

УДК 550.34

Изучение ежедневных промышленных взрывов на месторождении «Кумтор» в 2020–2021 гг.

© 2024 г. К. Омурбек кызы, М. Омуралиев, А. Омуралиева, К.Е. Абдрахматов

ИС НАН КР, г. Бишкек, Кыргызстан

Поступила в редакцию 09.09.2022 г.

Аннотация. В результате определения скоростей сейсмических волн промышленных взрывов в Центральном карьере в 2020–2021 гг. по данным цифровых станций «Тарагай» (TARG), «Каджи-Сай» (KDJ) и «Каракол» (PRZ) отмечена временная изменчивость скоростных свойств участка литосферы Тянь-Шаня в пределах координат $\varphi=41.47\text{--}41.52^\circ\text{N}$, $\lambda=78.10\text{--}78.16^\circ\text{E}$. Значения V_p изменяются от 5.6 до 7.6 км/с, V_s – от 3.3 до 4.3 км/с, V_p/V_s – от 1.59 до 1.82, которые отличаются от значений скоростей, зафиксированных в 2017–2018 гг. В последовательности проявления скоростей сейсмических волн взрывов отмечены поэтапно интервалы с различными коэффициентами роста и спада значений. Эти интервалы последовательности скоростей являются нелинейными «ритмическими составляющими» – циклами разных порядков. Циклы изменения значений скоростей продольных волн V_p , например, третьего порядка определяются при значении $V_p \geq 6.9$ км/с на основе поэтапной оценки полиномиальных трендов изменения V_p . Длительность периода циклов третьего порядка составляет 28–117 сут., циклов второго порядка – около 154 суток. В последовательности V_s определяются циклы, например, третьего порядка при значении $V_s \geq 3.9$ км/с на основе поэтапной оценки полиномиальных трендов изменения V_s . Длительность периода циклов третьего порядка составляет 28 – 117 сут., циклов второго порядка – более 117 сут. На вариации V_p/V_s определяются циклы, например, третьего порядка при значении $V_p/V_s \geq 1.75$ на основе поэтапной оценки полиномиальных трендов изменения V_p/V_s . Длительность периода циклов третьего порядка составляет 9–65 сут., циклов второго порядка – около 67–95 сут. На основании широко известных в сейсмологии соотношений скорости продольных волн, скорости поперечных волн, модуля сжатия, модуля сдвига, плотности среды предполагается, что изменения скоростных свойств участка литосферы, вероятно, связаны с изменениями модулей упругости среды. Так, значения модуля сдвига на рассматриваемой территории изменяются от $3.1 \cdot 10^{10}$ дин/см² до $5.4 \cdot 10^{10}$ дин/см². Отмечено, что ежедневные промышленные взрывы воздействуют на среду и геодинамику участка литосферы Тянь-Шаня накоплением и закачкой сейсмической энергии и вибрации. На основании соотношения V_p , V_s , V_p/V_s промышленных взрывов показаны вероятности проявления флюидов, частичного плавления и высоких давлений на изучаемом участке образования Тянь-Шаня.

Ключевые слова: карьерный взрыв, продольная волна, поперечная волна, скорость сейсмических волн, цикл вариаций параметров сейсмических волн, иерархия циклов, проявление флюидов, частичное плавление, высокое давление.

Для цитирования: Омурбек кызы К., Омуралиев М., Омуралиева А., Абдрахматов К.Е. Изучение ежедневных промышленных взрывов на месторождении «Кумтор» в 2020–2021 гг. // Российский сейсмологический журнал. – 2024. – Т. 6, № 1. – С. 29–41. – DOI: <https://doi.org/10.35540/2686-7907.2024.1.02>. – EDN: KHPEIL

Введение

Уникальное золоторудное месторождение «Кумтор» расположено на северо-западном склоне хребта Ак-Шыйрак Центрального Тянь-Шаня на высоте 5200 м и покрыто ледниками, а также многолетними мёрзлыми породами толщиной до 250–400 м (рис. 1). Золоторудное прояв-

ление обнаружено в 1978 году. Управлением геологии Киргизской ССР до 1992 г. произведены геологоразведочные работы. В рудной зоне протяжённостью более 12 км по степени золоторудной минерализации выделяются участки: Центральный, Юго-Западный, Сары-Тор, Северо-Восточный, Акбель, Муздусу и Борду [Рид и др., 2015]. Данный район характеризуется наличием



Рис. 1. Снимок Центрального карьера месторождения «Кумтор» на северо-западном склоне хребта Ак-Шыйрак (<http://www.tazabek.kg/news:1795931?from=tazabek&place=mainlast>)

нескольких крупных надвиговых зон разломов, простирающихся в северо-восточном направлении и имеющих юго-восточное падение под меняющимися углами. Рудное тело преимущественно состоит из метасоматитов вендского возраста (поздний протерозой или ранний палеозой). Из данной системы зон разломов особо выделяется Кумторский разлом с юго-восточным азимутом падения взбросо-надвигового типа, ограничивающий рудную зону с севера. Мощность зоны этого разлома достигает нескольких сотен метров. По этому разлому известняки и филлиты кембрийского возраста надвинуты на красноцветные породы третичного периода.

С 1996 г. компанией «Центерра Голд Инк» ведётся разработка месторождения открытым способом преимущественно на Центральном участке. Взрывы на карьере проводятся в основном короткозамедленным способом.

Временная изменчивость скоростных свойств литосферы Тянь-Шаня изучена по данным ядерных взрывов на Семипалатинском полигоне, а также крупномасштабного Камбаратинского взрыва, зарегистрированных, в частности, сетью сейсмических станций Кыргызстана [Адушкин и др., 2001; Гамбурцева и др., 1982; Гамбурцева, 2006; Меджитова, 2006]. По данным ядерных взрывов на Семипалатинском полигоне отмечены ритмы 1.3 года, 2 года и 4–6 лет. При изучении Агалатасских карьерных взрывов (на южном склоне Киндыктасского хребта), произведённых через сутки и более, анализировалось изменение амплитуд продольных и поперечных волн (A_p , A_s ,

A_s/A_p) по направлениям к сейсмическим станциям «Ананьево», «Боом», «Карагай-Булак», «Ала-Арча» и другим [Омуралиев, 2006; Омуралиева, Омуралиев, 2012]. Отмечено, что графики изменения амплитуд имеют колебательный характер. Они рассмотрены с точки зрения тепло-массопереноса при акустическом воздействии в геодинамических процессах литосферы [Омуралиев, 1987]. Выделены определённые «гармоники» со собственными периодами, амплитудами и фазами. Изучены сейсмические волны ряда Кумторских взрывов за 2012 г. [Омуралиев и др., 2016] и за 2017–2018 гг. [Омурбек к., Омуралиев, 2020].

Целью данной работы является изучение временной изменчивости скоростных свойств участка литосферы Тянь-Шаня по ежедневным взрывам Центрального карьера Кумторского месторождения на основе записей сети близких цифровых сейсмических станций. Анализ особенностей изменения скоростей сейсмических продольных и поперечных волн в связи с геодинамическими процессами активной области горообразования Тянь-Шаня [Мамбетсадыкова, Омуралиев, 2020] и промышленными взрывами является актуальным.

Методика и фактический материал

По данным цифровых сейсмических станций сетей KRNET (Kyrgyzstan Telemetered Network) и KNET (Kyrgyz Republic Digital Network), а также станции «Тарагай» (TARG) Центрально-Азиатского института прикладных исследований Земли (ЦАИИЗ), в Центре обработки данных

ИС НАН КР определяются основные параметры сейсмических волн. Параметры продольной волны изучались по записи вертикальной компоненты (Z-канал), а параметры поперечной волны – по записи одной из компонент с наилучшим соотношением «сигнал/шум». Оценивались значения rms – среднеквадратическое отклонение времён пробега наблюдаемых и вычисленных (погрешность), se – стандартное отклонение от времени вступления, d – класс точности определения эпицентра.

По параметрам сейсмических волн Центром обработки данных ИС НАН КР дифференцировались (разделялись) землетрясения и взрывы. В связи с тем, что в нашем распоряжении не было сведений от взрывников и данных локальной сети мониторинга на самом карьере, координаты, время и энергия взрывов определялись с известной точностью на основе данных сети сейсмических станций в окружении месторождения «Кумтор». В непосредственном окружении месторождения «Кумтор» находились цифровые станции: «Тарагай» (TARG) – на юго-западе, «Каджи-Сай» (KDJ) – на северо-западе, «Каракол» (PRZ) – на северо-востоке (рис. 2).

В районах этих станций горные массивы сложены в основном гранитоидами, метаморфическими породами. В связи с этим можно сказать,

что скоростные модели участков земной коры в районах рассматриваемых станций были близкими. Для проведения исследования выбраны только взрывы в пределах координат $\varphi=41.79–41.87^\circ\text{N}$, $\lambda=78.17–78.28^\circ\text{E}$ на локальном участке основного Центрального карьера, например, за 2020–2021 гг., при этом $d=1$, $rms=0.1$, $se=0.1$, $sez=0.3–2.0$. Энергия взрывов имела значения от 10^5 до 10^6 Дж, а магнитуда $MPV=1.6–2.8$.

Скорости сейсмических продольных и поперечных волн (V_p , V_s , V_p/V_s) определялись составлением серии годографов для каждого взрыва на основе записей (на выбранных компонентах) трёх станций в окружении Кумторского месторождения, где строение геолого-геофизической среды близкое: $d=1$, $rms=0.1$. Годографы имели достаточную точность, достоверность аппроксимации составляла около $R^2=0.99$.

Результаты исследования и их обсуждение

Результаты определения скоростей сейсмических волн взрывов (около 443) Центрального карьера Кумторского месторождения за 2020–2021 гг. по записям цифровых станций «Тарагай», «Каджи-Сай» и «Каракол» на эпицентральной расстоянии до 96 км приведены в виде каталога взрывов. На рис. 3–5 показаны

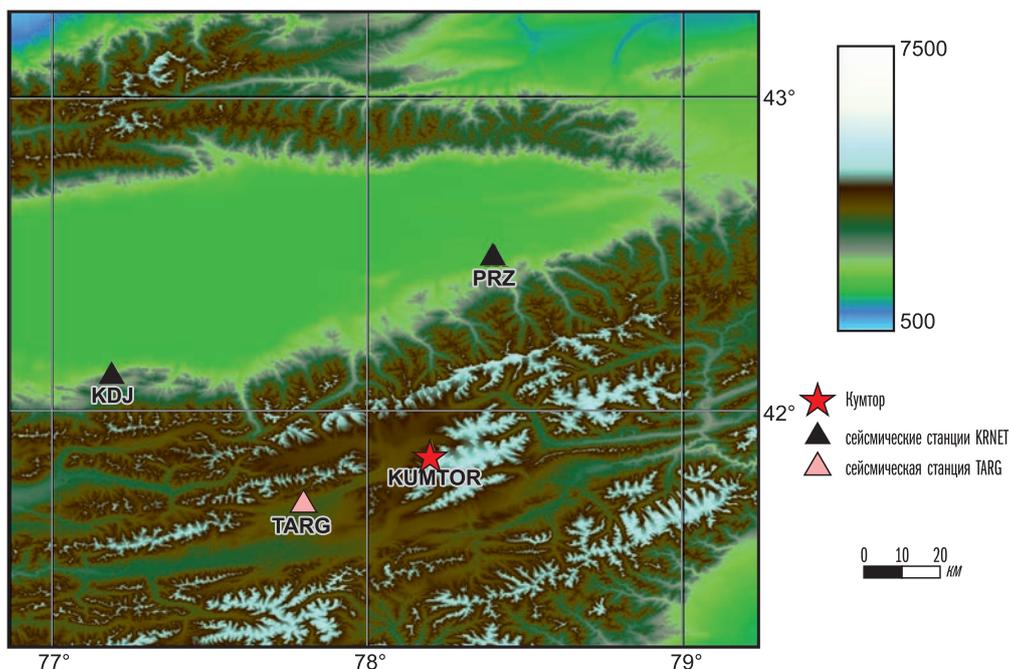


Рис. 2. Схема расположения цифровых сейсмических станций.

Треугольниками обозначены сейсмические станции (KDJ – «Каджи-Сай», PRZ – «Каракол» сети KRNET, TARG – «Тарагай» сети ЦАИИЗ), звездочкой – карьер «Центральный» месторождения «Кумтор»

распределения во времени значений скоростей продольных волн V_p , поперечных волн V_s , параметра V_p/V_s . Значения V_p изменяются от 5.6 до 7.6 км/сек. Для сравнения значения V_p изменялись от 5.2 до 7.4 км/с в 2017–2018 гг. [Омурбек к., Омуралиев, 2020]. Распределение V_p имеет незначительную растущую тенденцию (рис. 3) и выражается формулой:

$$V_p = 0.0007 \cdot T + 6.1287, \quad (1)$$

где T – время, сутки.

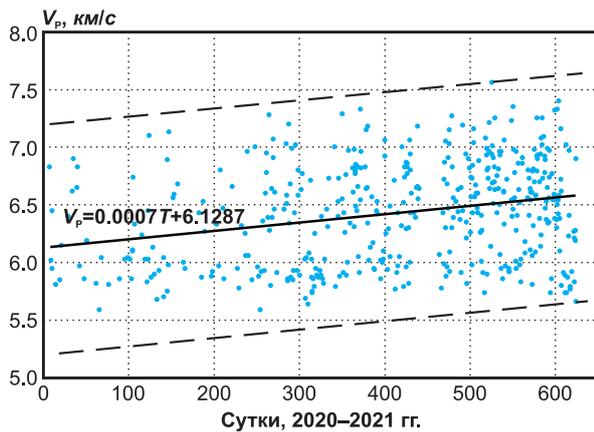


Рис. 3. Распределение значений V_p (км/с) во времени.

Сплошной линией обозначен тренд, пунктирными линиями – верхний и нижний пределы флуктуации

Значения V_s изменяются от 3.3 до 4.3 км/с. Для сравнения значения V_s изменялись от 2.9 до 4.1 км/с в 2017–2018 гг. [Омурбек к., Омуралиев, 2020]. На распределении V_s во времени отмечается незначительная растущая тенденция (рис. 4), которая выражается формулой:

$$V_s = 0.0003 \cdot T + 3.5866, \quad (2)$$

где T – время, сутки.

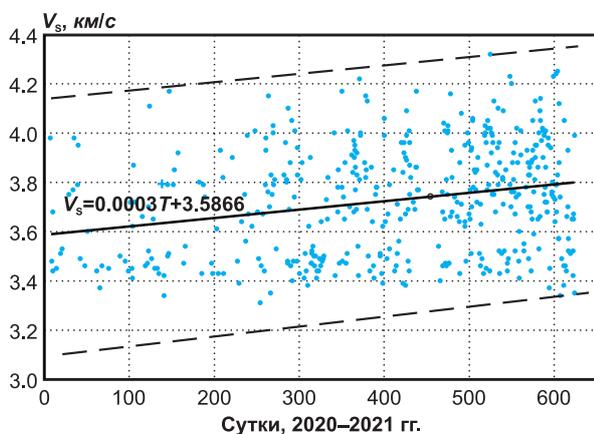


Рис. 4. Распределение значений V_s (км/с) во времени.

Сплошной линией обозначен тренд, пунктирными линиями – верхний и нижний пределы флуктуации

Значения V_p/V_s изменяются от 1.59 до 1.82. Для сравнения значения V_p/V_s изменялись от 1.61 до 1.94 в 2017–2018 гг. [Омурбек к., Омуралиев, 2020]. На распределении V_p/V_s во времени отмечается незначительная растущая тенденция (рис. 5), которая выражается формулой:

$$V_p/V_s = 0.00003 \cdot T + 1.7064, \quad (3)$$

где T – время, сутки.

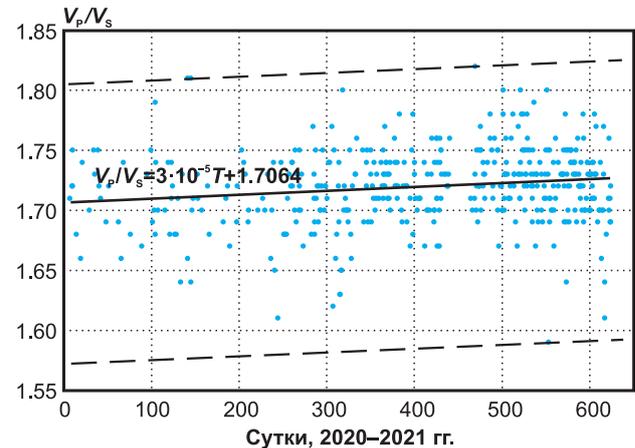


Рис. 5. Распределение значений V_p/V_s во времени.

Сплошной линией обозначен тренд, пунктирными линиями – верхний и нижний пределы флуктуации

Следует отметить, что изменения значений V_p , V_s и V_p/V_s имеют определённую повторяемость, которая отражена на гистограммах (столбчатая диаграмма, которая показывает частоту повторяемости значений), приведённые на рис. 6–8.

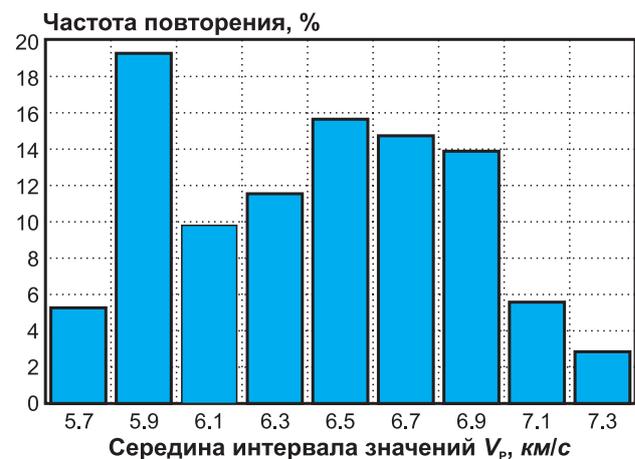


Рис. 6. Гистограмма частоты повторения значений скорости продольных волн V_p взрывов за 2020–2021 гг. в интервалах: 5.6–5.8, 5.8–6.0, 6.0–6.2, 6.2–6.4, 6.4–6.6, 6.6–6.8, 6.8–7.0, 7.0–7.2, 7.2–7.4 км/с

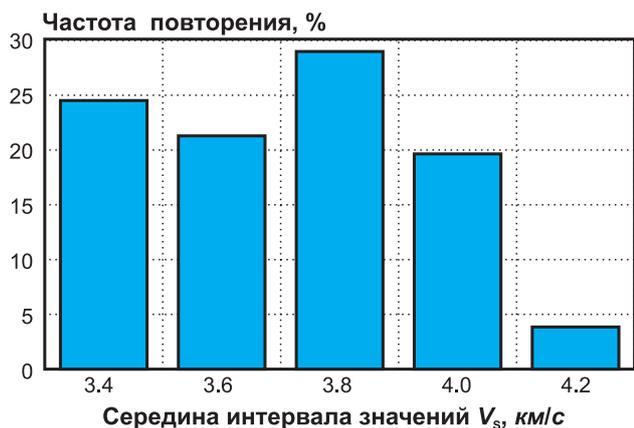


Рис. 7. Гистограмма частоты повторения значений скорости поперечных волн V_s взрывов за 2020–2021 гг. в интервалах: 3.3–3.5, 3.5–3.7, 3.7–3.9, 3.9–4.1, 4.1–4.3 км/с



Рис. 8. Гистограмма частоты повторения значений V_p/V_s взрывов за 2020–2021 гг. в интервалах: 1.59–1.62, 1.62–1.65, 1.65–1.68, 1.68–1.71, 1.71–1.74, 1.74–1.77, 1.77–1.80, 1.80–1.82

Важно рассмотреть последовательности проявления значений скоростей сейсмических волн V_p , V_s , V_p/V_s взрывов, которые имеют колебательный характер. Вслед за В.В. Адушкиным, И.Г. Гамбурцевой и З.А. Меджитовой, М. Омуралиевым изучались периодические вариации параметров сейсмических волн и временная изменчивость скоростных свойств среды. Гармонический и вейвлет-анализы последовательности проявления значений скоростей сейсмических волн показали сложный ряд гармоник [Омуралиев и др., 2013]. Нами выбран другой подход, а именно: поэтапно выделялся интервал роста значений скорости, пик (максимум), интервал спада значений скорости и определялся цикл. В связи с тем, что коэффициенты (отношение значений) роста и спада скоростей в этих

интервалах были разными, цикл выделялся на основе полиномиальных трендов. Сначала определялись циклы относительно коротких периодов, например, третьего порядка. По пикам циклов третьего порядка выделялись циклы второго порядка на основе полиномиального тренда. Далее по пикам циклов второго порядка аналогично предыдущей методике отмечался цикл первого порядка.

На рис. 9 приведена последовательность проявления скоростей продольных волн взрывов. При значении $V_p \geq 6.9$ км/с отмечены циклы третьего порядка. Длительность периода составляла 28–117 суток. По пикам циклов третьего порядка при значении $V_p \geq 7.3$ км/с на основе оценки полиномиальных трендов выделялись циклы второго порядка с длительностью – около 154 сут.). Соответственно, на графике вариации V_p отмечается иерархия циклов («ритмические составляющие»).

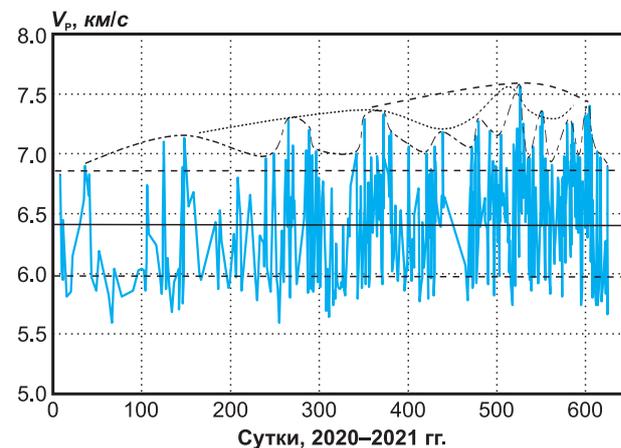


Рис. 9. Последовательность скорости продольных сейсмических волн V_p взрывов Центрального карьера Кумторского месторождения за 2020–2021 гг.

Штрихпунктирной кривой линией обозначен цикл вариации третьего порядка; точечной кривой линией – цикл вариации второго порядка; пунктирной кривой линией – цикл вариации первого порядка

На рис. 10 приведена последовательность скорости поперечной волны V_s взрывов (около 443) Центрального карьера Кумторского месторождения на отдельно взятом определённом участке Тянь-Шаня. Значения V_s изменялись от 3.3 до 4.3 км/с. На графике вариации V_s отмечается иерархия циклов. Сначала определяются циклы, в частности, третьего порядка при значении $V_s \geq 3.9$ км/с на основе поэтапной оценки полиномиальных трендов. По пикам циклов третьего порядка при значении $V_s \geq 4.3$ км/с выделяются

циклы второго порядка на основе полиномиального тренда. Далее по пикам циклов второго порядка при значении $V_s \geq 4.4$ км/с аналогично предыдущей методике отмечается цикл первого порядка. Длительность периода циклов третьего порядка составляет 28–117 сут., циклов второго порядка – более 117 суток.

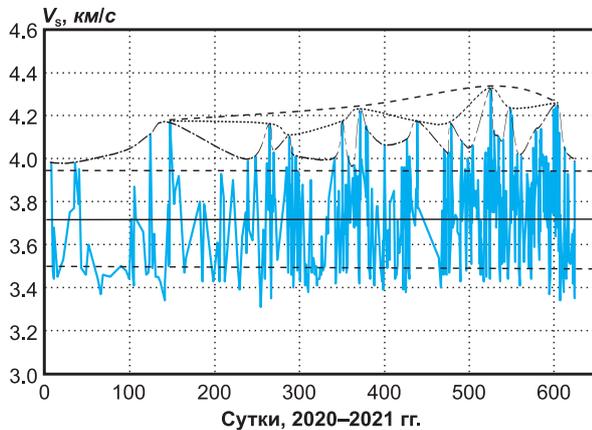


Рис. 10. Последовательность скорости поперечных сейсмических волн V_s взрывов Центрального карьера Кумторского месторождения за 2020–2021 гг.

Условные обозначения см. на рис. 9

Результаты значения отношения V_p/V_s скоростей продольных и поперечных волн взрывов (около 443) Центрального карьера Кумторского месторождения за 2020–2021 гг. приведены на рис. 11. На графике вариации V_p/V_s отмечается иерархия циклов. Сначала определяются циклы, в частности, третьего порядка при значении $V_p/V_s \geq 1.75$ на основе поэтапной оценки полиномиальных трендов. По пикам циклов третьего порядка при значении $V_p/V_s \geq 1.77$ выделяются циклы второго порядка на основе полиномиального тренда. Далее по пикам циклов второго порядка при значении $V_p/V_s \geq 1.8$ аналогично предыдущей методике отмечается цикл первого порядка. Пик цикла первого порядка проявился 14 мая 2021 г. (на 469.3 сутки от 01.01.2020 г. – 2021 г.), и значение V_p/V_s составило около 1.82.

В связи с известными в сейсмологии соотношениями:

$$V_p = ((K + 4/3\mu)/\rho)^{1/2}, \quad (4)$$

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

и сейсмическим параметром (Φ) Адамса-Вильямсона, который равен отношению модуля сжатия к плотности и используется для определения детального хода плотности в недрах Земли [Adams, Williamson, 1923]:

$$\Phi = K/\rho, \quad (6)$$

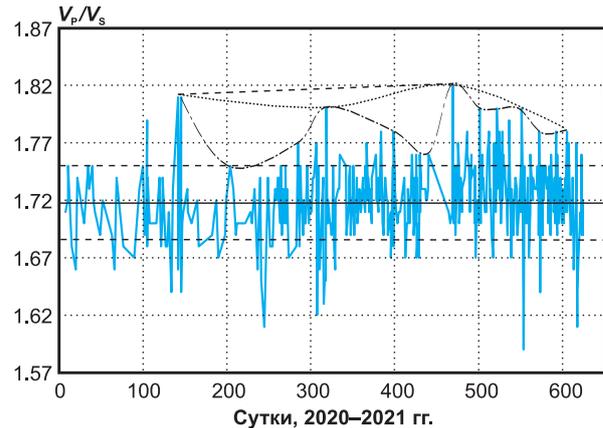


Рис. 11. Вариация отношения V_p/V_s скорости продольных и поперечных сейсмических волн взрывов Центрального карьера Кумторского месторождения за 2020–2021 гг.

Условные обозначения см. на рис. 9

где V_p – скорость продольных волн, V_s – скорость поперечных волн, K – модуль сжатия, μ – модуль сдвига, ρ – плотность среды, можно сказать, что временная изменчивость циклов разного порядка скоростных свойств среды, вероятно, связана с изменениями модулей упругости среды. Так, горные породы месторождения «Кумтор», представленные метаморфическими породами, имеют в среднем плотность порядка $\rho = 2.9$ г/см³. Модуль сдвига μ по формуле (5) и по последовательности V_s (рис. 10) принимает значения от $3.1 \cdot 10^{10}$ до $5.4 \cdot 10^{10}$ дин/см².

Следует отметить, что ежедневные промышленные взрывы воздействуют на среду, в частности, в виде сейсмической энергии, вибрации. На рис. 12 показан нелинейный ступенчатый график суммарной сейсмической энергии, высвобожденной при взрывах в пределах карьера «Центральный» за 2020–2021 гг. На графике приближённо отмечаются три периода накопления суммарной сейсмической энергии взрывов: 0–273, 284–438, 464–624 суток. Изменение кумулятивной сейсмической энергии в первом интервале имеет вид:

$$E_k = (0.0011 \cdot t - 0.0003) \cdot 10^8, \text{ Дж}, \quad (7)$$

во втором интервале:

$$E_k = (0.0037 \cdot t - 0.7091) \cdot 10^8, \text{ Дж}, \quad (8)$$

в третьем интервале:

$$E_k = (0.006 \cdot t - 1.8941) \cdot 10^8, \text{ Дж}, \quad (9)$$

где E_k – кумулятивная сейсмическая энергия (Дж), t – сутки 2020–2021 гг., коэффициенты $0.0011 \cdot 10^8$, $0.0037 \cdot 10^8$ и $0.006 \cdot 10^8$ имеют единицу измерения Дж/сут. и представляют собой скорость накопления сейсмической энергии.

Соответственно, можно сказать, что скорость накопления (закачки) энергии взрывов в среду в районе месторождения изменялась во времени.



Рис. 12. Кумулятивная сейсмическая энергия, высвобожденная при взрывах в пределах карьера «Центральный» за 2020–2021 гг.

Соотношение величин V_p , V_s , V_p/V_s земной коры выражает особенности среды земной коры, а именно малые значения V_p , V_s , V_p/V_s выражают проявление флюидов; малые значения V_p , V_s , но большое значение V_p/V_s – частичное плавление; большие значения V_p , V_s – относительно высокие давления [Nakajima et al., 2001; Omuraliev, Omuralieva, 2004; Абдрахматов и др., 2015; Омуралиева, Омуралиев, 2011]. На рис. 13 показано соотношение величин V_p , V_s , V_p/V_s взрывов Центрального карьера Кумторского месторождения за 2020–2021 гг., при этом на графике проявления флюидов попадают в верхнюю часть первого квадранта, проявления частичного плавления – в нижнюю часть первого квадранта. Сейсмические волны, характеризующие проявления в среде высоких давлений, попадут в основном в третий квадрант.

В табл. 1. приведены примеры вероятного проявления флюидов на участке земной коры Тянь-Шаня в окружении Кумторского месторождения по данным записей трёх цифровых станций сейсмических волн взрывов Центрального карьера.

Здесь необходимо отметить включения некоторых жидкостей в минералах гранитов [Assadzadeh et al., 2016], тальк-гранит-хлоритового сланца метаморфического комплекса Кыргызского Тянь-Шаня [Yoshida et al., 2018] и т.д. При деформации горных пород, вероятно, происходит высвобождение подобных включений жидкостей и вместе с поровыми жидкостями

ми может быть создан эффект быстрых проявлений флюидов в земной коре. Следует отметить, что термоминеральные воды, широко распространённые в Тянь-Шане, представляют собой флюиды. По данным (с 1970 г.) гидрогеохимических станций сети ИС НАН КР, на термоминеральных источниках региона, например, «Джети-Огуз», «Каджи-Сай», «Кара-Ой», «Ысык-Ата», установлены суточные импульсные и широкие продолжительные аномалии флюидов: инертных и радиогенных газов, углеводородов и парообразной ртути (He, Ar, Rn, H₂, CO₂, CH₄, Hg и др.), ионно-солевого состава подземных вод (HCO₃, Cl, CO₃, SO₄, HSiO₃, F, Li, Ca²⁺, Mg²⁺, Na), химических показателей (t °C, pH, Eh) и др. [Абдрахматов и др., 2015]. Эти аномалии очевидно связаны с геодинамическими процессами земной коры и мантии дискретной области горообразования Тянь-Шаня, где имеется иерархия тектонических блоков и происходят динамическая сегментация активных разломов и динамическая секторизация активных блоков [Omuraliev, Omuralieva, 2004]. Они отмечаются на данных GPS и наклонно-деформографических измерений в реальном масштабе времени и на циклах последовательности проявления очагов землетрясений.

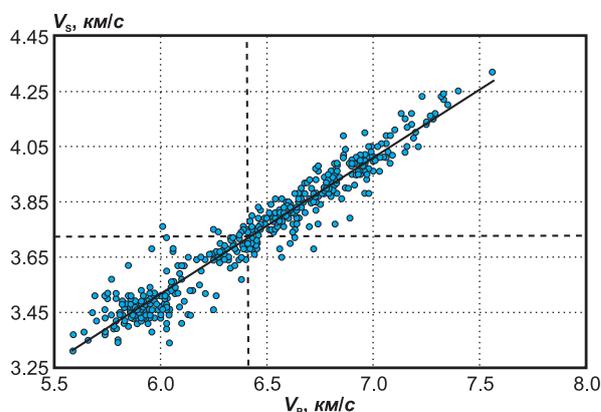


Рис. 13. Соотношение величин V_p , V_s , V_p/V_s взрывов в пределах координат $\varphi=41.79-41.87^\circ\text{N}$, $\lambda=78.17-78.28^\circ\text{E}$ Центрального карьера Кумторского месторождения.

Кружочками обозначены наблюденные значения V_p/V_s . Значение $V_p/V_s=1.71$ выделено диагональной сплошной линией. Выше этой линии выделяются параллельные линии, где кружочки имеют малые значения $V_p/V_s < 1.71$, а ниже данной линии отмечаются параллельные линии, где кружочки имеют большие значения $V_p/V_s > 1.71$. Среднее значение $V_p=6.42$ км/с обозначено вертикальной пунктирной линией. Среднее значение $V_s=3.72$ км/с обозначено горизонтальной пунктирной линией

Таблица 1. Примеры вероятного проявления флюидов на основе определения V_p , V_s , V_p/V_s земной коры с минимальной ошибкой (достоверность аппроксимации годографов $R^2 \geq 0.95$)

| Год | Ме- сяц | День | Час | Ми- нута | Се- кунда | V_p , км/с | V_s , км/с | V_p/V_s | Год | Ме- сяц | День | Час | Ми- нута | Се- кунда | V_p , км/с | V_s , км/с | V_p/V_s |
|------|------------|------|-----|-------------|--------------|-----------------|-----------------|-----------|------|------------|------|-----|-------------|--------------|-----------------|-----------------|-----------|
| 2020 | 2 | 14 | 8 | 2 | 45.60 | 5.81 | 3.45 | 1.68 | 2020 | 12 | 11 | 6 | 24 | 41.36 | 5.74 | 3.51 | 1.63 |
| 2020 | 2 | 19 | 8 | 10 | 37.54 | 5.85 | 3.51 | 1.66 | 2020 | 12 | 11 | 6 | 24 | 50.89 | 5.75 | 3.52 | 1.63 |
| 2020 | 3 | 14 | 9 | 58 | 8.30 | 5.97 | 3.49 | 1.71 | 2020 | 12 | 12 | 7 | 58 | 0.63 | 5.86 | 3.54 | 1.65 |
| 2020 | 3 | 20 | 8 | 2 | 16.88 | 5.86 | 3.46 | 1.69 | 2020 | 12 | 13 | 10 | 25 | 37.93 | 5.79 | 3.50 | 1.65 |
| 2020 | 4 | 3 | 7 | 56 | 12.26 | 5.82 | 3.44 | 1.69 | 2020 | 12 | 15 | 7 | 58 | 59.78 | 5.95 | 3.50 | 1.70 |
| 2020 | 4 | 6 | 10 | 13 | 54.07 | 5.59 | 3.37 | 1.66 | 2020 | 12 | 17 | 9 | 59 | 19.53 | 5.88 | 3.44 | 1.71 |
| 2020 | 4 | 17 | 8 | 7 | 53.96 | 5.81 | 3.45 | 1.68 | 2020 | 12 | 18 | 8 | 2 | 7.30 | 5.87 | 3.44 | 1.70 |
| 2020 | 4 | 30 | 7 | 57 | 40.37 | 5.86 | 3.50 | 1.67 | 2020 | 12 | 19 | 8 | 33 | 6.70 | 5.88 | 3.44 | 1.70 |
| 2020 | 5 | 11 | 10 | 4 | 20.97 | 6.03 | 3.72 | 1.69 | 2020 | 12 | 20 | 8 | 33 | 12.01 | 5.93 | 3.49 | 1.69 |
| 2020 | 5 | 13 | 8 | 3 | 51.19 | 5.86 | 3.45 | 1.70 | 2020 | 12 | 21 | 8 | 0 | 21.63 | 5.89 | 3.46 | 1.70 |
| 2020 | 5 | 14 | 8 | 3 | 51.92 | 6.11 | 3.62 | 1.68 | 2020 | 12 | 23 | 7 | 59 | 46.60 | 5.86 | 3.48 | 1.68 |
| 2020 | 5 | 17 | 8 | 1 | 15.45 | 6.33 | 3.72 | 1.70 | 2020 | 12 | 24 | 10 | 1 | 50.43 | 5.82 | 3.49 | 1.66 |
| 2020 | 5 | 25 | 10 | 2 | 42.21 | 6.24 | 3.66 | 1.70 | 2021 | 1 | 7 | 9 | 57 | 17.48 | 5.79 | 3.42 | 1.69 |
| 2020 | 5 | 31 | 10 | 3 | 56.27 | 5.83 | 3.47 | 1.68 | 2021 | 1 | 12 | 7 | 56 | 41.45 | 5.88 | 3.47 | 1.69 |
| 2020 | 6 | 3 | 1 | 1 | 9.08 | 6.03 | 3.52 | 1.71 | 2021 | 1 | 16 | 8 | 1 | 25.89 | 5.91 | 3.48 | 1.69 |
| 2020 | 6 | 6 | 10 | 2 | 13.90 | 5.87 | 3.49 | 1.68 | 2021 | 1 | 18 | 8 | 9 | 23.24 | 6.26 | 3.65 | 1.71 |
| 2020 | 6 | 8 | 10 | 5 | 10.17 | 6.13 | 3.65 | 1.68 | 2021 | 1 | 20 | 10 | 3 | 25.03 | 5.89 | 3.47 | 1.70 |
| 2020 | 6 | 10 | 10 | 3 | 51.43 | 5.90 | 3.45 | 1.71 | 2021 | 1 | 21 | 10 | 4 | 10.78 | 6.00 | 3.51 | 1.71 |
| 2020 | 6 | 13 | 8 | 12 | 3.58 | 5.68 | 3.45 | 1.64 | 2021 | 1 | 24 | 9 | 5 | 29.09 | 6.34 | 3.70 | 1.71 |
| 2020 | 6 | 21 | 8 | 16 | 43.82 | 5.70 | 3.42 | 1.66 | 2021 | 1 | 29 | 9 | 59 | 52.52 | 6.31 | 3.68 | 1.71 |
| 2020 | 6 | 25 | 10 | 10 | 50.67 | 5.75 | 3.50 | 1.64 | 2021 | 2 | 6 | 7 | 59 | 47.81 | 6.05 | 3.54 | 1.71 |
| 2020 | 6 | 26 | 10 | 7 | 53.80 | 5.98 | 3.51 | 1.70 | 2021 | 2 | 17 | 10 | 58 | 59.29 | 6.34 | 3.69 | 1.71 |
| 2020 | 7 | 15 | 7 | 55 | 21.29 | 5.95 | 3.54 | 1.68 | 2021 | 2 | 23 | 8 | 1 | 35.71 | 6.17 | 3.64 | 1.69 |
| 2020 | 8 | 4 | 7 | 7 | 49.94 | 5.87 | 3.43 | 1.71 | 2021 | 3 | 1 | 10 | 22 | 20.61 | 6.02 | 3.51 | 1.71 |
| 2020 | 8 | 16 | 8 | 0 | 3.29 | 5.88 | 3.47 | 1.69 | 2021 | 3 | 1 | 10 | 22 | 28.97 | 5.86 | 3.50 | 1.67 |
| 2020 | 8 | 30 | 10 | 48 | 46.82 | 5.86 | 3.43 | 1.70 | 2021 | 3 | 4 | 11 | 39 | 7.99 | 6.10 | 3.62 | 1.68 |
| 2020 | 9 | 15 | 10 | 0 | 41.07 | 5.95 | 3.48 | 1.71 | 2021 | 3 | 7 | 11 | 8 | 43.11 | 6.25 | 3.64 | 1.71 |
| 2020 | 9 | 17 | 8 | 6 | 59.49 | 5.78 | 3.39 | 1.70 | 2021 | 3 | 9 | 8 | 5 | 35.03 | 5.94 | 3.49 | 1.70 |
| 2020 | 9 | 25 | 10 | 0 | 27.19 | 6.06 | 3.56 | 1.70 | 2021 | 3 | 10 | 11 | 40 | 35.72 | 6.29 | 3.67 | 1.71 |
| 2020 | 9 | 28 | 11 | 32 | 55.92 | 6.06 | 3.67 | 1.65 | 2021 | 3 | 12 | 7 | 4 | 53.68 | 6.05 | 3.53 | 1.71 |
| 2020 | 10 | 1 | 8 | 3 | 39.11 | 5.85 | 3.62 | 1.61 | 2021 | 3 | 18 | 7 | 5 | 4.37 | 5.77 | 3.44 | 1.67 |
| 2020 | 10 | 8 | 8 | 4 | 3.66 | 5.96 | 3.68 | 1.68 | 2021 | 3 | 20 | 6 | 3 | 17.18 | 5.91 | 3.46 | 1.70 |
| 2020 | 10 | 9 | 9 | 55 | 37.23 | 5.88 | 3.49 | 1.68 | 2021 | 3 | 21 | 8 | 5 | 50.83 | 5.97 | 3.51 | 1.70 |
| 2020 | 10 | 11 | 9 | 55 | 16.35 | 5.59 | 3.31 | 1.68 | 2021 | 3 | 23 | 10 | 38 | 34.00 | 6.05 | 3.56 | 1.70 |
| 2020 | 10 | 12 | 9 | 53 | 45.13 | 5.92 | 3.46 | 1.71 | 2021 | 3 | 28 | 7 | 59 | 52.11 | 5.79 | 3.39 | 1.70 |
| 2020 | 10 | 22 | 8 | 2 | 38.03 | 6.28 | 3.70 | 1.69 | 2021 | 3 | 31 | 8 | 43 | 25.26 | 6.29 | 3.67 | 1.71 |
| 2020 | 10 | 30 | 10 | 24 | 8.69 | 5.91 | 3.53 | 1.67 | 2021 | 4 | 4 | 10 | 3 | 28.54 | 6.30 | 3.69 | 1.70 |
| 2020 | 11 | 13 | 9 | 43 | 11.45 | 5.86 | 3.47 | 1.69 | 2021 | 4 | 4 | 10 | 3 | 46.12 | 5.82 | 3.48 | 1.67 |
| 2020 | 11 | 13 | 9 | 43 | 25.00 | 5.84 | 3.48 | 1.68 | 2021 | 5 | 9 | 10 | 1 | 7.45 | 6.07 | 3.54 | 1.71 |
| 2020 | 11 | 15 | 9 | 57 | 14.42 | 6.34 | 3.69 | 1.71 | 2021 | 5 | 11 | 7 | 9 | 21.63 | 5.78 | 3.40 | 1.70 |
| 2020 | 11 | 17 | 8 | 8 | 3.46 | 5.87 | 3.46 | 1.69 | 2021 | 5 | 17 | 7 | 31 | 51.25 | 5.88 | 3.47 | 1.69 |
| 2020 | 11 | 19 | 7 | 57 | 15.33 | 5.85 | 3.40 | 1.70 | 2021 | 5 | 21 | 10 | 4 | 49.24 | 5.92 | 3.47 | 1.70 |
| 2020 | 11 | 20 | 8 | 4 | 36.90 | 5.93 | 3.48 | 1.70 | 2021 | 6 | 10 | 10 | 54 | 21.14 | 6.21 | 3.64 | 1.70 |
| 2020 | 11 | 24 | 10 | 20 | 49.79 | 5.93 | 3.48 | 1.70 | 2021 | 6 | 11 | 8 | 2 | 23.16 | 5.82 | 3.48 | 1.67 |
| 2020 | 11 | 27 | 8 | 0 | 30.79 | 5.89 | 3.43 | 1.71 | 2021 | 6 | 15 | 10 | 0 | 51.00 | 6.26 | 3.67 | 1.70 |
| 2020 | 12 | 3 | 8 | 0 | 52.88 | 5.69 | 3.51 | 1.62 | 2021 | 6 | 17 | 10 | 1 | 10.90 | 5.98 | 3.51 | 1.70 |
| 2020 | 12 | 6 | 8 | 6 | 2.06 | 5.64 | 3.38 | 1.66 | 2021 | 6 | 30 | 10 | 11 | 14.87 | 5.91 | 3.49 | 1.69 |
| 2020 | 12 | 7 | 8 | 5 | 35.48 | 6.08 | 3.62 | 1.68 | 2021 | 7 | 1 | 8 | 2 | 47.08 | 5.74 | 3.43 | 1.67 |
| 2020 | 12 | 10 | 7 | 27 | 26.90 | 5.87 | 3.47 | 1.69 | 2021 | 7 | 4 | 7 | 0 | 6.97 | 5.90 | 3.45 | 1.71 |

| Год | Ме- сяц | День | Час | Ми- нута | Се- кунда | V_p , км/с | V_s , км/с | V_p/V_s |
|------|------------|------|-----|-------------|--------------|-----------------|-----------------|-----------|
| 2021 | 7 | 22 | 11 | 9 | 33.40 | 5.86 | 3.51 | 1.67 |
| 2021 | 7 | 24 | 8 | 7 | 40.30 | 6.33 | 3.71 | 1.70 |
| 2021 | 7 | 25 | 7 | 2 | 30.66 | 5.97 | 3.52 | 1.69 |
| 2021 | 7 | 29 | 8 | 2 | 38.33 | 5.92 | 3.47 | 1.70 |
| 2021 | 7 | 30 | 10 | 7 | 51.40 | 5.92 | 3.49 | 1.69 |
| 2021 | 8 | 7 | 8 | 20 | 18.59 | 5.95 | 3.52 | 1.69 |
| 2021 | 8 | 7 | 8 | 20 | 30.26 | 6.28 | 3.67 | 1.71 |
| 2021 | 8 | 12 | 10 | 17 | 3.37 | 5.83 | 3.41 | 1.70 |
| 2021 | 8 | 12 | 10 | 17 | 19.29 | 6.03 | 3.60 | 1.67 |
| 2021 | 8 | 26 | 7 | 0 | 15.47 | 5.81 | 3.44 | 1.69 |
| 2021 | 8 | 26 | 6 | 59 | 59.05 | 6.06 | 3.68 | 1.64 |
| 2021 | 8 | 29 | 10 | 57 | 6.73 | 6.09 | 3.59 | 1.69 |
| 2021 | 9 | 6 | 7 | 3 | 30.55 | 6.24 | 3.66 | 1.70 |
| 2021 | 9 | 12 | 10 | 2 | 2.55 | 6.37 | 3.72 | 1.71 |
| 2021 | 9 | 14 | 7 | 4 | 28.44 | 6.34 | 3.72 | 1.70 |
| 2021 | 9 | 17 | 10 | 2 | 33.33 | 5.74 | 3.37 | 1.70 |

| Год | Ме- сяц | День | Час | Ми- нута | Се- кунда | V_p , км/с | V_s , км/с | V_p/V_s |
|------|------------|------|-----|-------------|--------------|-----------------|-----------------|-----------|
| 2021 | 9 | 18 | 7 | 7 | 37.52 | 5.86 | 3.45 | 1.70 |
| 2021 | 9 | 28 | 7 | 14 | 43.78 | 6.10 | 3.57 | 1.71 |
| 2021 | 10 | 1 | 7 | 46 | 27.43 | 5.91 | 3.49 | 1.69 |
| 2021 | 10 | 3 | 8 | 25 | 59.87 | 5.74 | 3.38 | 1.70 |
| 2021 | 10 | 3 | 8 | 26 | 26.46 | 5.89 | 3.46 | 1.70 |
| 2021 | 10 | 5 | 7 | 3 | 54.44 | 5.74 | 3.46 | 1.66 |
| 2021 | 10 | 6 | 8 | 11 | 40.65 | 5.87 | 3.44 | 1.70 |
| 2021 | 10 | 7 | 7 | 2 | 47.42 | 6.23 | 3.66 | 1.70 |
| 2021 | 10 | 9 | 7 | 35 | 6.84 | 5.77 | 3.57 | 1.61 |
| 2021 | 10 | 9 | 7 | 35 | 21.95 | 5.79 | 3.52 | 1.64 |
| 2021 | 10 | 11 | 7 | 1 | 10.39 | 5.92 | 3.51 | 1.68 |
| 2021 | 10 | 13 | 10 | 7 | 20.98 | 6.27 | 3.65 | 1.71 |
| 2021 | 10 | 14 | 7 | 5 | 8.66 | 5.83 | 3.42 | 1.70 |
| 2021 | 10 | 15 | 9 | 58 | 55.73 | 6.19 | 3.65 | 1.69 |
| 2021 | 10 | 15 | 9 | 59 | 12.64 | 6.28 | 3.67 | 1.71 |
| 2021 | 10 | 16 | 6 | 59 | 7.62 | 5.66 | 3.35 | 1.69 |

В табл. 2. приведены примеры вероятно-го проявления частичного плавления на основе критериев [Nakajima et al., 2001] на участке зем-ной коры Тянь-Шаня в окружении Кумторско-го месторождения по данным записей трёх циф-ровых станций сейсмических волн взрывов Цен-трального карьера.

Таблица 2. Примеры вероятного проявления частичного плавления в земной коре на основе определения V_p , V_s , V_p/V_s с минимальной ошибкой (достоверность аппроксимации годографов $R^2 \geq 0.95$)

| Год | Ме- сяц | День | Час | Ми- нута | Се- кунда | V_p , км/с | V_s , км/с | V_p/V_s |
|------|------------|------|-----|-------------|--------------|-----------------|-----------------|-----------|
| 2020 | 2 | 21 | 10 | 6 | 51.63 | 6.15 | 3.53 | 1.74 |
| 2020 | 4 | 9 | 8 | 20 | 32.38 | 6.04 | 3.46 | 1.74 |
| 2020 | 5 | 5 | 8 | 1 | 32.81 | 6.03 | 3.48 | 1.73 |
| 2020 | 5 | 9 | 8 | 2 | 22.46 | 6.04 | 3.44 | 1.75 |
| 2020 | 5 | 14 | 8 | 3 | 35.99 | 6.10 | 3.41 | 1.79 |
| 2020 | 5 | 29 | 10 | 9 | 54.04 | 6.03 | 3.46 | 1.74 |
| 2020 | 6 | 15 | 8 | 7 | 2.71 | 5.93 | 3.43 | 1.73 |
| 2020 | 6 | 21 | 8 | 16 | 1.29 | 6.04 | 3.34 | 1.81 |
| 2020 | 8 | 22 | 10 | 2 | 56.19 | 6.33 | 3.61 | 1.75 |
| 2020 | 8 | 24 | 7 | 59 | 31.62 | 5.97 | 3.43 | 1.74 |
| 2020 | 9 | 20 | 10 | 33 | 39.11 | 6.32 | 3.64 | 1.73 |
| 2020 | 10 | 14 | 8 | 8 | 1.72 | 6.36 | 3.67 | 1.73 |
| 2020 | 10 | 23 | 7 | 58 | 7.97 | 5.80 | 3.35 | 1.73 |
| 2020 | 12 | 2 | 8 | 2 | 21.47 | 6.03 | 3.41 | 1.77 |
| 2020 | 12 | 4 | 8 | 1 | 35.35 | 6.04 | 3.44 | 1.75 |
| 2020 | 12 | 10 | 7 | 27 | 7.71 | 6.03 | 3.47 | 1.74 |
| 2020 | 12 | 14 | 8 | 0 | 56.97 | 6.25 | 3.46 | 1.80 |
| 2020 | 12 | 22 | 8 | 2 | 18.78 | 6.40 | 3.64 | 1.75 |
| 2020 | 12 | 29 | 8 | 7 | 10.50 | 6.31 | 3.65 | 1.73 |
| 2021 | 1 | 10 | 8 | 2 | 46.35 | 6.40 | 3.68 | 1.74 |
| 2021 | 2 | 7 | 5 | 59 | 15.84 | 5.91 | 3.42 | 1.73 |

| Год | Ме- сяц | День | Час | Ми- нута | Се- кунда | V_p , км/с | V_s , км/с | V_p/V_s |
|------|------------|------|-----|-------------|--------------|-----------------|-----------------|-----------|
| 2021 | 2 | 20 | 8 | 9 | 27.82 | 6.13 | 3.44 | 1.78 |
| 2021 | 2 | 25 | 8 | 2 | 32.56 | 5.94 | 3.41 | 1.74 |
| 2021 | 3 | 3 | 11 | 12 | 59.55 | 6.00 | 3.43 | 1.75 |
| 2021 | 3 | 4 | 11 | 39 | 14.89 | 6.03 | 3.39 | 1.78 |
| 2021 | 3 | 25 | 10 | 0 | 34.40 | 6.32 | 3.65 | 1.73 |
| 2021 | 4 | 1 | 8 | 4 | 16.98 | 5.96 | 3.38 | 1.76 |
| 2021 | 4 | 5 | 10 | 53 | 20.95 | 6.00 | 3.44 | 1.74 |
| 2021 | 4 | 12 | 8 | 10 | 39.51 | 6.39 | 3.69 | 1.73 |
| 2021 | 5 | 14 | 8 | 0 | 47.81 | 5.99 | 3.46 | 1.73 |
| 2021 | 5 | 21 | 10 | 4 | 31.12 | 6.09 | 3.47 | 1.75 |
| 2021 | 5 | 25 | 7 | 3 | 7.95 | 6.39 | 3.68 | 1.73 |
| 2021 | 6 | 3 | 10 | 13 | 7.96 | 6.37 | 3.64 | 1.75 |
| 2021 | 6 | 10 | 10 | 54 | 33.47 | 6.35 | 3.62 | 1.75 |
| 2021 | 6 | 27 | 10 | 21 | 40.65 | 6.26 | 3.51 | 1.78 |
| 2021 | 6 | 28 | 10 | 11 | 57.22 | 6.01 | 3.46 | 1.73 |
| 2021 | 6 | 29 | 7 | 0 | 56.72 | 6.28 | 3.63 | 1.73 |
| 2021 | 7 | 8 | 8 | 2 | 25.67 | 6.14 | 3.44 | 1.78 |
| 2021 | 7 | 20 | 7 | 0 | 38.65 | 5.95 | 3.43 | 1.73 |
| 2021 | 7 | 29 | 8 | 2 | 19.91 | 5.95 | 3.44 | 1.73 |
| 2021 | 8 | 2 | 12 | 4 | 0.26 | 6.40 | 3.70 | 1.73 |
| 2021 | 8 | 17 | 10 | 46 | 42.22 | 6.18 | 3.55 | 1.74 |
| 2021 | 8 | 22 | 7 | 3 | 55.81 | 6.41 | 3.70 | 1.73 |
| 2021 | 8 | 23 | 7 | 4 | 45.50 | 6.11 | 3.49 | 1.75 |
| 2021 | 8 | 27 | 7 | 42 | 51.19 | 6.32 | 3.65 | 1.73 |
| 2021 | 9 | 4 | 7 | 12 | 41.10 | 6.38 | 3.65 | 1.74 |
| 2021 | 9 | 5 | 10 | 49 | 22.56 | 6.14 | 3.53 | 1.74 |
| 2021 | 9 | 24 | 7 | 6 | 45.49 | 6.03 | 3.64 | 1.73 |
| 2021 | 9 | 26 | 7 | 1 | 10.01 | 6.42 | 3.68 | 1.74 |
| 2021 | 9 | 28 | 7 | 14 | 30.87 | 6.38 | 3.57 | 1.78 |
| 2021 | 9 | 30 | 8 | 11 | 47.32 | 5.80 | 3.34 | 1.73 |
| 2021 | 10 | 8 | 7 | 1 | 8.99 | 6.41 | 3.70 | 1.73 |
| 2021 | 10 | 14 | 7 | 5 | 35.99 | 6.21 | 3.52 | 1.76 |

В табл. 3 приведены примеры вероятного проявления высоких давлений на основе критериев [Nakajima et al., 2001] на участке Тянь-Шаня в окружении Кумторского месторождения по данным записей трёх цифровых станций сейсмических волн взрывов Центрального карьера.

Таблица 3. Примеры вероятного проявления высоких давлений на основе определения V_p , V_s , V_p/V_s с минимальной ошибкой (достоверность аппроксимации годографов $R^2 \geq 0.95$)

| Год | Ме- сяц | День | Час | Ми- нута | Се- кунда | V_p , км/с | V_s , км/с | V_p/V_s |
|------|------------|------|-----|-------------|--------------|-----------------|-----------------|-----------|
| 2020 | 3 | 6 | 7 | 59 | 53.94 | 6.62 | 3.77 | 1.75 |
| 2020 | 5 | 15 | 7 | 54 | 0.38 | 6.74 | 3.87 | 1.74 |
| 2020 | 6 | 3 | 1 | 1 | 45.98 | 6.45 | 3.70 | 1.74 |
| 2020 | 7 | 1 | 8 | 13 | 0.10 | 6.56 | 3.79 | 1.73 |
| 2020 | 8 | 1 | 6 | 2 | 33.41 | 6.43 | 3.80 | 1.69 |
| 2020 | 9 | 9 | 9 | 59 | 41.50 | 6.66 | 3.90 | 1.70 |
| 2020 | 9 | 27 | 8 | 10 | 13.71 | 6.96 | 3.99 | 1.74 |
| 2020 | 10 | 5 | 10 | 0 | 14.83 | 7.00 | 4.01 | 1.74 |
| 2020 | 11 | 9 | 10 | 1 | 5.61 | 6.46 | 3.83 | 1.68 |
| 2020 | 11 | 30 | 8 | 34 | 10.32 | 6.77 | 3.88 | 1.74 |
| 2020 | 12 | 9 | 8 | 44 | 25.46 | 6.71 | 3.90 | 1.72 |
| 2020 | 12 | 28 | 8 | 5 | 7.80 | 6.46 | 3.73 | 1.73 |
| 2020 | 12 | 30 | 8 | 20 | 42.32 | 6.73 | 3.82 | 1.76 |
| 2021 | 1 | 6 | 9 | 8 | 55.62 | 7.00 | 4.00 | 1.75 |
| 2021 | 2 | 1 | 8 | 37 | 44.54 | 6.98 | 3.97 | 1.75 |
| 2021 | 3 | 6 | 7 | 6 | 54.68 | 7.06 | 4.06 | 1.74 |
| 2021 | 4 | 2 | 8 | 6 | 28.87 | 6.83 | 3.99 | 1.71 |
| 2021 | 5 | 13 | 10 | 13 | 16.17 | 6.43 | 3.76 | 1.71 |
| 2021 | 6 | 1 | 7 | 8 | 32.78 | 6.63 | 3.72 | 1.78 |
| 2021 | 7 | 2 | 8 | 8 | 10.93 | 7.08 | 3.99 | 1.77 |
| 2021 | 8 | 1 | 8 | 55 | 45.14 | 6.54 | 3.79 | 1.72 |
| 2021 | 9 | 1 | 7 | 39 | 48.56 | 6.92 | 3.95 | 1.75 |
| 2021 | 10 | 4 | 7 | 1 | 36.08 | 7.02 | 4.05 | 1.74 |
| 2021 | 10 | 8 | 7 | 1 | 8.99 | 6.41 | 3.70 | 1.73 |
| 2021 | 10 | 8 | 7 | 1 | 20.49 | 6.97 | 3.93 | 1.77 |
| 2021 | 10 | 16 | 6 | 59 | 33.36 | 6.90 | 3.99 | 1.72 |

Заключение

1. В результате определения скоростей сейсмических волн промышленных взрывов в Центральном карьере за 2020–2021 гг. по данным цифровых станций «Тарагай» (TARG), «Каджи-Сай» (KDJ), «Каракол» (PRZ) отмечена временная изменчивость скоростных свойств участка литосферы Тянь-Шаня в пределах координат $\varphi=41.47-41.52^\circ\text{N}$, $\lambda=78.10-78.16^\circ\text{E}$. Значения V_p изменяются от 5.6 до 7.6 км/с, V_s – от 3.3 до 4.3 км/с, V_p/V_s – от 1.59 до 1.82, тогда как в 2017–2018 гг. значения V_p изменялись от 5.2 до 7.4 км/с, V_s – от 2.9 до 4.1 км/с, V_p/V_s – от 1.61 до 1.94, т.е. скоростные свойства рассматриваемого участка литосферы Тянь-Шаня для разных периодов времени в определённой мере отличаются.

2. В последовательности проявления скоростей сейсмических волн отмечены поэтапно интервалы с различными коэффициентами роста и спада значений. Компоненты нелинейных «ритмических составляющих» из циклов разного порядка, например, циклы третьего порядка определяются при значении $V_p \geq 6.9$ км/с на основе поэтапной оценки полиномиальных трендов. По пикам циклов третьего порядка $V_p \geq 7.1$ км/с выделяются циклы второго порядка. Далее по пикам циклов второго порядка $V_p \geq 7.3$ км/с аналогично предыдущей методике отмечается асимметричный цикл первого порядка. Длительность периода циклов третьего порядка составляет 28–117 сут., циклов второго порядка – около 154 суток.

3. В последовательности V_s циклы, например, третьего порядка определяются при значении $V_s \geq 3.9$ км/с на основе поэтапной оценки полиномиальных трендов. По пикам циклов третьего порядка $V_s \geq 4.3$ км/с выделяются циклы второго порядка. Далее по пикам циклов третьего порядка $V_s \geq 4.4$ км/с, аналогично предыдущей методике, отмечается цикл второго порядка. Длительность периода циклов третьего порядка составляет 28–117 сут., циклов второго порядка – более 117 суток.

4. На вариации V_p/V_s определяются циклы, например, третьего порядка при значении $V_p/V_s \geq 1.75$ на основе поэтапной оценки полиномиальных трендов. По пикам циклов третьего порядка $V_p/V_s \geq 1.77$ выделяются циклы второго порядка. Далее по пикам циклов второго порядка $V_p/V_s \geq 1.80$, аналогично предыдущей методике, отмечается цикл первого порядка. Длительность периода циклов третьего порядка составляет 9–65 сут., циклов второго порядка – около 67–95 суток.

5. На основе широко известных в сейсмологии соотношений скорости продольных волн, скорости поперечных волн, модуля сжатия, модуля сдвига, плотности среды предполагается, что изменения скоростных свойств участка литосферы, вероятно, связаны с изменениями модулей упругости среды. Значения модуля сдвига на рассматриваемой территории изменяются в пределах от $3.1 \cdot 10^{10}$ до $5.4 \cdot 10^{10}$ дин/см².

6. Отмечено, что ежедневные промышленные взрывы воздействуют на среду и геодинамику участка литосферы Тянь-Шаня накоплением и закачкой сейсмической энергии и вибрации.

7. На изучаемом участке Тянь-Шаня на основе соотношения V_p , V_s , V_p/V_s указаны вероятности проявления флюидов, частичного плавления и высоких давлений.

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.
- Адушкин В.В., Ан В.А., Каазик П.Б., Овчинников В.М.* О динамических процессах во внутренних геосферах Земли по временам пробега сейсмических волн // Доклады Академии наук. – 2001. – Т. 381, № 6. – С. 822–824. – EDN: KTXPDC
- Гамбурцева Н.Г.* Временная изменчивость скоростных свойств среды по данным Семипалатинских ядерных взрывов // Земная кора и верхняя мантия Тянь-Шаня в связи с геодинамикой и сейсмичностью. – Бишкек: Илим, 2006. – С. 94–104.
- Гамбурцева Н.Г., Люкэ Е.И., Николаевский В.Н. и др.* Периодические вариации параметров сейсмических волн при просвечивании литосферы мощными взрывами // Доклады АН СССР. – 1982. – Т. 266. – С. 1349–1353.
- Мамбетсадыкова 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: 10.35540/2686-7907.2020.3.09. – EDN: MMKFQE
- Меджитова З.А.* Временные вариации параметров сейсмических волн от промышленных взрывов // Земная кора и верхняя мантия Тянь-Шаня в связи с геодинамикой и сейсмичностью. – Бишкек: Илим, 2006. – С. 81–87.
- Омуралиев М.* Гармонический анализ параметров сейсмических волн от промышленных взрывов // Земная кора и верхняя мантия Тянь-Шаня в связи с геодинамикой и сейсмичностью. – Бишкек: Илим, 2006. – С. 88–94.
- Омуралиев М.* О роли термоакустического и массопереноса акустического эффектов в геологических процессах литосферы // Известия АН Киргизской ССР. – 1987. – № 4. – С. 44–49.
- Омуралиев М., Землянский А.А., Ачакеев Э.* Управляющие параметры процессов в области подготовки сильных землетрясений Тянь-Шаня // Современные техника и технологии в научных исследованиях. Материалы Пятой Международной конференции молодых учёных и студентов. – Москва–Бишкек: НС РАН, 2013. – С. 103–109.
- Омуралиев М., Омуралиева А.* Явление скачкообразного изменения строения литосферы во время и после крупномасштабного взрыва. – Кыргызпатент, 2011. – № 1616.
- Омуралиев М., Омуралиева А., Омурбек кызы К.* Изменение состояния среды земной коры в реальное время вблизи Кумторских взрывов // Вестник Института сейсмологии НАН КР. – 2016. – № 1 (7). – С. 76–86. – URL: <http://www.journal.seismo.kg/index.php/arkhiv/zhurnal-2016-1-7>
- 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.* Кумторские взрывы и изменение состояния среды земной коры и верхней мантии в реальное время // Известия ВУЗов Кыргызстана. – 2012. – № 6. – С. 80–87.
- Омурбек кызы К., Омуралиев М.* Сейсмический мониторинг взрывов на центральном участке месторождения «Кумтор» Тянь-Шаня // Российский сейсмологический журнал. – 2020. – Т. 2, № 4. – С. 83–99. – DOI: 10.35540/2686-7907.2020.4.08. – EDN: BYGRJH
- Рид Г.Д., Вонг Д., Рапони Т.Р. и др.* Технический отчёт по руднику «Кумтор» (Кыргызская Республика) NI 43-101. – «Центerra Голд Инк.», 20.03.2015. – 329 с. – URL: https://www.kumtor.kg/wp-content/uploads/2015/05/centerra_kumtor_technical_report_final_march_20_2015_ru.pdf
- Adams L.H., Williamson E.D.* Density distribution of the Earth // Journal of the Washington Academy of Sciences. – 1923. – V. 13. – P. 413–428.
- Assadzadeh G.E., Samson I.M., Gagnon J.E.* Identification of fluid inclusion solid phases using a focused ion beam scanning electron microscope with energy dispersive spectroscopy: Implications for interpreting microthermometric data and composition of fluids in Sn (-W-Mo) deposits // The Canadian Mineralogist. – 2016. – V. 54, N 3. – P. 737–754. – DOI: 10.3749/canmin.1500065
- 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: Solid Earth. – 2001. – V. 106. – P. 21843–21857. – DOI: 10.1029/2000JB000008
- Omuraliev M., Omuralieva A.* Late Cenozoic tectonics of the Tien Shan. – Bishkek: Ilim, 2004. – 166 p.
- Yoshida K., Orozbaev R., Hirajima T., Miyake A., Tsuchiyama A., Bakirov A., Takasu A., Sakiev K.* Microexcavation and direct chemical analysis of individual fluid inclusion by cryo-FIB-SEM-EDS application to the UHP talc-garnet-chloritoid schist from the Makbal metamorphic complex, Kyrgyz Tien-Shan // Geochemical Journal. – 2018. – V. 52, N 1. – P. 59–67. – DOI: 10.2343/geochemj.2.0502

Сведения об авторах

Омурбек кызы Канышай, мл. науч. сотр. Института сейсмологии Национальной академии наук Кыргызской Республики (ИС НАН КР), г. Бишкек, Кыргызстан. E-mail: kanyshaj.omurbekkyzy@bk.ru

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

Омуралиева Айымжан, канд. геол.-мин. наук, зам. директора ИС НАН КР, г. Бишкек, Кыргызстан. E-mail: omuraika@mail.ru

Абдрахматов Канатбек Ермекович, член-корреспондент НАН КР, д-р геол.-мин. наук, профессор, директор ИС НАН КР, г. Бишкек, Кыргызстан. E-mail: kanab53@yandex.ru

Study of daily industrial explosions at the Kumtor deposit, Kyrgyzstan, in 2020–2021

© 2024 K. Omurbek kyzy, M. Omuraliev, A. Omuralieva, K.E. Abdrakhmatov

IS NAS KR, Bishkek, Kyrgyz Republic

Received September 9, 2022

Abstract Temporary changeability in the velocity properties of the Tien Shan lithosphere within the coordinates $\varphi=41.47-41.52^\circ\text{N}$, $\lambda=78.10-78.16^\circ\text{E}$ was noted as a result of determination the seismic waves velocities from industrial explosions in the Central Pit in 2020–2021 based on the data from digital stations “Taragai” (TARG), “Kajy-Say” (KDJ), “Karakol” (PRZ). The values of V_p vary from 5.6 to 7.6 km/s, V_s - from 3.3 to 4.3 km/s, V_p/V_s - from 1.59 to 1.82, which differ from the velocity values determined in 2017–2018. Intervals with different coefficients of values of growth and decline, components of nonlinear “rhythmic components” - nonlinear cycles of different orders are marked gradually in the sequence of manifestation of the seismic waves’ velocities from explosions. VP seismic waves cycles, for example, of the third order are determined at a value of $V_p \geq 6.9$ km/s based on a step-by-step assessment of polynomial trends. The third-order cycles’ duration is 28–117 days; the second-order cycles’ duration is about 154 days. Cycles, for example, of the third order are determined at a value of $V_s \geq 3.9$ km/s based on a step-by-step assessment of polynomial trends in the V_s sequence. The third-order cycles’ duration is 28–117 days; the second-order cycles’ duration is more than 117 days. Cycles, for example, of the third order are determined at a value of $V_p/V_s \geq 1.75$ based on a step-by-step assessment of polynomial trends on the variation of V_p/V_s . The third order cycles’ duration is 9–65 days; the second order cycles’ duration is about 67–95 days. It is assumed that changes in the velocity properties of a section of the lithosphere are likely associated with changes in the elastic moduli of the medium based on the widely known relationships in seismology between the longitudinal waves’ velocity, transverse waves’ velocity, compression modulus, shear modulus, and density of the medium. Thus, the shear modulus values in the area under consideration vary from $3.1 \cdot 10^{10}$ dyn/cm² to 5.410^{10} dyn/cm². It is noted that daily industrial explosions affect the environment and geodynamics of the Tien Shan lithosphere through the accumulation and pumping of seismic energy and vibration. Manifestation probabilities of fluids, partial melting and high pressures in the studied area of the Tien Shan orogeny are shown based on the ratio of $V_p, V_s, V_p/V_s$ of industrial explosions.

Keywords Quarry explosion, longitudinal wave, transverse wave, seismic waves’ velocity, cycle of variations in seismic wave parameters, hierarchy of cycles, manifestation of fluids, partial melting, high pressures.

For citation Omurbek kyzy, K., Omuraliev, M., Omuralieva, A., & Abdrakhmatov, K.E. (2024). [Study of daily industrial explosions at the Kumtor field, Kyrgyzstan, in 2020–2021]. *Rossiiskii seismologicheskii zhurnal* [Russian Journal of Seismology], 6(1), 29–41. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.35540/2686-7907.2024.1.02>. EDN: KHPEIL

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.).
- Adams, L.H., & Williamson, E.D. (1923). Density distribution of the Earth. *Journal of the Washington Academy of Sciences*, 13, 413–428.
- Adushkin, V.V., An, V.A., Kaazik, P.B., & Ovchinnikov, V.M. (2001). Dynamic processes within the Earth’s internal geospheres: evidence from the seismic wave traveltimes data. *Doklady Earth Sciences*, 381A, 1119–1121. EDN: LGXJBT
- Assadzadeh, G.E., Samson, I.M., & Gagnon, J.E. (2016). Identification of fluid inclusion solid phases using a focused ion beam scanning electron microscope with energy dispersive spectroscopy: implications for interpreting microthermometric data and composition of fluids in Sn (-W-Mo) deposits. *The Canadian Mineralogist*, 54(3), 737–754. DOI: [10.3749/canmin.1500065](https://doi.org/10.3749/canmin.1500065)
- Gamburseva, N.G. (2006). [Temporal variability of the velocity properties of the medium according to the Semipalatinsk nuclear explosions]. In *Zemnaya kora i verkhnyaya mantiya Tian'-Shanya v svyazi s geodinamikoy i seysmichnost'yu* [The crust and upper mantle of Tien Shan due to geodynamics and seismicity] (pp. 94–104). Bishkek, Kyrgyzstan: Ilim Publ. (In Russ.).
- Gamburseva, N.G., Luke, E.I., Nicolaevskiy, V.N., et al. (1982). Periodic variations in the parameters of seismic waves during the exploration of the lithosphere by powerful explosions. *Doklady of the Academy of Sciences of the USSR. Earth Science Sections*, 266, 1349–1353.

- 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: 10.35540/2686-7907.2020.3.09. EDN: MMKFQE
- Medjitova, Z.A. (2006). [Temporary variations in the parameters of seismic waves from industrial explosions]. In *Zemnaya kora i verkhnyaya mantiya Tyan'-Shanya za schet geodinamiki i seysmichnosti* [The crust and upper mantle of Tien Shan due to geodynamics and seismicity] (pp. 81-87). Bishkek, Kyrgyzstan: Ilim Publ. (In Russ.).
- Nakajima, J., Matsuzawa, T., Hasegawa, A., & Zhao, D. (2001). Three-dimensional structure of V_p , V_s and V_p/V_s beneath northeastern Japan: Implications for arc magmatism and fluids. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 106, 21843-21857. DOI: 10.1029/2000JB000008
- Omuraliev, M. (1987). [On the role of thermoacoustic and mass transfer of acoustic effects in the geological processes of the lithosphere]. *Izvestia AN Kirg. SSR* [Bulletin of the Academy of Sciences of the Kirghiz SSR], 4, 44-49. (In Russ.).
- Omuraliev, M. (2006). [Harmonic analysis of the parameters of seismic waves from industrial explosions]. In *Zemnaya kora i verkhnyaya mantiya Tyan'-Shanya v svyazi s geodinamikoy i seysmichnost'yu* [The crust and upper mantle of Tien Shan due to geodynamics and seismicity] (pp. 88-94). Bishkek, Kyrgyzstan: Ilim Publ. (In Russ.).
- Omuraliev, M., & Omuralieva, A. (2004). *Late Cenozoic tectonics of the Tien Shan*. Bishkek, Kyrgyzstan: Ilim Publ., 166 p.
- Omuraliev, M., & Omuralieva, A. (2011). [Phenomenon of a jump-like change in the structure of the lithosphere during and after a large-scale explosion]. *Kyrgyzpatent* [Kyrgyzpatent], 1616. (In Russ.).
- Omuraliev, M., Omuralieva, A., & Omurbek kyzy, K. (2016). [Changes in the state of the earth's crust in real time near the Kumtor explosions]. *Vestnik Instituta seismologii NAN KR* [Bulletin of the Institute of Seismology of the National Academy of Sciences of the Kyrgyz Republic], 1(7), 76-86. Retrieved from <http://www.journal.seismo.kg/index.php/arkhiv/zhurnal-2016-1-7> (In Russ.).
- Omuraliev, M., Zemlyansky, A.A., & Achakeev, E. (2013). [Control parameters of processes in the field of preparation of strong earthquakes of the Tien Shan]. In *Sovremennye tekhnika i tekhnologii v nauchnykh issledovaniyakh. Materialy Piatoi Mezhdunarodnoi konferentsii molodykh uchenykh i studentov* [Modern techniques and technologies in scientific research. Proceedings of the Fifth International Conference of Young Scientists and Students] (pp. 103-109). Moscow, Russia – Bishkek, Kyrgyzstan: Scientific Station RAS Publ. (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 geoekologii vnutrikontinental'nykh orogenov. Materialy V Mezhdunarodnogo simpoziuma* [Modern problems of geodynamics and geoecology of intracontinental orogens. Proceedings of the V International Symposium] (pp. 73-76). Bishkek, Kyrgyzstan: Scientific Station RAS Publ. (In Russ.).
- Omuralieva, A., & Omuraliev, M. (2012). [Kumtor explosions and change in the state of the crust and upper mantle in real time]. In *Izvestiya VUZov* [Bulletin of Universities of Kyrgyzstan], 6, 80-87. (In Russ.).
- Omurbek kyzy, K., & Omuraliev, M. (2020). [Seismic monitoring of explosions in the Central site of the Kumtor deposit, Tien Shan]. *Rossiiskii seismologicheskii zhurnal* [Russian Journal of Seismology], 2(4), 83-99. (In Russ.). DOI: 10.35540/2686-7907.2020.4.08. EDN: BYGRJH
- Reed, G.D., Wong, D., Raponi, T.R. et al. (2015). *Tekhnicheskii otchet po rudniku "Kumtor" (Kyrgyzskaia Respublika)* [Technical report on the Kumtor mine KR NI 43-101]. Centerra Gold Inc. Publ., 329 p. Available at: https://www.kumtor.kg/wp-content/uploads/2015/05/centerra_kumtor_technical_report_final_march_20_2015_ru.pdf. (In Russ.).
- Yoshida, K., Orozbaev, R., Hirajima, T., Miyake, A., Tsuchiyama, A., Bakirov, A., Takasu, A., & Sakiev, K. (2018). Micro-excavation and direct chemical analysis of individual fluid inclusion by cryo-FIB-SEM-EDS application to the UHP talc-garnet-chloritoid schist from the Makbal metamorphic complex, Kyrgyz TienShan. *Geochemical Journal*, 52(1), 59-67. DOI: 10.2343/geochemj.2.0502

Information about authors

Omurbek kyzy Kanyshay, Junior Researcher of the Institute of Seismology of the National Academy of Sciences of the Kyrgyz Republic (IS NAS KR), Bishkek, Kyrgyz Republic. E-mail: kanyshaj.omurbekkyzy@bk.ru

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

Omuralieva Aiyman, PhD, Deputy Director of the IS NAS KR, Bishkek, Kyrgyz Republic. E-mail: omuraika@mail.ru

Abdrakhmatov Kanatbek Ermekovich, Corresponding Member of NAS KR, Dr., Professor, Director of the IS NAS KR, Bishkek, Kyrgyz Republic. E-mail: kanab53@yandex.ru