{--}43.5^\circ\text{N}$ ,  $\lambda=72.0\text{--}80.0^\circ\text{E}$  Северного Тянь-Шаня на сочленении области горообразования Тянь-Шаня и Казахстанского щита на основе данных цифровых сейсмических станций сетей KNET и KRNET. При этом изучены скорости сейсмических волн  $V_p$ ,  $V_s$ ,  $V_p/V_s$ , коэффициент Пуассона, сейсмический параметр  $B$  и модуль сжатия  $K$ , модуль сдвига  $\mu$ , отношения  $M_0/\mu$  сейсмического момента и модуля сдвига, виды очагов: с проявлением флюидов, с проявлением частичного плавления, с проявлением высоких давлений в последовательности проявлений землетрясений. Отмечено, что сейсмические процессы имеют циклический характер.

**Ключевые слова:** землетрясение, очаг, сейсмические волны, скорость волн, коэффициент Пуассона, сейсмический параметр, модуль сжатия, модуль сдвига, флюиды, частичное плавление, высокое давление.

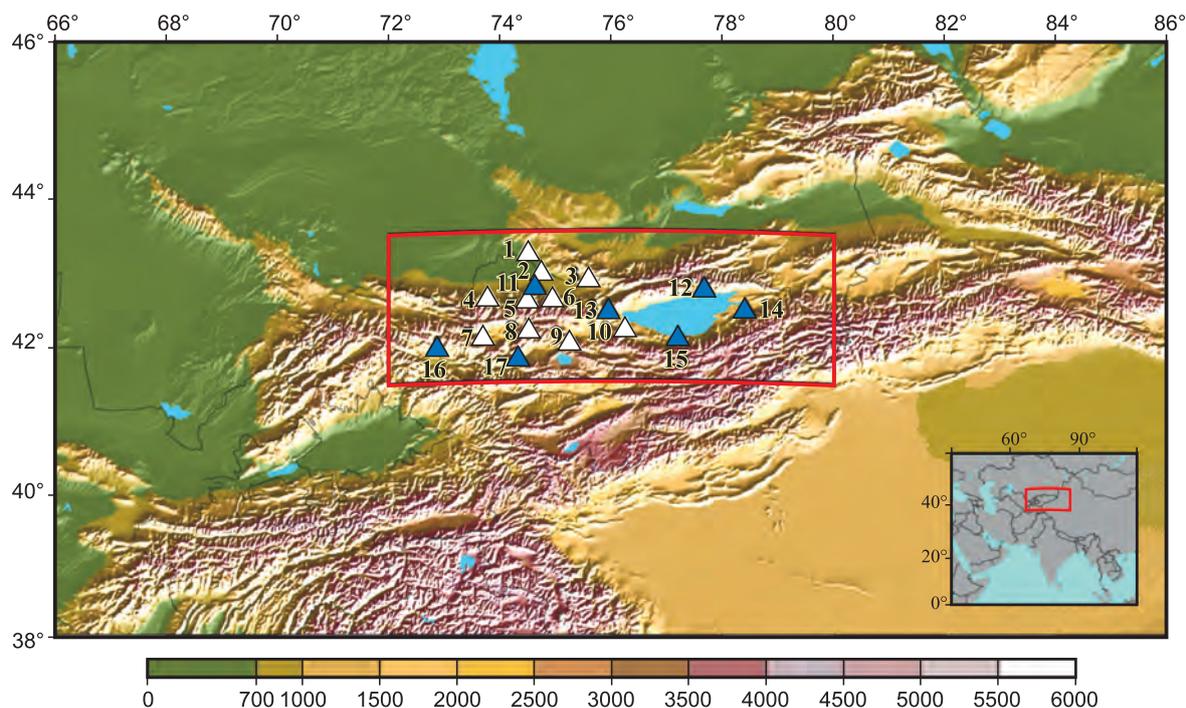
**Для цитирования:** Мамбетсадыкова А.А., Омуралиев М. Мониторинг сейсмических процессов и физических параметров очагов землетрясений Северного Тянь-Шаня // Российский сейсмологический журнал. – 2020. – Т. 2, № 3. – С. 97–108. DOI: <https://doi.org/10.35540/2686-7907.2020.3.09>

### Введение

В Северном Тянь-Шане на сочленении области горообразования Тянь-Шаня и Казахстанского щита формируются широтные активные разломы, устойчивые поднятия: Кыргызское, Суусамыртооское, Заилийское, Кунгейское, Терскойское, разделённые межгорными впадинами, такими как Чуйская, Кемино-Чиликская, Иссык-Кульская, Кочкорская, Суусамырская. Проявились сильные землетрясения [Omuraliev, Omuralieva, 2004; Джанузаков и др., 2003], такие как Беловодское (1885 г.,  $M=6.9$ ), Верненское (1887 г.,  $M=7.3$ ), Чиликское (1889 г.,  $M=8.3$ ), Кеминское (1911 г.,  $M=8.2$ ), Кемино-Чуйское (1938 г.,  $M=6.9$ ), Сарыкамышское (1970 г.,  $M=6.8$ ), Жаланаш-Тюпское (1978 г.,  $M=6.6$ ), Суусамырское (1992 г.,  $M=7.3$ ). Все землетрясения за этот период изучались на основе данных аналоговых станций. В 1991 г. установлены цифровые сейсмические станции сети KNET (Kyrgyzstan Telemetered Network) (рис. 1). В 2009 г. зарегистрирована новая сеть цифровых станций KRNET (Kyrgyz Republic Digital Network). Цифровые станции этих сетей расположены на Северном Тянь-Шане достаточно близко,

на расстоянии 30–35 км друг от друга, и их записи позволяют получать достоверные сейсмологические данные. Земная кора района сложена в основном гранодиоритами палеозоя с плотностью около  $2.7 \text{ г/см}^3$ .

Как известно, амплитуды и периоды сейсмических волн позволяют определить магнитуду и энергию землетрясений [Richter, 1935; Richter, 1958; Gutenberg, Richter, 1956]. Полярность первого импульса продольной ( $P$ ) волны является основой изучения механизма очага [Kawasumi, 1937; Касахара, 1985]. Ляв [Love, 1944], Накано [Nakano, 1923] разрабатывали теории излучения упругих волн точечными источниками. Строились теоретические модели с разными системами сил в точечном источнике. Рейд [Reid, 1911], Беньофф, Пресс и Смит [Benioff et al., 1961] отметили, что в очаге происходит распространение разрушения. При этом сейсмические волны генерировались движущимся очагом конечных размеров и предельная скорость распространения разрушения зависела от скорости сдвиговых волн. В спектрах объёмных волн выделена угловая частота [Aki, 1967; Bath, 1974] и установлен масштабный закон спектральной плотности сейсмических смещений в дальней



**Рис. 1.** Карта-схема района исследования Северного Тянь-Шаня (чёрная рамка) и расположение сейсмических станций сетей KNET и KRNET.

Белыми треугольниками обозначены станции сети KNET: 1 – «Успеновка» (USP), 2 – «Чумыш» (CNM), 3 – «Токмок» (TKM2), 4 – «Эркин-Сай» (EKS2), 5 – «Ала-Арча» (ААК), 6 – «Карагай-Булак» (КБК), 7 – «Алмалы-Ашуу» (AML), 8 – «Учтор» (UCH), 9 – «Кызарт» (KZA), 10 – «Улахол» (ULHL). Чёрными треугольниками обозначены станции сети KRNET: 11 – «Бишкек» (FRU1), 12 – «Ананьево» (ANVS), 13 – «Боом» (BOOM), 14 – «Каракол» (PRZ), 15 – «Каджи-Сай» (KDJ), 16 – «Арал» (ARLS), 17 – «Токтогул» (ТОКЛ). Вкладка в нижнем правом углу показывает географическое положение Тянь-Шаня, который оконтурен красной рамкой

зоне от землетрясений с различными магнитудами. Брюн [Brune, 1970] изучил временную зависимость смещения в очаге и получил формулу:

$$u(t) = (\sigma / \mu) \cdot \beta \cdot \tau \cdot (1 - e^{-t/\tau}), \quad (1)$$

где  $\sigma$  – эффективное напряжение,  $\mu$  – жёсткость (модуль сдвига),  $\beta$  – скорость сдвиговых волн,  $\tau$  – константа времени. Константа времени представляет собой:

$$\tau \sim a / \beta, \quad (2)$$

где  $a$  – эквивалентный радиус поверхности разлома.

Величина  $u_0 = (\sigma / \mu) \beta$  представляет собой начальную скорость частицы. Следует отметить, что отношение  $(\sigma / \mu)$  связано с отношением сейсмической энергии ( $E$ ) и сейсмического момента ( $M_0$ ) формулой:

$$E / M_0 = 1 / 2 (\sigma / \mu). \quad (3)$$

В дальнейшем на основе разработки Брюна определялись динамические параметры очага землетрясения. Впоследствии были выделе-

ны два типа очаговых спектров: с одной угловой частотой и двумя угловыми частотами. При этом спектр второго типа выражает главную часть очага и субочага [Раутиан и др., 1996].

Результаты работ многих исследователей обобщены в создании физической основы моделей прогноза землетрясений: модели лавинно-неустойчивого трещинообразования (ЛНТ) [Мячкин и др., 1975] и дилатантно-диффузионной (ДД) [Scholz et al., 1973; Anderson, Whitcomb, 1973]. В ДД-модели изменение давления внутривещной жидкости в дилатирующей области является обязательным условием возникновения землетрясения. В ЛНТ-модели при подготовке землетрясения происходит постепенный переход от объёмного дисперсного разрушения к локализованному независимо от наличия или отсутствия внутривещной жидкости. Эти модели показывают, что существуют неопределённости в физических состояниях среды и их динамики. Касахара [Касахара, 1985] отметил, что при построении будущих более совершенных моделей должны быть учтены основные физические свойства среды очага. В связи с этим мониторинг сейсмических

процессов и физических параметров очагов землетрясений является актуальной проблемой сейсмологии.

### Методика исследований и фактический материал

По данным цифровых сейсмических станций (расстояние между ними 30–35 км) сетей KRNET и KNET в Центре данных Института сейсмологии Национальной академии наук Кыргызской Республики (ИС НАН КР) определяются основные параметры сейсмических волн. Параметры продольной волны изучались по записи вертикальной компоненты, а параметры поперечной волны – по записи одной из трёх компонент, где она наиболее чётко видна. Оценивались значения:  $rms$  – среднеквадратическое отклонение времени пробега наблюдаемых и вычисленных (погрешность),  $se$  – стандартное отклонение от времени вступления,  $d$  – класс точности определения эпицентра,  $she$  – 68%-ный доверительный интервал в определении положения эпицентра, глубина очага по заложенным скоростным моделям ( $depth$ ) и по методикам, заложенным в программе Нуэроellipse ( $HZ$ ),  $sez$  – 68%-ный доверительный интервал в определении глубины и т.д. Составлялись карточки (бюллетени) каждого землетрясения.

При проведении исследований были выбраны близкие землетрясения, регистрируемые минимум тремя и более цифровыми сейсмическими станциями, среднеквадратическое отклонение времени пробега  $rms=0.1$ , стандартное отклонение от времени вступления  $se=0.1$ , класс точности определения эпицентра  $d=1$ , массивы горных пород были близки по составу, составлялись индивидуальные годографы по этим карточкам. Основы методики исследований изложены в трудах многочисленных авторов [Ризниченко, 1958; Сабитова, 1976; Грин, Кальметьева, 1976; Соболев, Завьялов, 1980; Садовский, 1987; Омуралиев, 1987; 1998; 2018; Oturaliev, 1999; Nakajima et al., 2001; Oturaliev, Oturalieva, 2004; Омуралиев, Омуралиева, 2006; Омуралиева, Омуралиев, 2011; 2015; 2018а; 2018б; Абдрахматов и др., 2015; Юдахин и др., 1983; Мамбетсадыкова и др., 2019]. При этом можно отметить некоторые их результаты:

– землетрясения приурочены к активным разломам, где происходит динамическая сегментация и динамическая секторизация;

– очаг землетрясения формируется в пределах сегмента разлома между аномальными областями с большой концентрацией (плотностью)

сейсмогенных разрывов, т.е. в дискретной геофизической среде;

– очаги землетрясений разной величины в определённом геодинамическом районе взаимосвязаны, и в последовательности их проявления отмечается иерархия сейсмических циклов. Относительно короткопериодными циклами характеризуются землетрясения малой величины, а относительно длинными циклами – крупные события;

– на спектрах сейсмических волн очага выделяется наряду с угловой частотой множество характерных частот с относительно высокими спектральными плотностями. Характерные частоты очевидно выражают системы разрывов в очаге со свойственными величинами сейсмического момента;

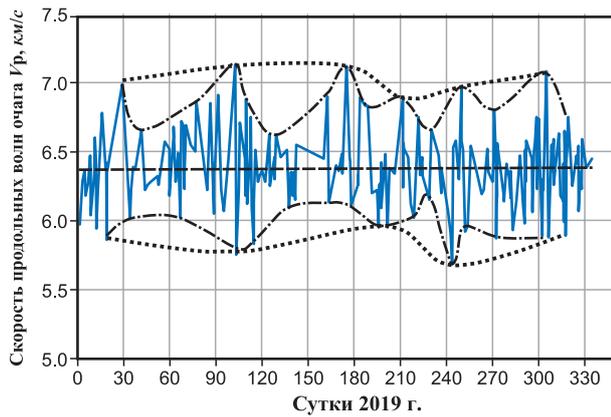
– скорости сейсмических волн очага  $V_p$ ,  $V_s$ ,  $V_p/V_s$  согласно критериям, определённым в работе [Nakajima et al., 2001], выражают проявления флюидов, частичного плавления, высокого давления. А именно, малые значения  $V_p$ ,  $V_s$ ,  $V_p/V_s$  выражают проявления флюидов, малые значения  $V_p$ ,  $V_s$ , но большое значение  $V_p/V_s$  – частичное плавление, большие значения  $V_p$ ,  $V_s$  – высокие давления в дискретной среде очага.

### Результаты исследований и обсуждение

В качестве примера рассмотрим последовательность 242 очагов коровых ( $h=6–35$  км) землетрясений Северного Тянь-Шаня в пределах территории  $\varphi=41.5–43.5^\circ\text{N}$ ,  $\lambda=72.0–80.0^\circ\text{E}$  за 2019 год. Сейсмическая энергия этих землетрясений составляла  $E=10^6–5\cdot 10^{11}$  Дж, моментная магнитуда событий –  $M_w=0.83–4.63$ . Составлены индивидуальные годографы на эпицентральной дистанции до 110 км, и определены скорости  $V_p$ ,  $V_s$ ,  $V_p/V_s$  сейсмических волн очагов землетрясений с достоверностью аппроксимации  $R^2>0.98$ .

Скорость продольных  $V_p$  сейсмических волн очагов составляла 5.6–7.1 км/с. При прослеживании  $V_p$  во времени отмечается иерархия нерегулярных циклов, например, 3-го и 2-го порядков (рис. 2). Циклы третьего порядка выделяются одновременно на относительно высоких значениях  $V_p=6.6–7.1$  км/с и на низких значениях  $V_p=5.6–6.1$  км/с. Периоды этих циклов высоких значений  $V_p$  составляют 36.9–68.5 сут., низких значений – 47.9–92.4 сут.

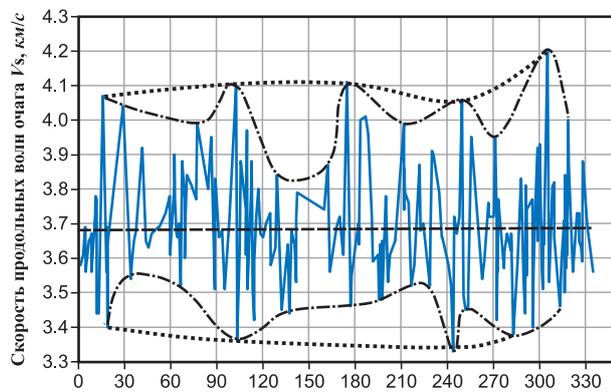
Скорость поперечных  $V_s$  сейсмических волн очагов имеет значения 3.3–4.2 км/с (среднее – 3.6 км/с). При прослеживании  $V_s$  во времени отмечается иерархия нерегулярных циклов,



**Рис. 2.** График скорости продольных сейсмических волн  $V_p$  в последовательности очагов землетрясений Северного Тянь-Шаня за 2019 г.

Пунктирная линия означает среднее значение  $V_p$ . Иерархия циклов: цикл второго порядка обозначен точечной линией, цикл третьего порядка – пунктирной линией с точкой

например, 3-го и 2-го порядков (рис. 3). Циклы третьего порядка выделяются одновременно на относительно высоких значениях  $V_s=3.8–4.2$  км/с и на низких значениях  $V_s=3.5–3.3$  км/с. Периоды этих циклов высоких значений  $V_s$  составляют 56.5–83.7 сут., низких значений – 39.4–140.3 сут.

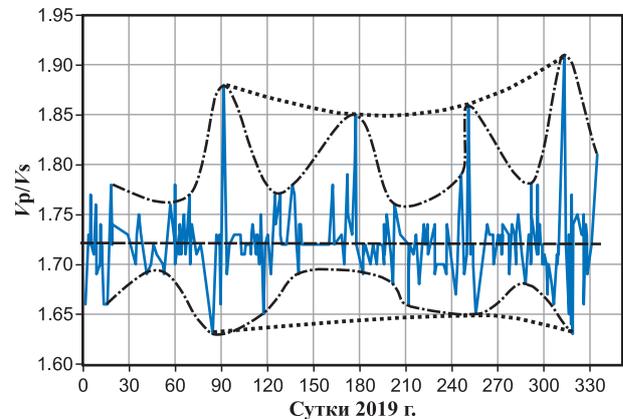


**Рис. 3.** График скорости поперечных сейсмических волн  $V_s$  в последовательности очагов землетрясений Северного Тянь-Шаня за 2019 г.

Пунктирная линия означает среднее значение  $V_s$ . Иерархия циклов: цикл второго порядка обозначен точечной линией, цикл третьего порядка – пунктирной линией с точкой

Отношение скоростей  $V_p/V_s$  сейсмических волн очагов составляет 1.63–1.91 (среднее – 1.72). При прослеживании  $V_p/V_s$  во времени отмечается иерархия нерегулярных циклов, например, 3-го и 2-го порядков (рис. 4). Циклы третьего порядка выделяются одновременно на относительно высоких значениях

$V_p/V_s=1.76–1.91$  и на низких значениях  $V_p/V_s=1.63–1.69$ . Периоды этих циклов высоких значений  $V_p/V_s$  составляют 52.5–85.85 сут., низких значений – 51.8–171.3 сут.



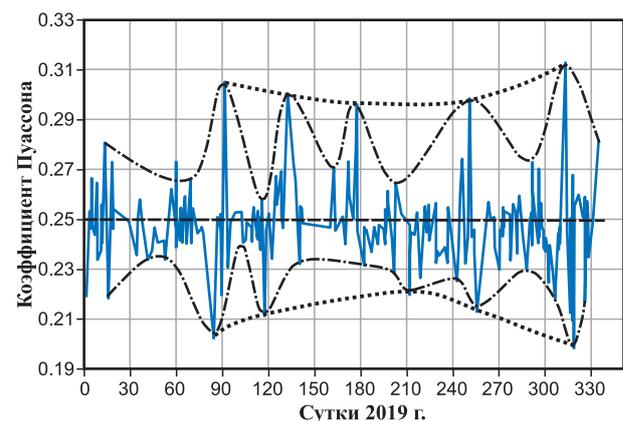
**Рис. 4.** График  $V_p/V_s$  в последовательности очагов землетрясений Северного Тянь-Шаня за 2019 г.

Пунктирная линия означает среднее значение  $V_p/V_s=1.72$ . Иерархия циклов: цикл второго порядка обозначен точечной линией, цикл третьего порядка – пунктирной линией с точкой

Коэффициент Пуассона ( $\sigma$ ) очагов определяется по формуле:

$$\sigma = 1/2(V_p^2 - 2V_s^2)/(V_p^2 - V_s^2) \quad (4)$$

и имеет значения 0.20–0.31 (среднее 0.24). В дальнейшем символ  $\sigma$  не путать с аналогичным символом в формуле (1), где под  $\sigma$  понимается эффективное напряжение. При прослеживании  $\sigma$  во времени отмечается иерархия нерегулярных циклов, например, 3-го и 2-го порядков (рис. 5).



**Рис. 5.** График коэффициента Пуассона  $\sigma$  в последовательности очагов землетрясений Северного Тянь-Шаня за 2019 г.

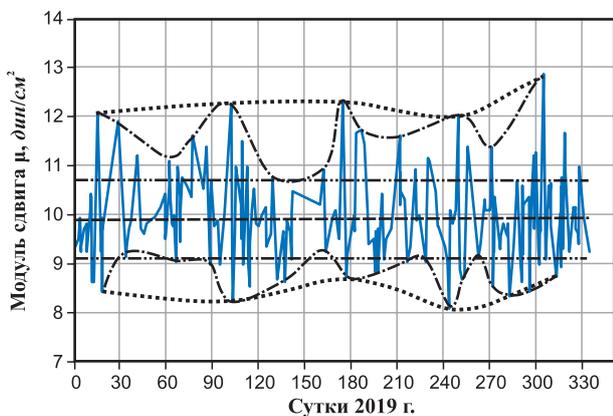
Пунктирная линия означает среднее значение  $\sigma=0.25$ . Иерархия циклов: цикл второго порядка обозначен точечной линией, цикл третьего порядка – пунктирной линией с точкой

Циклы третьего порядка выделяются одновременно на относительно высоких значениях  $\sigma=0.25-0.31$  и на низких значениях  $\sigma=0.24-0.20$ . Периоды этих циклов высоких значений  $\sigma$  составляют 40.8–73.4 сут., низких значений – 32.9–94.5 сут. Следует отметить, что среды очагов с малыми значениями  $\sigma$  – более хрупкие, а с большими значениями  $\sigma$  – более пластичные.

Модуль сдвига  $\mu$  в очаге можно определить на основе формулы:

$$V_s = (\mu / \rho)^{1/2}, \quad (5)$$

где  $V_s$  – скорость поперечных сейсмических волн очага,  $\rho$  – плотность среды в области очага в пределах 2.7 г/см<sup>3</sup>. Данный модуль сдвига в очаге имеет разные значения 8.0·10<sup>11</sup>–12.8·10<sup>11</sup> дин/см<sup>2</sup> (среднее – 9.9·10<sup>11</sup> дин/см<sup>2</sup>). При прослеживании  $\mu$  во времени отмечается иерархия нерегулярных циклов, например, 3-го и 2-го порядков (рис. 6). Циклы третьего порядка выделяются одновременно на относительно высоких значениях  $\mu=10.7 \cdot 10^{11}$ –12.8·10<sup>11</sup> дин/см<sup>2</sup> и на низких значениях  $\mu=9.1 \cdot 10^{11}$ –8.1·10<sup>11</sup> дин/см<sup>2</sup>. Периоды этих циклов высоких значений  $\mu$  составляют 55.5–86.7 сут., низких значений – 39.4–84.5 сут. В связи с отмеченной иерархией циклов можно сказать, что здесь в очагах землетрясений проявляется динамический модуль сдвига.



**Рис. 6.** График модуля сдвига (жёсткость)  $\mu$  в последовательности очагов землетрясений Северного Тянь-Шаня за 2019 г.

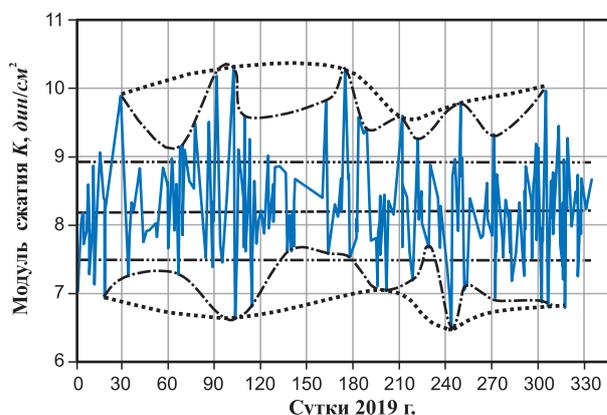
Среднее (С) значение  $\mu=9.9 \cdot 10^{11}$  дин/см<sup>2</sup> обозначено пунктирной линией, величины  $C+S$  и  $C-S$  с учётом стандартного отклонения (S) обозначены пунктирными линиями с двумя точками. Иерархия циклов: цикл второго порядка обозначен точечной линией, цикл третьего порядка – пунктирной линией с точкой

Модуль сжатия  $K$  в очаге можно определить через скорости сейсмических волн и плотность

среды (массива горных пород в пределах очага) на основе формулы:

$$K = B \cdot \rho, \quad (6)$$

где  $B=(V_p^2-4/3V_s^2)$  – сейсмический параметр Адамса-Вильямсона,  $\rho$  – плотность среды в пределах 2.7 г/см<sup>3</sup>. Данный модуль сжатия в очаге имеет разные значения 6.4·10<sup>11</sup>–10.3·10<sup>11</sup> дин/см<sup>2</sup> (среднее 8.2·10<sup>11</sup> дин/см<sup>2</sup>). При прослеживании  $K$  во времени отмечается иерархия нерегулярных циклов, например, 3-го и 2-го порядков (рис. 7). Циклы третьего порядка выделяются одновременно при относительно высоких значениях  $K=9.0 \cdot 10^{11}$ –10.3·10<sup>11</sup> дин/см<sup>2</sup> и при низких значениях  $K=7.7 \cdot 10^{11}$ –6.4·10<sup>11</sup> дин/см<sup>2</sup>. Периоды этих циклов высоких значений  $K$  составляют 55.5–86.7 сут., низких значений – 39.4–84.5 сут.



**Рис. 7.** График модуля сжатия  $K$  в последовательности очагов землетрясений Северного Тянь-Шаня за 2019 г.

Среднее (С) значение  $\mu=8.2 \cdot 10^{11}$  дин/см<sup>2</sup> обозначено пунктирной линией, величины  $C+S$  и  $C-S$  с учётом стандартного отклонения (S) обозначены пунктирными линиями с двумя точками. Иерархия циклов: цикл второго порядка обозначен точечной линией, цикл третьего порядка – пунктирной линией с точкой

Моментная магнитуда  $M_w$  и сейсмический момент  $M_0$  взаимосвязаны [Kanamori, 1977]:

$$M_w = (\lg M_0 / 1.5) - 10.7, \quad (7)$$

где  $M_w$  – моментная магнитуда,  $M_0$  – сейсмический момент, дин·см. По данным сейсмического момента  $M_0$  и модуля сдвига  $\mu$  на основании формулы Аки [Аки, 1966]:

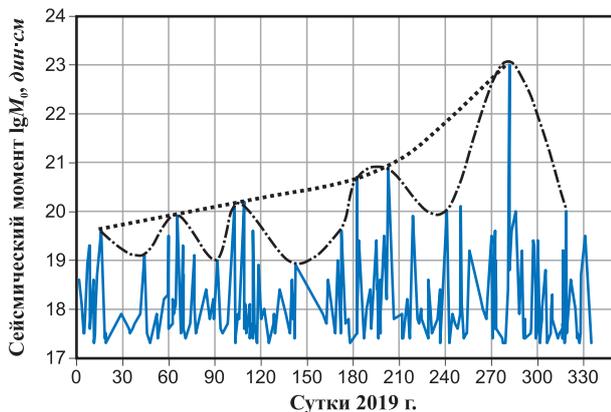
$$M_0 = \mu UA, \quad (8)$$

где  $U$  – подвижка по разлому очага (смещение, см),  $A$  – площадь разлома (см<sup>2</sup>).

Из (7) и (8) мы получаем выражение, которое представляет собой своего рода объём смещения и характеризует параметр динамики развития разлома очага:

$$UA=M_0/\mu. \tag{9}$$

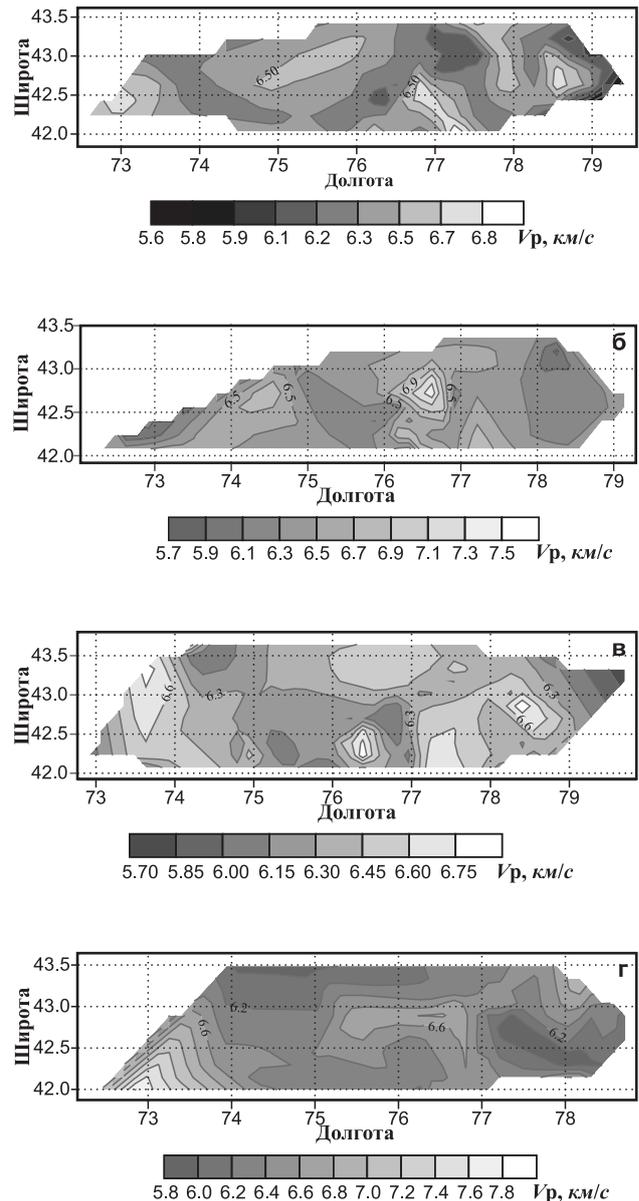
Сейсмический момент  $M_0$  очага изменялся в пределах  $2 \cdot 10^{17} - 10 \cdot 10^{22}$  дин·см. При прослеживании  $\lg M_0$  во времени отмечается иерархия нерегулярных циклов, например, 3-го и 2-го порядков (рис. 8). Циклы третьего порядка выделяются на относительно высоких значениях  $\lg M_0 = 8.9 - 23.0$  дин·см. Периоды этих циклов составляют 43.5–93.8 сут. Величина  $UA$  очага изменялась от  $1.9011 \cdot 10^3$  до  $1.0506 \cdot 10^{11}$  см<sup>3</sup>. В последовательности  $UA$  очагов также отмечалась иерархия нерегулярных циклов, например, 3-го и 2-го порядков. Соответственно, наблюдалось своеобразное прерывистое скольжение. Сумма объёма скольжения в очагах за 335 сут. в 2019 г. достигала  $\Sigma UA = 108.08 \cdot 10^9$  см<sup>3</sup>. Соответственно, средняя скорость накопления объёма скольжения  $UA$  в разломах очагов землетрясения Северного Тянь-Шаня составляла  $2.4 \cdot 10^7$  см<sup>3</sup>/сут.



**Рис. 8.** График сейсмического момента сил в очаге в последовательности землетрясений Северного Тянь-Шаня за 2019 г.

Иерархия циклов: цикл второго порядка обозначен точечной линией, цикл третьего порядка – пунктирной линией с точкой

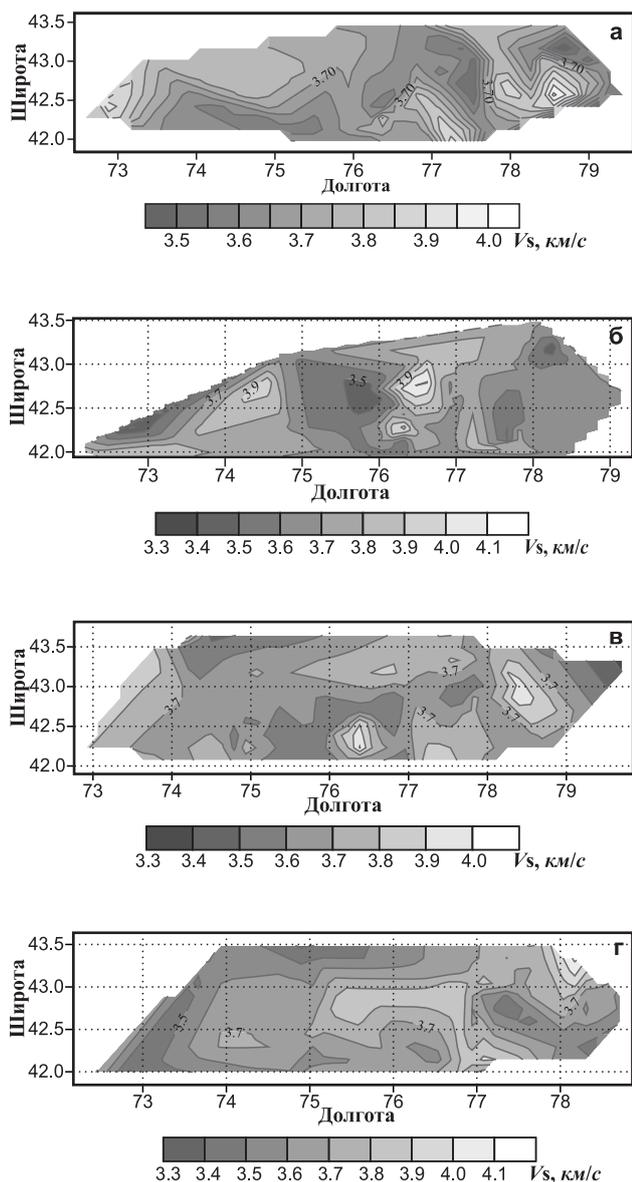
Пространственно-временное распределение скоростей  $V_p$  продольных сейсмических волн очагов за январь–март, апрель–июнь, июль–сентябрь, октябрь–ноябрь приведено на рис. 9 (а–г), где отмечаются миграции очагов землетрясений с низкими и высокими скоростями сейсмических волн вдоль и поперёк активных структур. В связи с этим наблюдается динамическая сегментация и секторизация сейсмической зоны земной коры Северного Тянь-Шаня за 2019 год.



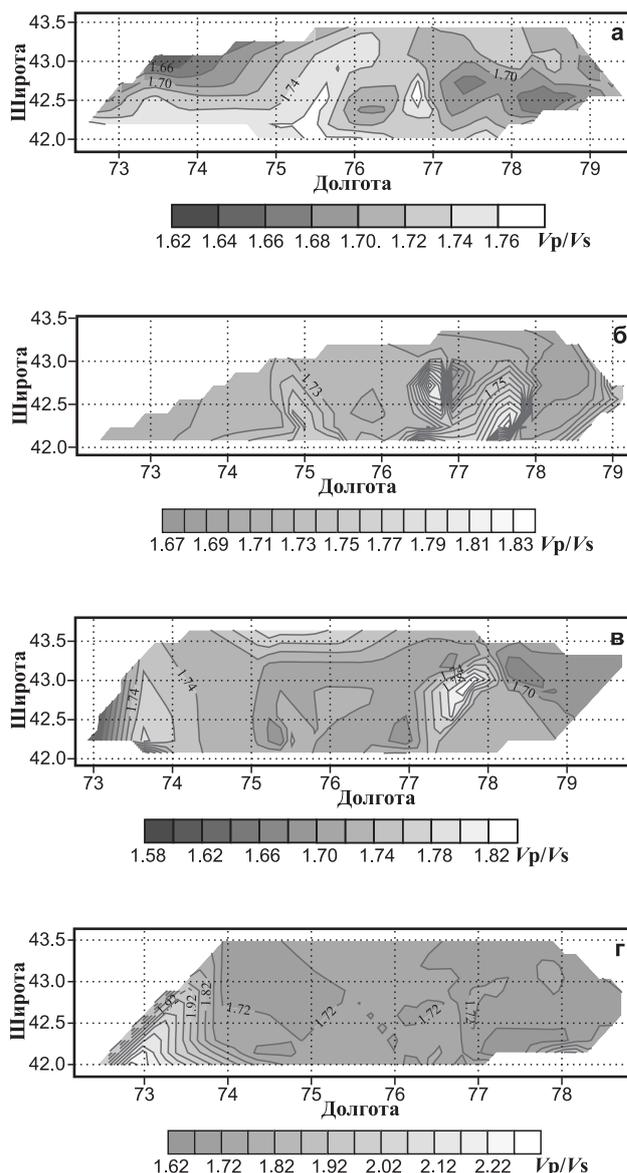
**Рис. 9.** Распределение скорости продольных волн  $V_p$  очагов коровых землетрясений в пределах территории  $\varphi=41.5-43.5^\circ N$ ,  $\lambda=72.0-80.0^\circ E$  Северного Тянь-Шаня:

а – январь–март 2019 г.; б – апрель–июнь 2019 г.; в – июль–сентябрь 2019 г.; г – октябрь–ноябрь 2019 г.

Пространственно-временное распределение скоростей  $V_s$  поперечных сейсмических волн очагов за январь–март, апрель–июнь, июль–сентябрь, октябрь–ноябрь приведено на рис. 10 (а–г). Отмечается миграция очагов землетрясений с низкими и высокими скоростями поперечных сейсмических волн вдоль и поперёк активных структур, в связи с этим наблюдается динамическая сегментация и секторизация сейсмической зоны земной коры Северного Тянь-Шаня за 2019 год.



**Рис. 10.** Распределение скорости поперечных волн  $V_s$  очагов коровых землетрясений в пределах территории  $\varphi=41.5-43.5^\circ\text{N}$ ,  $\lambda=72.0-80.0^\circ\text{E}$  Северного Тянь-Шаня: а – январь–март 2019 г.; б – апрель–июнь 2019 г.; в – июль–сентябрь 2019 г.; г – октябрь–ноябрь 2019 г.



**Рис. 11.** Распределение отношения скоростей сейсмических волн  $V_p/V_s$  очагов коровых землетрясений в пределах территории  $\varphi=41.5-43.5^\circ\text{N}$ ,  $\lambda=72.0-80.0^\circ\text{E}$  Северного Тянь-Шаня: а – январь–март 2019 г.; б – апрель–июнь 2019 г.; в – июль–сентябрь 2019 г.; г – октябрь–ноябрь 2019 г.

Пространственно-временное распределение величины  $V_p/V_s$  сейсмических волн очагов за январь–март, апрель–июнь, июль–сентябрь, октябрь–ноябрь приведено на рис. 11 (а–г). Отмечается миграция очагов землетрясений с низкими и высокими значениями  $V_p/V_s$ , и наблюдается динамическая сегментация и секторизация сейсмической зоны земной коры Северного Тянь-Шаня за 2019 год.

Распределение скоростей продольных волн  $V_p$ , поперечных волн  $V_s$  и параметра  $V_p/V_s$  очагов

коровых землетрясений по долготе Северного Тянь-Шаня и во времени за январь–ноябрь 2019 г. показано на рис. 12–14.

В результате изучения взаимоотношения скоростей  $V_p$ ,  $V_s$ ,  $V_p/V_s$  сейсмических волн землетрясений на основании критерий, определённых в работе [Nakajima et al., 2001], выделены три вида очагов на Северном Тянь-Шане: с проявлениями флюидов, частичного плавления, высоких давлений (рис. 15). Отмечено, что виды очагов чередуется в пространстве и во времени.

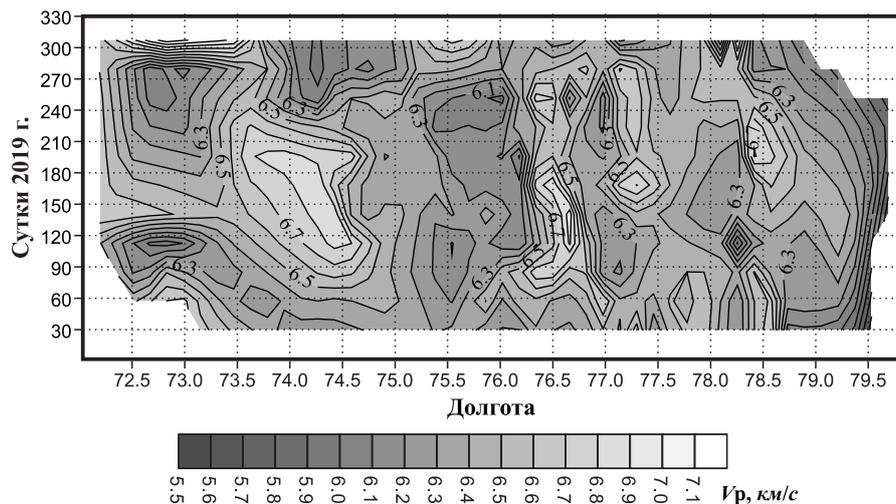


Рис. 12. Распределение скорости продольных волн  $V_p$  очагов коровых землетрясений в пределах территории  $\varphi=41.5\text{--}43.5^\circ\text{N}$ ,  $\lambda=72.0\text{--}80.0^\circ\text{E}$  по долготе Северного Тянь-Шаня и во времени за январь–ноябрь 2019 г.

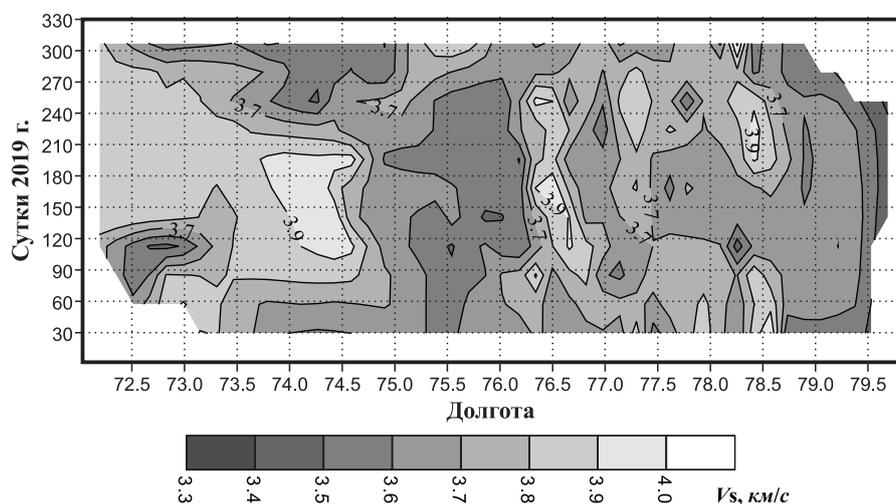


Рис. 13. Распределение скорости поперечных волн  $V_s$  очагов коровых землетрясений в пределах территории  $\varphi=41.5\text{--}43.5^\circ\text{N}$ ,  $\lambda=72.0\text{--}80.0^\circ\text{E}$  по долготе Северного Тянь-Шаня и во времени за январь–ноябрь 2019 г.

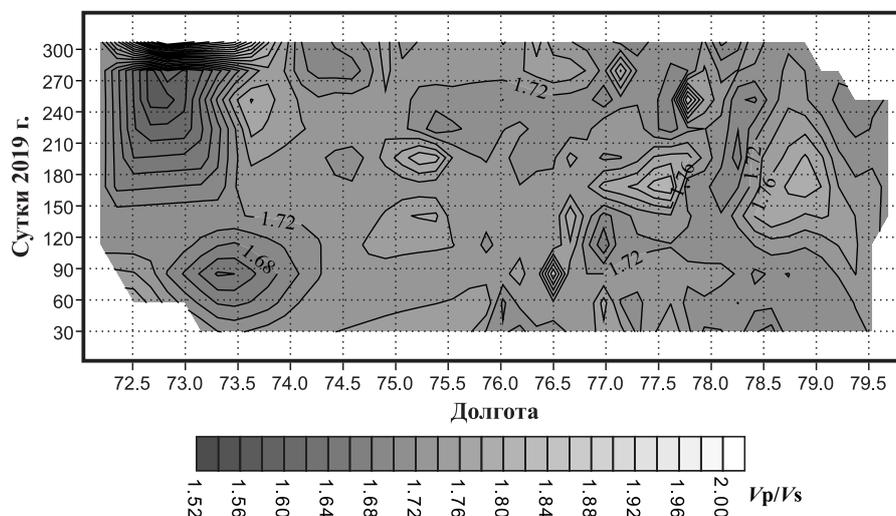
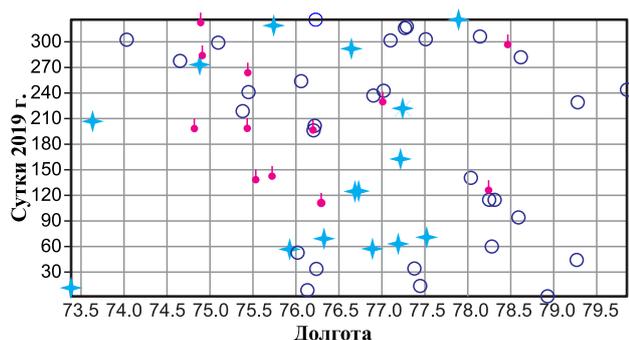


Рис. 14. Распределение отношения скоростей  $V_p/V_s$  очагов коровых землетрясений в пределах территории  $\varphi=41.5\text{--}43.5^\circ\text{N}$ ,  $\lambda=72.0\text{--}80.0^\circ\text{E}$  по долготе Северного Тянь-Шаня и во времени за январь–ноябрь 2019 г.



**Рис. 15.** Распределение видов очагов землетрясений с проявлениями флюидов, частичного плавления, высоких давлений в пределах территории  $\varphi=41.5\text{--}43.5^\circ\text{N}$ ,  $\lambda=72.0\text{--}80.0^\circ\text{E}$  вдоль Северного Тянь-Шаня.

Кружочками обозначены проявления флюидов, фигурками в виде капли – проявления частичного плавления, звёздочками – проявления высоких давлений

### Заключение

1. На основании данных цифровых сейсмических станций сетей KNET и KRNET осуществлён анализ сейсмических процессов и физических параметров очагов коровых землетрясений Северного Тянь-Шаня в пределах территорий  $\varphi=41.5\text{--}43.5^\circ\text{N}$ ,  $\lambda=72.0\text{--}80.0^\circ\text{E}$ , произошедших в течение 2019 года. Проанализированы последовательности проявления землетрясений с характерными значениями скоростей сейсмических волн  $V_p$ ,  $V_s$ ,  $V_p/V_s$ , коэффициента Пуассона, сейсмического параметра  $B$  и модуля сжатия  $K$ , модуля сдвига  $\mu$ , отношения  $M_0/\mu$  – сейсмического момента и модуля сдвига, с разными видами очагов: с проявлением флюидов, с проявлением частичного плавления, с проявлением высоких давлений.

2. В сейсмических процессах Северного Тянь-Шаня за 2019 г. отмечена иерархия сейсмических циклов: первого, второго, третьего и т.д. порядка с различной длительностью повторения. Длительность циклов, например, третьего порядка (по относительно высоким значениям параметров) в изменении скорости  $V_p$  составляет 36–68 сут.; скорости  $V_s$  – 56–83 сут.;  $V_p/V_s$  – 52–85 сут.; коэффициента Пуассона – 40–73 сут.; сейсмического параметра  $B$  и модуля сжатия  $K$  – 55–85 сут.; модуля сдвига  $\mu$  – 52–85 сут.; параметр  $M_0/\mu$  – отношения сейсмического момента и модуля сдвига составляет – 43–93 сут.

3. Распределение в пространстве и во времени скоростей сейсмических волн  $V_p$ ,  $V_s$ ,  $V_p/V_s$ , коэффициента Пуассона, сейсмического параметра  $B$  и модуля сжатия  $K$ , модуля сдвига  $\mu$ , отноше-

ния  $M_0/\mu$  – сейсмического момента и модуля сдвига различных видов очагов землетрясений позволяют сказать, что распределение скоростей и геофизические поля земной коры Северного Тянь-Шаня характеризуются значительной неоднородностью.

### Литература

- Абдрахматов К.Е., Омуралиев М., Омуралиева А. Распределение флюидов, температуры в зонах Центрального Тянь-Шаня и подготовка сильных землетрясений. – Бишкек: Триада принт, 2015. – 206 с.
- Грин Т.П., Кальметьева З.А. Определение скоростных разрезов и глубин землетрясений при детальном сейсмологическом наблюдении // Геолого-геофизическая характеристика сейсмогенных зон Киргизии. – Фрунзе: Илим, 1976. – С. 13–31.
- Джанузакоев К.Д., Омуралиев М., Омуралиева А., Ильясов Б.И., Гребенникова В.В. Сильные землетрясения Тянь-Шаня. – Бишкек: Илим, 2003. – 216 с.
- Касахара К. Механика землетрясений. – М.: Мир, 1985. – 264 с.
- Мамбетсадыкова А.А., Омуралиева А.М., Омуралиев М. Характеристика сейсмических волн и состояние среды очагов землетрясений Северного Тянь-Шаня // Вестник Института сейсмологии НАН КР. – 2019. – № 2 (14). – С. 41–67.
- Мячкин В.И., Костров Б.В., Соболев Г.А., Шамина О.Г. Основы физики очага, и предвестники землетрясений // Физика очага землетрясения. – М.: Наука, 1975. – С. 6–29.
- Омуралиев М. Динамика сегментации активного разлома и развития очага землетрясения // Вестник Института сейсмологии НАН КР. – 2018. – № 2 (12). – С. 63–79.
- Омуралиев М. О роли термоакустического и массопереноса акустического эффектов в геологических процессах литосферы // Известия АН Кирг. ССР. – 1987. – № 4. – С. 44–49.
- Омуралиев М. Спектры объёмных сейсмических волн в ближней зоне и динамические параметры очага землетрясения Тянь-Шаня по широкополосным записям станций сейсмологической сети KNET // Наука и новые технологии. – 1998. – № 4. – С. 44–50.
- Омуралиев М., Омуралиева А. Сейсмическое излучение в близких зонах от землетрясений по данным локальной сети сейсмических станций // Известия НАН КР. – 2006. – № 1. – С. 34–43.
- Омуралиева А., Омуралиев М. Вероятные участки проявления флюидов и частичного плавления в земной коре центральной части Тянь-Шаня по данным сетей «GHENGIS» и «KNET» // Современные проблемы геодинамики и геоэкологии внутриконтинентальных орогенов. Материалы V Международного симпозиума. – Бишкек: НС РАН, 2011. – С. 73–76.
- Омуралиева А., Омуралиев М. Динамика сейсмических процессов на сопряжении областей горообразования Памира и Тянь-Шаня: Заалайского поднятия и Алайской впадины // Вестник Института сейсмологии НАН КР. – 2018а. – № 1 (11). – С. 57–78.

- Омуралиева А., Омуралиев М. Динамика сейсмичности северной части Ферганской впадины, Кураминского и Чаткальского поднятий Тянь-Шаня // Вестник Института сейсмологии НАН КР. – 2018б. – № 2 (12). – С. 53–62.
- Омуралиева А., Омуралиев М. Динамика сейсмичности Тянь-Шаня // Вестник Института сейсмологии НАН КР. – 2015. – № 5 (15). – С. 102–112.
- Раутиан Т.Г., Халтурин В.И., Кунакова О.К. Очаговые спектры и параметры землетрясений Средней Азии, Копетдага, Северного Тянь-Шаня и сопредельных территорий // Землетрясения в СССР в 1990 году. – М.: ОИФЗ РАН, 1996. – С. 123–126.
- Ризниченко Ю.В. Методы массового определения координат очагов близких землетрясений и скоростей сейсмических волн в области расположения очагов // Известия АН СССР. Сер. геофиз. – 1958. – № 9. – С. 425–427.
- Сабитова Т.М. Годографы сейсмических волн для Северной Киргизии и их интерпретация // Известия АН Кирг. ССР. – 1976. – № 3. – С. 10–16.
- Садовский М.А., Болховитдинов Л.Г., Писаренко В.Ф. Деформирование геофизической среды и сейсмический процесс. – М.: Наука, 1987. – 100 с.
- Соболев К.А., Завьялов А.Д. О концентрационном критерии сейсмогенных разрывов // Доклады АН СССР. – 1980. – Т. 252, № 1. – С. 69–71.
- Юдахин Ф.Н. Геофизические поля, глубинное строение и сейсмичность Тянь-Шаня. – Фрунзе: Илим, 1983. – 248 с.
- Aki K. Generation and propagation of G waves from the Niigata earthquake of June 16, 1964, Part II, Estimation of earthquake moment, released energy, and stress-strain drop from the G wave spectrum // Bulletin of the Earthquake Research Institute, University of Tokyo. – 1966. – V. 44, N 1. – P. 73–88.
- Aki K. Scaling law of seismic spectrum // Journal of Geophysical Research. – 1967. – V. 72. – P. 1217–1231.
- Anderson L.D., Whitcomb J.H. The dilatancy-diffusion model of earthquake prediction // Proceedings of the Tectonic earthquakes of the San Andreas Fault Conference. – CA: Stanford University Publ. Geol. Sci. – 1973. – V. 13. – P. 417–426.
- Bath M. Spectral analysis in geophysics // Developments in Solid Earth Geophysics Series. V. 7. – Amsterdam: Elsevier Sci., 1974. – 580 p.
- Benioff H., Press F., Smith S.W. Excitation of the free oscillations of the earth by earthquakes // Journal of Geophysical Research. – 1961. – V. 66. – P. 605–618.
- Brune J.N. Tectonic stress and spectra of seismic shear waves earthquakes // Journal of Geophysical Research. – 1970. – V. 75. – P. 4997–5009.
- Gutenberg B., Richter C.F. Earthquake magnitude, intensity, energy and acceleration // Bulletin of the Seismological Society of America. – 1956. – V. 46. – P. 105–145.
- Kanamori H. The energy release in great earthquakes // Journal of Geophysical Research. – 1977. – V. 82. – P. 2981–2987.
- Kawasumi H. An historical sketch of the development of knowledge concerning the initial motion of an earthquake // Publications du Bureau Central Séismologique International. – 1937. – A15. – P. 258–330.
- Love A.E.H. Treatise on the mathematical theory of elasticity. – New York: Dover Publications, 1944. – 643 p.
- Nakajima J., Matsuzawa T., Hasegawa A., Zhao D. Three-dimensional structure of VP, VS and VP/VS beneath Northeastern Japan: Implications for arc magmatism and fluids // Journal of Geophysical Research. – 2001. – V. 106. – P. 21843–21857.
- Nakano H. Notes of the nature of the forces which give rise to the earthquake motions // The Seismological Bulletin of Japan. Central Meteorological Observatory. – 1923. – V. 1. – P. 92–120.
- Omuraliev M. Tectonophysical properties and relation of seismic moment and seismic energy of the Tien Shan, Pamir and Gindikush earthquakes // Science and New Technology. – 1999. – N 1. – P. 75–77.
- Omuraliev M., Omuralieva A. Late Cenozoic tectonics of the Tien Shan. – Bishkek: Ilim, 2004. – 166 p.
- Reid H.F. The elastic-rebound theory of earthquakes // University of California Publ. Geol. Sci. – 1911. – V. 6. – P. 413–444.
- Richter C.F. An instrumental earthquake magnitude scale // Bulletin of the Seismological Society of America. – 1935. – V. 25. – P. 155–163.
- Richter C.F. Elementary Seismology. – San Francisco: W.H. Freeman and Company, 1958. – 768 p.
- Scholz C.H., Sykes L.R., Aggarwal J.P. Earthquake prediction: A physical basis // Science. – 1973. – V. 181. – P. 803–810.

### Сведения об авторах

**Мамбетсадыкова Акжолтой Акылбековна**, аспирант, науч. сотр. Института сейсмологии Национальной академии наук Кыргызской Республики (ИС НАН КР), г. Бишкек, Кыргызстан. E-mail: akuly55@mail.ru

**Омуралиев Медербек**, канд. геол.-мин. наук, вед. науч. сотр. ИС НАН КР, г. Бишкек, Кыргызстан. E-mail: mederbek@mail.ru

## Monitoring of seismic processes and physical parameters of earthquake focuses in the Northern Tien Shan

© 2020 A.A. Mambetsadykova, M. Omuraliev

IS NAS KR, Bishkek, Kyrgyz Republic

**Abstract** Monitoring of seismic processes and physical parameters of the focus of nearby earthquakes for 2019 was carried out within the territory  $\varphi=41.5-43.5^{\circ}\text{N}$ ,  $l=72.0-80.0^{\circ}\text{E}$  Northern Tien Shan at the junction of the Tien Shan mountain building area and the Kazakhstan shield based on data from digital seismic stations of the KNET and KRNET networks. At the same time, the velocities of seismic waves  $V_p$ ,  $V_s$ ,  $V_p/V_s$ , Poisson's ratio, seismic parameter B and compression modulus K, shear modulus  $\mu$ ,  $M_0/\mu$  ratios of the seismic moment and shear modulus, focus types: with the manifestation of fluids, with the manifestation partial melting, with the manifestation of high pressures in the sequence of earthquake manifestations. It is noted that seismic processes are cyclical.

**Keywords** Earthquake, focus, seismic waves, wave velocity, Poisson's ratio, seismic parameter, compression modulus, shear modulus, fluids, partial melting, high pressure.

**For citation** Mambetsadykova, A.A., & Omuraliev, M. (2020). [Monitoring of seismic processes and physical parameters of earthquake focuses in the Northern Tien Shan]. *Rossiiskii seismologicheskii zhurnal* [Russian Journal of Seismology], 2(3), 97-108. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.35540/2686-7907.2020.3.09>

### References

- Abdrakhmatov, K.E., Omuraliev, M., & Omuralieva, A. (2015). *Raspredelenie fluidov, temperatury v zonakh Tsentral'nogo Tian'-Shania i podgotovka sil'nykh zemletriasenii* [Distribution of fluids, temperatures in The Central Tien Shan zones and preparation of strong earthquakes]. Bishkek, Kyrgyzstan: Triada Print Publ., 206 p. (In Russ.).
- Aki, K. (1966). Generation and propagation of G waves from the Niigata earthquake of June 16, 1964, Part II, Estimation of earthquake moment, released energy, and stress-strain drop from the G wave spectrum. *Bulletin of the Earthquake Research Institute, University of Tokyo*, 44(1), 73-88.
- Aki, K. (1967). Scaling law of seismic spectrum. *Journal of Geophysical Research*, 72, 1217-1231.
- Anderson, L.D., & Whitcomb, J.H. (1973). The dilatancy-diffusion model of earthquake prediction. In *Proceedings of the Tectonic earthquakes of the San Andreas Fault Conference*, 13, 417. Stanford University Publ. Geol. Sci.
- Bth, B. M. (1974). *Spectral analysis in geophysics*. Amsterdam, Netherlands: Elsevier Sci., 1974, 580 p.
- Benioff, H., Press, F., & Smith, S.W. (1961). Excitation of the free oscillations of the earth by earthquakes. *Journal of Geophysical Research*, 66, 605-618.
- Brune, J.N. (1970). Tectonic stress and spectra of seismic shear waves earthquakes. *Journal of Geophysical Research*, 75, 4997-5009.
- Dzhanuzakov, K.D., Omuraliev, M., Omuralieva, A., Il'iasov, B.I., & Grebennikova, V.V. (2003). *Sil'nye zemletriaseniia Tian'-Shania* [Strong earthquakes of the Tien Shan]. Bishkek, Kyrgyzstan: Ilim Publ., 216 p. (In Russ.).
- Grin, T.P., & Kal'met'eva, Z.A. (1976). [Definition of high-speed sections and depths of earthquakes in detailed seismological observations]. In *Geologo-geofizicheskaia kharakteristika seismogennykh zon Kirgizii* [Geological and geophysical characteristics of seismogenic zones of Kyrgyzstan] (pp. 13-31). Frunze, Kyrgyzstan: Ilim Publ. (In Russ.).
- Gutenberg, B., & Richter, C.F. (1956). Earthquake magnitude, intensity, energy and acceleration. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 46, 105-145.
- Kanamori, H. (1977). The energy release in great earthquakes. *Journal of Geophysical Research*, 82, 2981-2987.
- Kasakhara, K. (1985). *Mekhanika zemletriasenii* [The mechanics of earthquakes]. Moscow, Russia: Mir Publ., 264 p. (In Russ.).
- Kawasumi, H. (1937). An historical sketch of the development of knowledge concerning the initial motion of an earthquake. *Publications du Bureau Central Séismologique International*, A15, 258-330.
- Love, A.E.H. (1944). *Treatise on the mathematical theory of elasticity*. New York, USA: Dover Publ., 643 p.
- Mambetsadykova, A.A., Omuralieva, A.M., & Omuraliev, M. (2019). [Characteristics of seismic waves and state of the earthquake focuses in the Northern Tien Shan]. *Vestnik Instituta seismologii NAN KR* [Bulletin of the Institute of Seismology of the NAS of the Kyrgyz Republic], 2(14), 41-67. (In Russ.).
- Miachkin, V.I., Kostrov, B.V., Sobolev, G.A., & Shamina, O.G. (1975). [The basics of physics source and earth-

- quake precursors]. In *Fizika ochaga zemletriaseniia* [Earthquake Focal Physics] (pp. 6-29). Moscow, Russia: Nauka Publ. (In Russ.).
- Nakajima, J., Matsuzawa, T., Hasegawa, A., & Zhao, D. (2001). Three-dimensional structure of Vp, Vs and Vp/Vs beneath northeastern Japan: Implications for arc magmatism and fluids. *Journal of Geophysical Research*, 106, 21843-21857.
- Nakano, H. (1923). Notes of the nature of the forces which give rise to the earthquake motions. *The Seismological Bulletin of Japan. Central Meteorological Observatory*, 1, 92-120.
- Omuraliev, M. (1987). [On the role of thermoacoustic and mass transfer of acoustic effects in the geological processes of the lithosphere]. *Izvestiia AN Kirg. SSR [Izvestiya AS Kirg. SSR]*, 4, 44-49. (In Russ.).
- Omuraliev, M. (1998). [Spectra of bulk seismic waves in the near zone and dynamic parameters of the Tian Shan earthquake center based on broadband recordings of stations of the seismological network KNET]. *Nauka i novye tekhnologii [Science and New Technologies]*, 4, 44-50. (In Russ.).
- Omuraliev, M. (1999). Tectonophysical properties and relation of seismic moment and seismic energy of the Tien Shan, Pamir and Gindikush earthquakes. *Science and New Technology*, 1, 75-77.
- Omuraliev, M. (2018). [Dynamics of the active faults segmentation and earthquake focus development]. *Vestnik Instituta seismologii NAN KR [Bulletin of the Institute of Seismology of the NAS of the Kyrgyz Republic]*, 2(12), 63-79. (In Russ.).
- Omuraliev, M., & Omuralieva, A. (2004). *Late Cenozoic tectonics of the Tien Shan*. Bishkek, Kyrgyzstan: Ilim Publ., 166 p.
- Omuraliev, M., & Omuralieva, A. (2006). [Seismic radiation in close zones from earthquakes according to the local network of seismic stations]. *Izvestiia NAN KR [Izvestiya NAS KR]*, 1, 34-43. (In Russ.).
- Omuralieva, A., & Omuraliev, M. (2011). [Probable areas of fluid manifestation and partial melting in the earth's crust of the central part of the Tien Shan according to the GHENGIS and KNET networks]. In *Sovremennye problemy geodinamiki i geojekologii vnutrikontinental'nyh orogenov. Materialy V Mezhdunarodnogo simpoziuma* [Modern problems of geodynamics and geocology of intracontinental orogens. Materials of the V International Symposium] (pp. 73-76). Bishkek, Kyrgyzstan: SS RAS Publ. (In Russ.).
- Omuralieva, A., & Omuraliev, M. (2015). [The dynamics of seismicity of the Tien Shan]. *Vestnik Instituta seismologii NAN KR [Bulletin of the Institute of Seismology of the NAS of the Kyrgyz Republic]*, 5, 102-112. (In Russ.).
- Omuralieva, A., & Omuraliev, M. (2018a). [Dynamics of seismic processes at the junction of the Pamir and Tien Shan mountain building areas: the Zaalai range and the Alai basin]. *Vestnik Instituta seismologii NAN KR [Bulletin of the Institute of Seismology of the NAS of the Kyrgyz Republic]*, 1(11), 57-78. (In Russ.).
- Omuralieva, A., & Omuraliev, M. (2018b). [Seismicity dynamics of the northern part of the Ferghana Depression, the Kurama range and Chatkal range, Tien Shan]. *Vestnik Instituta seismologii NAN KR [Bulletin of the Institute of Seismology of the NAS of the Kyrgyz Republic]*, 2(12), 53-62. (In Russ.).
- Rautian, T.G., Khalturin, V.I., & Kunakova, O.K. (1990). [Focal spectra and parameters of earthquakes in Central Asia, the Kopet Dagh, Severnogo Tien Shan and adjacent territories]. In *Zemletrjaseniia v SSSR v 1990 godu* [Earthquakes in the USSR in 1990] (pp. 123-126). Moscow, Russia: UIPE RAS Publ. (In Russ.).
- Reid, H.F. (1911). The elastic-rebound theory of earthquakes. *University of California Publ. Geol. Sci.*, 6, 413-444.
- Richter, C.F. (1935). An instrumental earthquake magnitude scale. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 25, 155-163.
- Richter, C.F. (1958). *Elementary Seismology*. San Francisco, USA: W.H. Freeman and Company Publ., 768 p.
- Riznichenko, Yu.V. (1958). [Methods for mass determining the coordinates of foci of nearby earthquakes and the velocities of seismic waves in the area of the foci]. *Izvestiia akademii nauk SSSR. Seriya Geofizika [Bulletin of the Academy of Sciences of the USSR. Geophysics Series]*, 9, 425-427.
- Sabitova, T.M. (1976). [Seismic wave hodographs for Northern Kyrgyzstan and their interpretation]. *Izvestiia akademii nauk Kirgizskoi SSR [Izvestiya AS Kirg. SSR]*, 3, 10-16 (In Russ.).
- Sadovskii, M.A., Bolkhovitinov, L.G., & Pisarenko, V.F. (1987). Deformirovanie geofizicheskoi sredy i seismicheskii protsess [Deformation of the geophysical environment and the seismic process]. Moscow, Russia: Nauka Publ., 100 p. (In Russ.).
- Scholz, C.H., Sykes, L.R., & Aggarwal, J.P. (1973). Earthquake prediction: A physical basis. *Science*, 181, 803-810.
- Sobolev, K.A., & Zav'ialov, A.D. (1980). [On the concentration criterion of seismogenic discontinuities]. *Doklady akademii nauk SSSR [Doklady of the Academy of Sciences of the USSR]*, 252(1), 69-71. (In Russ.).
- Yudakhin, F.N. (1983). *Geofizicheskie polia, glubinnoe stroenie i seismichnost' Tian'-Shania* [The geophysical fields, deep structure and seismicity of the Tien Shan]. Frunze, Kyrgyzstan: Ilim Publ., 248 p. (In Russ.).

### Information about authors

**Mambetsadykova Akzholtai Akylbekovna**, Graduate Student, Researcher of the Institute of Seismology of the National Academy of Sciences of the Kyrgyz Republic (IS NAS KR), Bishkek, Kyrgyz Republic. E-mail: akuly55@mail.ru

**Omuraliev Mederbek**, PhD, Leading Researcher of the IS NAS KR, Bishkek, Kyrgyz Republic. E-mail: mederbek@mail.ru