

УДК 550.34

Сейсмический мониторинг взрывов на Центральном участке месторождения «Кумтор» Тянь-Шаня

© 2020 г. К. Омурбек кызы, М. Омуралиев

ИС НАН КР, г. Бишкек, Кыргызская Республика

Аннотация. Осуществлён сейсмический мониторинг карьерных взрывов на локальном участке Центральный Кумторского месторождения за январь 2017 г. – январь 2018 года. Оценены скорости сейсмических продольных и поперечных волн, их отношения (V_p , V_s , V_p/V_s), максимальные амплитуды и их отношения (A_p , A_s , A_s/A_p), а также установлены средние значения со стандартным отклонением величин, на их вариациях во времени выделены иерархии циклов. Отмечено, что соотношения V_p , V_s , V_p/V_s отображают состояние среды земной коры: малые значения V_p , V_s , V_p/V_s выражают возможное проявление флюидов; большое значение отношения V_p/V_s – возможное проявление частичного плавления; большие значения V_p , V_s – возможное проявление относительно высоких давлений. Оценены физические параметры среды: сейсмический параметр Φ , коэффициент Пуассона, модуль сдвига, модуль объёмного сжатия. Установлено, что эти физические параметры являются динамическими параметрами, зависят от частоты геодинамических процессов, а именно в циклах, например, третьего порядка с относительно высокой частотой отмечаются сравнительно малые величины модулей (физических параметров среды), а в циклах второго и первого порядков с относительно низкой частотой – сравнительно большие величины модулей. Изменение величин A_p , A_s , A_s/A_p и степени поглощения сейсмических волн предопределено физическими параметрами и состоянием среды. Отмечено изменение глубины проникновения сейсмических волн взрывов в пределах около 8–35 км.

Ключевые слова: карьерный взрыв, продольные и поперечные волны, скорость сейсмических волн, цикл вариаций параметров сейсмических волн, иерархия циклов, сейсмический параметр, коэффициент Пуассона, модуль сдвига, модуль объёмного сжатия, глубина проникновения сейсмических волн взрыва.

Для цитирования: 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: <https://doi.org/10.35540/2686-7907.2020.4.08>

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 проявление обнаружено в 1978 году. Управлением геологии Киргизской ССР до 1992 г. произведены геологоразведочные работы. В рудной зоне с 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 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, 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. Соответственно, Кумторский разлом является активным разломом.

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



Рис. 1. Снимок Центрального карьера месторождения «Кумтор» на северо-западном склоне хребта Ак-Шыйрак
[https://24.kg/ekonomika/112270_narudnike_kumtor_v2018_godu_proizveli_bolee_166_tonnyi_zolota/]

короткозамедленным способом. Соответственно, накапливается большой материал карьерных взрывов Кумторского месторождения Тянь-Шаня.

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 термоакустического и массопереносоакустического эффектов в геологических процессах литосферы [Омуралиев, 1987]. Выделены определённые «гармоники» со свойственными периодами, амплитудами и фазами. Изучены сейсмические волны ряда Кумторских взрывов за 2012 г. [Омуралиев и др., 2016].

Целью данной работы является мониторинг сейсмических волн взрывов Центрального карьера Кумторского месторождения по данным сети близких цифровых сейсмических станций. Анализ особенностей изменения основных пара-

метров, а именно скоростей сейсмических продольных и поперечных волн (V_p , V_s , V_p/V_s), максимальных амплитуд (A_p , A_s , A_s/A_p) карьерных взрывов, произведённых в течение последних десяти лет, в связи с геодинамическими процессами активной области горообразования Тянь-Шаня [Мамбетсадыкова, Омуралиев, 2020] является актуальным.

Методика и фактический материал

По данным цифровых сейсмических станций сетей KNET (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 Z – вертикальной компоненты (канала), 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, she – 68%-ный доверительный интервал в определении положения эпицентра, глубина события, определяемая по заложенным скоростным моделям (depth) и по методике, заложенной в программе Hypoellipse [Lahr, 2012] (hz), sez – 68%-ный доверительный интервал в определении глубины и т.д.

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 определённой точностью на основе данных сети сейсмических станций в окружении месторождения «Кумтор». 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 январь 2017 г. – январь 2018 г., при этом $d=1$, $rms=0.1$, $se=0.1$, $sez=0.3-2.0$. Энергия взрывов имела значения от $2.5 \cdot 10^3$ до $5.4 \cdot 10^8$ Дж, в среднем – $2.5 \cdot 10^5$ Дж, а магнитуда $MPV=1.1-3.1$. В непосредственном окружении месторождения «Кумтор» находились цифровые станции: «Тарагай» (TARG) – на юго-западе, «Каджи-Сай» (KDJ) – на северо-западе, «Ананьево» (ANVS) –

на севере, «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.

Глубины проникновения лучей взрывов находились в пределах 8–35 км, среднее значение составляло $C=15.8$ км и стандартное отклонение – $S=5.3$ км (рис. 3). Соответственно, глубины проникновения лучей взрывов находились в земной коре.

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 и четырёх станций в окружении Кумторского месторождения, где строение геолого-геофизической среды близкое: $d=1$, $rms=0.1$. Годографы имели достаточную точность, достоверность аппроксимации составляла около $R^2=0.99$. В табл. 1 в качестве примера приведены для сравнения значения скоростей сейсмических волн взрывов Центрального карьера (в 7 час. 01.03.2017 г. и 7 час. 06.03.2017 г.) по записям четырёх станций («Тарагай» (TARG), «Каджи-Сай» (KDJ), «Каракол» (PRZ), «Ананьево» (ANVS)) на эпицентральных расстояниях до 120 км и по записям трёх станций («Тарагай», «Каджи-Сай», «Каракол») на эпицентральных расстояниях до 96 км.

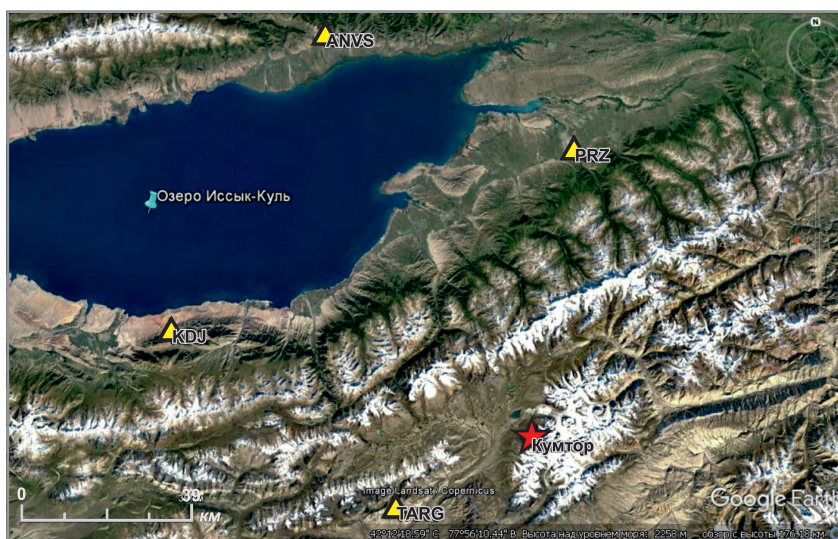


Рис. 2. Схема расположения цифровых сейсмических станций, обозначенных треугольниками (KDJ – «Каджи-Сай», PRZ – «Каракол», ANVS – «Ананьево» сети KRNET, TARG – «Тарагай» ЦАИИЗ), и карьер «Центральный» Кумторского месторождения (звёздочка)

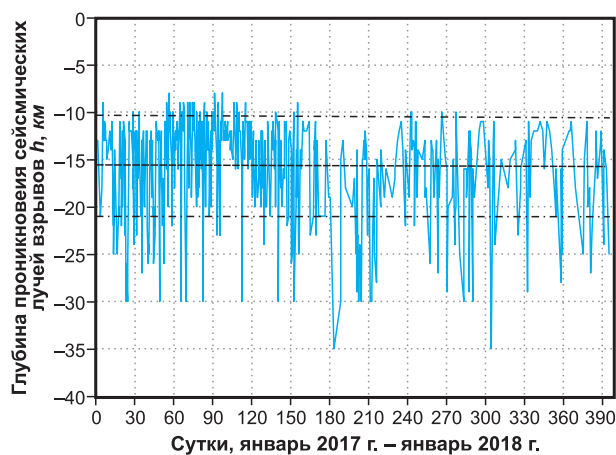


Рис. 3. Изменение глубины проникновения лучей взрывов в карьере «Центральный» Кумторского месторождения за январь 2017 г. – январь 2018 г.

Сплошной горизонтальной линией обозначена средняя (C) глубина проникновения лучей, пунктирными линиями – значения глубин с учётом стандартного отклонения $C+S$ и $C-S$

Таблица 1. Сравнение значений V_p , V_s , V_p/V_s карьерных взрывов по записям цифровых станций в окружении Центрального карьера Кумторского месторождения

Дата, дд.мм.гггг	Время, чч.мм.сс.с	Станции	V_p , км/с	V_s , км/с	V_p/V_s
01.03.2017	07:04:17.01	TARG, PRZ, KDJ, ANVS	5.97	3.47	1.72
		TARG, PRZ, KDJ	5.97	3.47	1.72
06.03.2017	07:36:30.47	TARG, PRZ, KDJ, ANVS	5.80	3.41	1.70
		TARG, PRZ, KDJ	5.74	3.37	1.70

Как видно, значения V_p и V_s отдельно взятых четырёх и трёх из этих станций либо совпадают, либо разнятся на величину 0.04 км/с, а значения V_p/V_s разного количества (3 и 4) рассматриваемых станций очень близки.

В дальнейшем выбраны взрывы Центрального карьера, для которых имелись записи всех четырёх цифровых станций (TARG, KDJ, PRZ и ANVS) или трёх из этих станций. Составлялись индивидуальные годографы сейсмических волн карьерных взрывов и определялись скорости V_p , V_s , V_p/V_s и их достоверность аппроксимации, которые сводились в каталог.

Одновременно на каждой станции определялись максимальные амплитуды продольной волны A_p взрывов по вертикальной компоненте записи, амплитуды поперечной волны A_s по компоненте с наилучшим соотношением «сигнал/шум» и отношения этих максимальных амплитуд A_s/A_p . Эти данные амплитуды волны сводились в каталог карьерных взрывов.

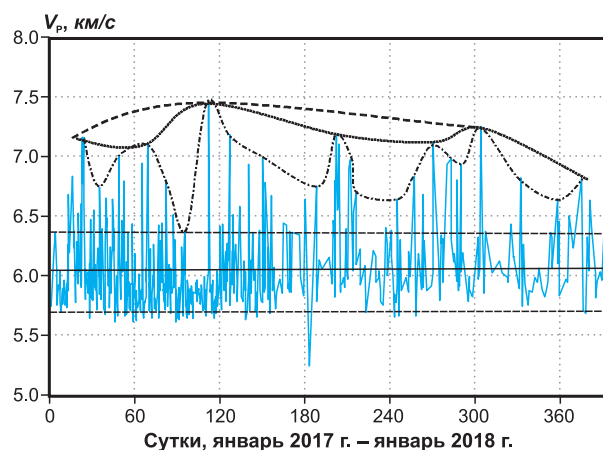
Результаты исследования и их обсуждение

Значения скоростей продольных волн V_p (по записям Z-компоненты) взрывов (около 624) Центрального карьера Кумторского месторождения за январь 2017 г. – январь 2018 г. по записям цифровых станций «Тарагай», «Каджи-Сай», «Ананьево» и «Каракол» на эпицентральной расстоянии до около 120 км на отдельно взятом участке Тянь-Шаня приведены на рис. 4. Значения V_p изменялись от 5.2 до 7.4 км/с (табл. 2).

Таблица 2. Среднее значение (C) скоростей сейсмических волн (карьерных взрывов) и стандартное отклонение (S) их вариации в окружении Кумторского месторождения за январь 2017 г. – январь 2018 г.

Значение	V_p	V_s	V_p/V_s
C	6.04	3.51	1.71
S	0.34	0.15	0.04
$C+S$	6.37	3.66	1.75
$C-S$	5.70	3.36	1.67

При этом среднее значение составляло около $C=6.04$ км/с и стандартное отклонение $S=0.34$ км/с. На графике вариации V_p отмечается иерархия асимметричных циклов («ритмические составляющие»). Сначала определяются циклы, в частности, третьего порядка при значении $V_p \geq 6.3$ км/с на основе поэтапной оценки полиномиальных трендов с высокой достоверностью аппроксимации ($R^2 \geq 0.95$). По пикам циклов третьего порядка при значении $V_p \geq 6.8$ км/с выделяются циклы второго порядка на основе полиномиального тренда. Далее по пикам циклов второго порядка при значении $V_p \geq 7.1$ км/с аналогично предыдущей методике отмечается цикл первого порядка. Длительность периода циклов третьего порядка составляет 34–92 сут., циклов второго порядка – около 192 суток. Пики цикла второго порядка проявились, например, 22.04.2017 г. и 31.10.2017 года.

**Рис. 4.** Вариация скорости продольных сейсмических волн V_p взрывов Центрального карьера Кумторского месторождения за январь 2017 г. – январь 2018 г.

Горизонтальной сплошной линией обозначено среднее значение – C . Горизонтальными точечными линиями обозначены значения $(C+S)$ и $(C-S)$ с учётом стандартного отклонения (S). Штрихпунктирной кривой линией обозначен цикл вариации третьего порядка; точечной кривой линией – цикл вариации второго порядка; пунктирной кривой линией – цикл вариации первого порядка

На рис. 5 приведена вариация скорости поперечной волны V_S (по четкой записи одной из трёх компонент) взрывов (около 624) Центрального карьера Кумторского месторождения на отдельно взятом определённом участке Тянь-Шаня. Значения V_S изменялись от 2.9 до 4.1 км/с. При этом среднее значение составляло около $C=3.51$ км/с и стандартное отклонение $S=0.15$ км/с (табл. 2). На графике вариации V_S отмечается иерархия асимметричных циклов. Сначала определяются циклы, в частности, третьего порядка при значении $V_S \geq 3.5$ км/с на основе поэтапной оценки полиномиальных трендов с высокой достоверностью аппроксимации ($R^2 \geq 0.95$). По пикам циклов третьего порядка при значении $V_S \geq 3.8$ км/с выделяются циклы второго порядка на основе полиномиального тренда. Далее по пикам циклов второго порядка при значении $V_S \geq 4.0$ км/с аналогично предыдущей методике отмечается цикл первого порядка. Длительность периода циклов третьего порядка составляет 15.6–84.4 сут., циклов второго порядка – около 177 суток. Пики цикла второго порядка проявились, например, 07.05.2017 г. и 31.10.2017 года.

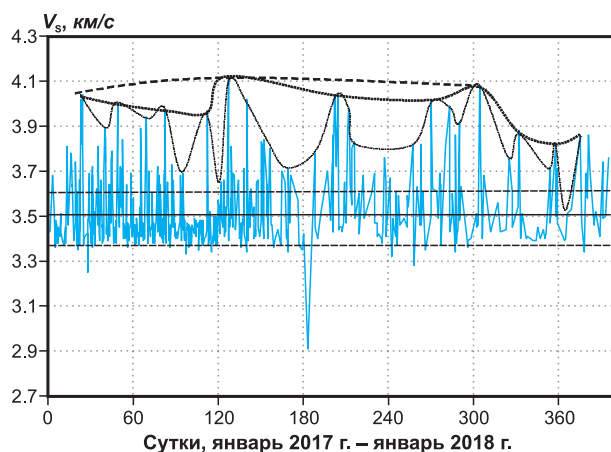


Рис. 5. Вариация скорости поперечных сейсмических волн V_S взрывов Центрального карьера Кумторского месторождения за январь 2017 г. – январь 2018 г. Условные обозначения см. на рис. 4

Значения отношения V_p/V_S скоростей продольных и поперечных волн взрывов (около 624) Центрального карьера Кумторского месторождения за январь 2017 г. – январь 2018 г. на эпицентральной расстоянии до около 120 км приведены на рис. 6. Значения V_p/V_S изменялись от 1.61 до 1.94 (табл. 2). При этом среднее значение составляло около $C=1.71$ и стандартное отклонение $S=0.04$. На графике вариации V_p/V_S отмечается иерархия асимметричных

циклов. Сначала определяются циклы, в частности, третьего порядка при значении $V_p/V_S \geq 1.75$ на основе поэтапной оценки полиномиальных трендов с высокой достоверностью аппроксимации. По пикам циклов третьего порядка при значении $V_p/V_S \geq 1.78$ выделяются циклы второго порядка на основе полиномиального тренда ($R^2 \geq 0.95$). Далее по пикам циклов второго порядка при значении $V_p/V_S \geq 1.84$ аналогично предыдущей методике отмечается цикл первого порядка. В табл. 3 и 4 приведены иерархии циклов третьего и второго порядков – ритмические составляющие в вариации V_p/V_S . Пик цикла первого порядка проявился 29 июня 2017 г. (на 180.3 сутки от 01.01.2017 г.), и значение V_p/V_S составило около 1.94.

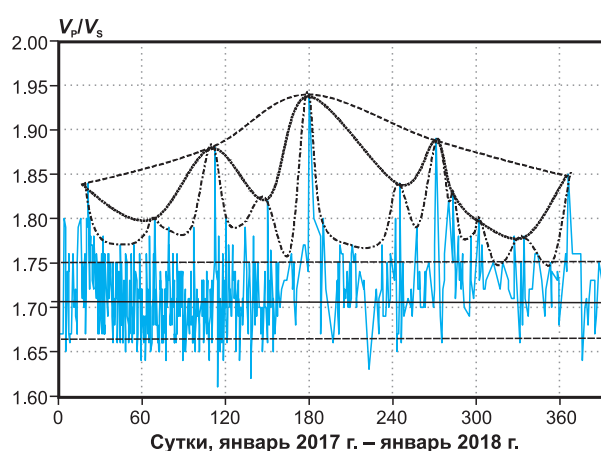


Рис. 6. Вариация отношения V_p/V_S скорости продольных и поперечных сейсмических волн взрывов Центрального карьера Кумторского месторождения за январь 2017 г. – январь 2018 г. Условные обозначения см. на рис. 4

Изучения максимальных амплитуд (A_p , A_s , A_s/A_p) сейсмических волн (по записям избранных компонент) взрывов Центрального карьера по данным цифровых сейсмических станций за январь 2017 г. – январь 2018 г. показало, что среднее значение A_p , например, на станции «Каракол» (расположена к северу от карьера на эпицентральной расстоянии около 75 км) составляло $C=0.0007$ мк, стандартное отклонение $S=0.0014$ мк (табл. 5), а на станции «Тарагай» (расположена к юго-западу от карьера на эпицентральной расстоянии около 38 км) – среднее значение $C=0.0026$ мк, $S=0.0113$ мк. Относительно низкие значения амплитуды поперечных волн A_s (в виде импульсов) наблюдались по трассе к станции «Каракол» в промежутках около 29.3–63.7 сут. (0.0001–0.0004 мк), 126.4–169.3 сут. (0.0003–0.0005 мк), 253.3–3007.4 сут.

(0.0001–0.0001 мк), по трассе к станции «Тарагай» в интервале времени около 14.3–39.4 сут. (0.003–0.004 мк), 167.4–210.3 сут. (0.002–0.004 мк), 306.4–345.3 сут. (0.003–0.009 мк). В этих интервалах времени отмечались относительно большие поглощения поперечных волн взрывов на участках земной коры, вероятно это обусловлено проявлением флюидов и других явлений в среде.

Как видно из табл. 5, изменения амплитуд волн взрывов на локальном участке Центрального карьера имеют значительные вариации.

На рис. 7 приведён в качестве примера график изменения отношения амплитуд A_p/A_s волн карьерных взрывов по данным цифровой сейсмической станции «Каракол» за 01.2017 г. – 01.2018 года.

На графике вариации A_s/A_p амплитуд поперечных и продольных сейсмических волн взрывов Центрального карьера отмечается иерархия асимметричных циклов. Сначала определяются циклы, в частности, третьего порядка при значении $A_s/A_p \geq 10$ на основе поэтапной оценки полиномиальных трендов с высокой достоверностью аппроксимации. По пикам циклов третьего порядка $A_s/A_p \geq 17.6$ выделяются циклы второго порядка на основе полиномиального тренда ($R^2 \geq 0.95$). Далее по пикам циклов второго порядка $A_s/A_p \geq 42$ аналогично предыдущей методике отмечается цикл первого порядка. Длительность периода циклов третьего порядка составляет 22–63 сут., циклов второго порядка – около 99–106 суток.

Таблица 3. Проявления нелинейных циклов третьего порядка в вариации величины V_p/V_s взрывов Центрального карьера Кумторского месторождения

Дата начала цикла, дд.мм.гггг	Время цикла, сут.	Длительность (период), сут.	Частота, 1/сут.
21.01.2017	21.29–69.29	48.00	0.020833
10.03.2017	69.29–112.37	43.08	0.023213
22.04.2017	112.37–150.38	38.01	0.026309
30.05.2017	150.38–180.30	29.92	0.033422
29.06.2017	180.30–245.37	65.07	0.015368
31.08.2017	245.37–271.29	25.92	0.038580
28.09.2017	271.29–280.37	9.08	0.110132
07.10.2017	280.37–302.24	21.87	0.045725
29.10.2017	302.24–327.39	25.15	0.039761
23.11.2017	327.39–366.29	38.90	0.025707
01.01.2018	366.29		

Таблица 4. Проявления нелинейных циклов второго порядка в вариации величины V_p/V_s взрывов Центрального карьера Кумторского месторождения

Дата начала цикла, дд.мм.гггг	Время цикла, сут.	Длительность (период), сут.	Частота, 1/сут.
21.01.2017	21.29–112.37	91.08	0.010979
22.04.2017	112.37–180.30	67.93	0.014721
29.06.2017	180.30–271.29	90.99	0.010990
28.09.2017	271.29–366.29	95.00	0.010526

Таблица 5. Среднее значение C и стандартное отклонение S максимальных амплитуд A_p , A_s , A_s/A_p сейсмических волн взрывов Центрального карьера за 01.2017 г. – 01.2018 г. по данным цифровых станций «Каракол» и «Тарагай»

Параметры	Сейсмическая станция					
	«Каракол», расположена к северу от карьера на эпицентральной расстоянии около 75 км			«Тарагай», расположена к юго-западу от карьера на эпицентральной расстоянии около 38 км		
	A_p	A_s	A_s/A_p	A_p	A_s	A_s/A_p
Среднее значение C	0.0007	0.0015	6.646	0.0026	0.040	52.390
Стандартное отклонение S	0.0014	0.0028	8.043	0.0113	0.81	104.177
$C+S$	0.0021	0.0043	14.689	0.0139	0.121	156.567

Пики циклов второго порядка проявились 09.01.2017 г., 24.04.2017 г., 01.08.2017 г. и 15.11.2017 г., т.е. достаточно быстро, примерно через 105, 99, 106 сут.

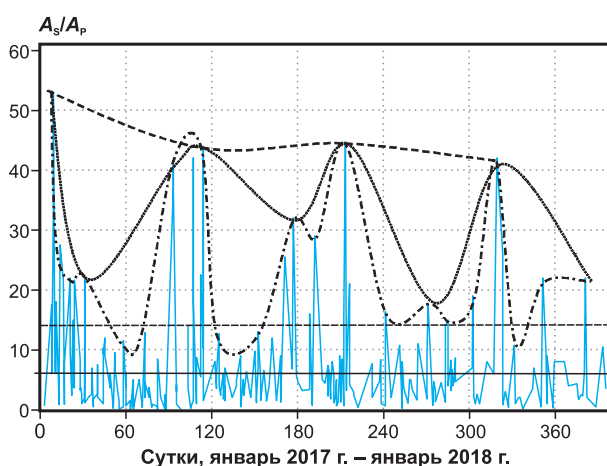


Рис. 7. Вариация отношения A_s/A_p амплитуд поперечных и продольных сейсмических волн взрывов Центрального карьера Кумторского месторождения за январь 2017 г. — январь 2018 г. по данным станции «Каракол» (PRZ).

Условные обозначения см. на рис. 4

По имеющимся данным V_p и V_s определены вероятные величины коэффициента Пуассона (σ) рассматриваемого участка земной коры на основании формулы:

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

Вариация значений σ на рассматриваемом участке Тянь-Шаня приведена на рис. 8.

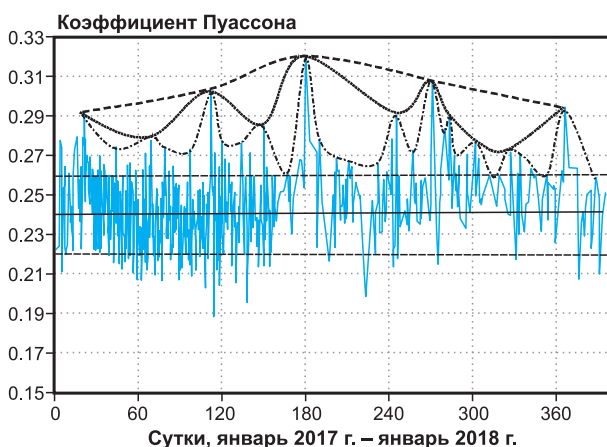


Рис. 8. Вариация коэффициента Пуассона (σ) на изучаемом участке Тянь-Шаня на основании данных скоростей продольных и поперечных сейсмических волн взрывов Центрального карьера Кумторского месторождения за январь 2017 г. — январь 2018 г.

Условные обозначения см. на рис. 4

Значения σ изменялись от 0.19 до 0.32, при этом среднее значение составляло около $C=0.24$, стандартное отклонение $S=0.018$ (табл. 6). На графике вариации σ , аналогично графику вариации V_p/V_s (табл. 3, 4), отмечается иерархия асимметричных циклов. Сначала определяются циклы, в частности, третьего порядка при значении $\sigma \geq 0.26$ на основе поэтапной оценки полиномиальных трендов с высокой достоверностью аппроксимации ($R^2 \geq 0.95$). По пикам циклов третьего порядка $\sigma \geq 0.27$ выделяются циклы второго порядка на основе полиномиального тренда. Далее по пикам циклов второго порядка $\sigma \geq 0.29$ аналогично предыдущей методике отмечается цикл первого порядка. Циклы третьего порядка имеют длительность 9–65 сут. и частоту повторения 0.110–0.015 в 1/сут. (табл. 3), а циклы второго порядка — длительность 67–95 сут. и частоту повторения 0.014–0.011 (табл. 4). В связи с этим можно сказать, что высокочастотным циклам свойственны сравнительно малые значения коэффициента Пуассона, а низкочастотным циклам — сравнительно большие значения этого коэффициента. Соответственно предполагается, что динамический коэффициент Пуассона, вероятно, зависит от частоты геодинамических процессов.

На рис. 9 приведена вариация сейсмического параметра Φ среды на рассматриваемом участке земной коры по формуле Адамса-Вильямсона [Williamson, Adams, 1923]:

$$\Phi = V_p^2 - 4/3V_s^2 = K/\rho, \quad (2)$$

где V_p , V_s — скорости продольных и поперечных волн (км/с), ρ — плотность среды (г/см³), K — модуль сжатия (кбар). Значения Φ изменялись от 15.74 до 34.44 км²/с². При этом среднее значение составляло около $C=20.07$ км²/с², стандартное отклонение $S=2.9$ км²/с² (табл. 6). На графике вариации Φ отмечается иерархия асимметричных циклов. Сначала выделяется цикл, в частности, третьего порядка при значении $\Phi \geq 22.5$ км²/с² на основе поэтапной оценки полиномиальных трендов с высокой достоверностью аппроксимации ($R^2 \geq 0.95$). По пикам циклов третьего порядка при значении $\Phi \geq 26.5$ км²/с² отмечаются циклы второго порядка на основе полиномиального тренда. Далее по пикам циклов второго порядка при значении $\Phi \geq 29.5$ км²/с² аналогично предыдущей методике отмечается цикл первого порядка.

Важно отметить, что по разработкам Адамса и Вильямсона [Williamson, Adams, 1923] существует зависимость в виде:

$$\Delta\rho = (1/\Phi) \Delta\rho, \quad (3)$$

Таблица 6. Среднее значение (C) и стандартное отклонение (S) вариации ряда физических параметров среды участка земной коры

Значение	Коэффициент Пуассона σ	Сейсмический параметр Φ , $\text{км}^2/\text{с}^2$	Модуль сжатия K , кбар	Модуль сдвига μ , кбар
C	0.24	20.07	5218.9	951.71
S	0.018	2.92	760.0	109.79
$C+S$	0.26	22.99	5979.8	1061.51
$C-S$	0.22	17.27	4457.9	841.91

где $\Delta\rho$ – приращение плотности, Φ – сейсмический параметр, Δp – приращение давления. Приращение давления Δp по формуле (3) для приращения плотности, например, $\Delta\rho=0.01 \text{ г/см}^3$ на рассматриваемом участке земной коры Тянь-Шаня при значении $\Phi=15.7\text{--}34.4 \text{ км}^2/\text{с}^2$ составляет около $\Delta p=1.5\text{--}3.4 \text{ кбар}$.

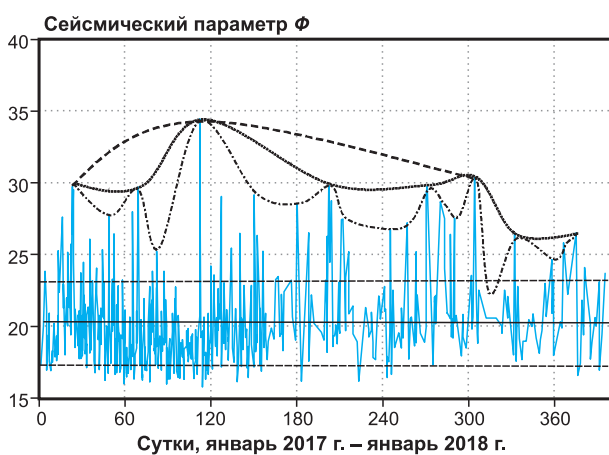


Рис. 9. Вариация сейсмического параметра Φ на рассматриваемом участке Тянь-Шаня на основании данных скорости продольных и поперечных сейсмических волн взрывов Центрального карьера Кумторского месторождения за январь 2017 г. – январь 2018 г. Условные обозначения см. на рис. 4

На основании формулы (2), значений скоростей волн V_p и V_s взрывов Центрального карьера при плотности около $\rho=2.6 \text{ г/см}^3$ гранодиоритов и метаморфических пород в окружении Кумторского месторождения [Юдахин, 1983] определены значения модуля объёмного сжатия K . На рис. 10 приведено изменение модуля сжатия за январь 2017 г. – январь 2018 г. на рассматриваемом участке Тянь-Шаня. Величины модуля сжатия изменяются от 4092 до 8955 кбар . Среднее значение составляет 5218 кбар , стандартное отклонение $S=760 \text{ кбар}$ (табл. 6). На графике вариации K отмечается иерархия асимметричных циклов, подобно иерархии циклов сейсмического параметра Φ , сначала выделяются циклы, в частности, третьего порядка при значении $K\geq 6195 \text{ кбар}$

на основе поэтапной оценки полиномиальных трендов с высокой достоверностью аппроксимации ($R^2\geq 0.95$). По пикам циклов третьего порядка при значении $K\geq 7725 \text{ кбар}$ отмечаются циклы второго порядка на основе полиномиального тренда. Далее по пикам циклов второго порядка аналогично предыдущей методике отмечается цикл первого порядка. Пик цикла первого порядка около $K=8955 \text{ кбар}$ проявился 22.04.2017 г. (на 112.37 сут.). Длительность периода циклов третьего порядка составляет 34–90 сут., циклов второго порядка – около 190 суток. Соответственно, циклы третьего порядка имеют своеобразные частоты 0.029–0.011 в $1/\text{сут.}$, циклы второго порядка около 0.005 в $1/\text{сут.}$. Здесь можно предположить о явлении динамического модуля сжатия, зависящего от частоты, а именно: в циклах третьего порядка с относительно высокой частотой отмечаются сравнительно малые величины модуля сжатия, а в циклах второго порядка с относительно низкой частотой – сравнительно большие величины модуля сжатия.

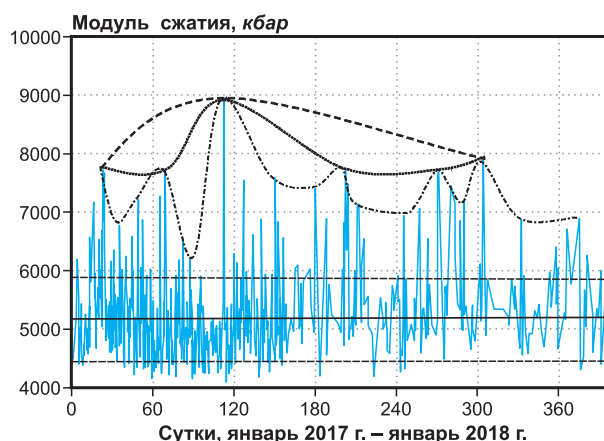


Рис. 10. Вариация модуля сжатия K на отдельно взятом участке Тянь-Шаня на основании данных скорости продольных и поперечных сейсмических волн взрывов Центрального карьера за январь 2017 г. – январь 2018 г. и осреднённой плотности пород в окрестности Кумторского месторождения.

Условные обозначения см. на рис. 4

Определены величины модуля сдвига (жёсткости) μ среды на основании значений скорости продольных волн V_p взрывов Центрального карьера, осреднённой плотности пород ($\rho=2.6 \text{ г/см}^3$) [Юдахин, 1983] в окрестности Кумторского месторождения по формуле:

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

где μ – модуль сдвига (кбар), V_p – скорость продольных волн (км/с), $\rho=2.6 \text{ г/см}^3$ – плотность среды.

На рис. 11 приведено изменение модуля сдвига за январь 2017 г. – январь 2018 г. на рассматриваемом участке Тянь-Шаня. Величины модуля сдвига изменяются от 713 до 1439 кбар. Среднее значение составляет 951 кбар, стандартное отклонение $S=109 \text{ кбар}$ (табл. 6).

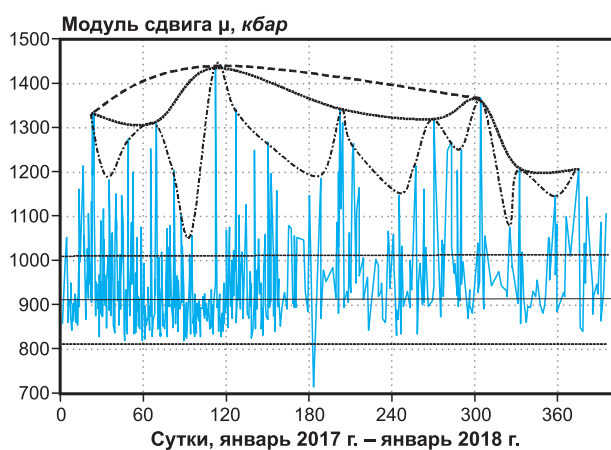


Рис. 11. Вариация модуля сдвига μ на отдельно взятом участке Тянь-Шаня на основании данных скорости продольных волн взрывов Центрального карьера за январь 2017 г. – январь 2018 г. и осреднённой плотности пород в окрестности Кумторского месторождения.

Условные обозначения см. на рис. 4

На графике вариации модуля сдвига μ отмечается иерархия асимметричных циклов, подобная иерархии циклов сейсмического параметра Φ и модуля сжатия K . Сначала выделяются циклы, в частности, третьего порядка при значении $\mu \geq 1040 \text{ кбар}$ на основе поэтапной оценки полиномиальных трендов с высокой достоверностью аппроксимации ($R^2 \geq 0.95$). По пикам циклов третьего порядка $\mu \geq 1200 \text{ кбар}$ отмечаются циклы второго порядка на основе полиномиального тренда. Далее по пикам циклов второго порядка $\mu \geq 1330 \text{ кбар}$, аналогично предыдущей методике, отмечается цикл первого порядка. Пик цикла первого порядка около $\mu=1439 \text{ кбар}$ проявился 22.04.2017 г. (на 112.37 сут.). Длитель-

ность периода циклов третьего порядка составляет 34–90 сут., циклов второго порядка – около 190 суток. Соответственно, циклы третьего порядка имеют своеобразные частоты 0.029–0.011 в 1/сут., циклы второго порядка – около 0.005 в 1/сут. Здесь можно говорить о явлении динамического модуля сдвига, зависящего от частоты, а именно: в циклах третьего порядка с относительно высокой частотой отмечаются сравнительно малые величины модуля сдвига, а в циклах второго порядка с относительно низкой частотой – сравнительно большие величины модуля сдвига.

Соотношение величин V_p , V_s , V_p/V_s земной коры выражает особенности среды земной коры [Nakajima et al., 2001; Omuraliev, Omuralieva, 2004; Абдрахматов и др., 2015; Омуралиева, Омуралиев, 2011; Омуралиев, Омуралиева, 2011], 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 – относительно высокие давления. В связи с тем, что глубины проникновения сейсмических лучей взрывов (Центрального карьера) находятся в земной коре, то можно сказать, что соотношения V_p , V_s , V_p/V_s выражают проявления флюидов, частичного плавления, высоких давлений и другие явления в изучаемом участке земной коры Тянь-Шаня.

На рис. 12 показано соотношение достоверных величин V_p , V_s , V_p/V_s взрывов Центрального карьера Кумторского месторождения за январь 2017 г. – январь 2018 года. 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. 7. приведены примеры вероятного проявления флюидов на участке земной коры Тянь-Шаня в окружении Кумторского месторождения по данным записей трёх-четырёх цифровых станций сейсмических волн взрывов Центрального карьера с указанием глубины (h , км) проникновения сейсмических лучей. Наиболее вероятные проявления флюидов выделены жирным шрифтом. При этом глубины проникновения лучей взрывов составляли около 11–16 км. Промежуток времени между наиболее вероятными проявлениями, в частности, 08.01.2017 г., 28.01.2017 г., 02.02.2017 г. и 07.07.2017 г., составляет около 20, 5 и 155 суток.

Здесь необходимо отметить включения некоторых жидкостей в минералах гранитов [Assadzadeh et al., 2016], тальк-гранат-хлоритового

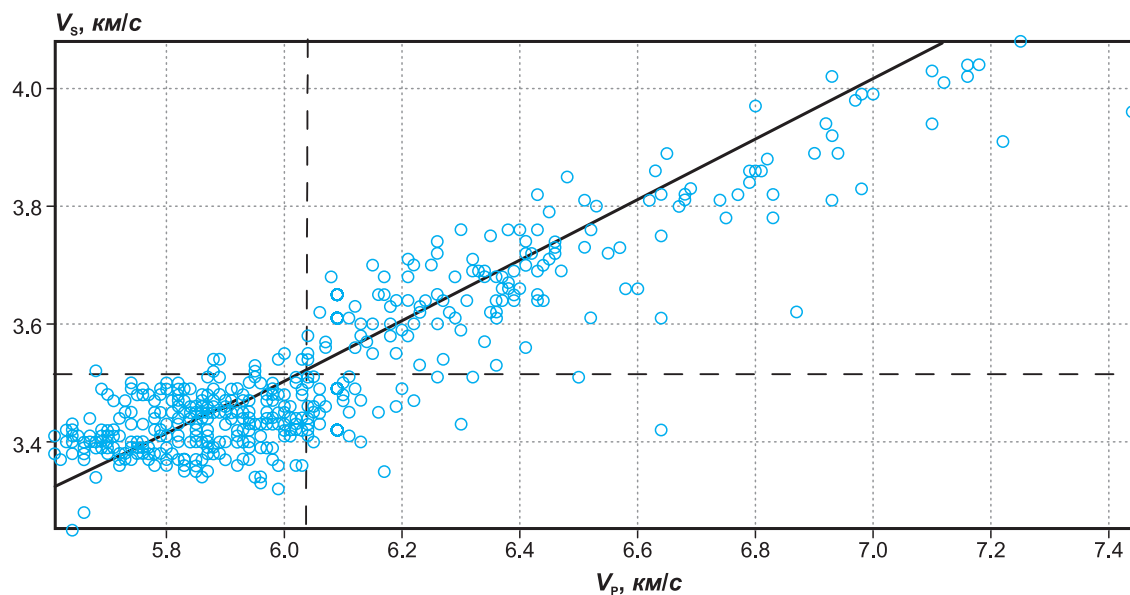


Рис. 12. Соотношение между V_p , V_s , V_p/V_s взрывов в пределах координат $\varphi=41.79-41.87^\circ\text{N}$, $\lambda=78.17-78.28^\circ\text{E}$ Центрального карьера Кумторского месторождения.

Кружочками обозначены наблюденные значения V_p/V_s . Значение $V_p/V_s=1.72$ выделено диагональной сплошной линией. Выше этой линии выделяются параллельные линии, где кружочки имеют малые значения $V_p/V_s < 1.72$, а ниже данной линии отмечаются параллельные линии, где кружочки имеют большие значения $V_p/V_s > 1.72$. Среднее значение $V_p=6.04$ км/с обозначено вертикальной штриховой линией. Среднее значение $V_s=3.51$ км/с обозначено горизонтальной штриховой линией

Таблица 7. 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	Месяц	День	Час	Минута	Секунда	V_p , км/с	V_s , км/с	V_p/V_s	h , км
2017	1	8	7	4	45	5.69	3.41	1.66	13
2017	1	8	7	5	18	5.70	3.41	1.67	15
2017	1	9	7	3	44	5.76	3.43	1.67	14
2017	1	28	10	16	3	5.84	3.49	1.67	16
2017	1	29	9	22	52	5.82	3.48	1.67	13
2017	2	2	9	2	45	5.71	3.41	1.67	11
2017	2	4	9	9	6	5.84	3.46	1.69	13
2017	3	1	7	5	28	5.86	3.47	1.69	15
2017	3	4	7	9	25	5.79	3.41	1.69	12
2017	3	12	9	24	1	5.87	3.48	1.68	13
2017	3	17	7	4	51	5.86	3.48	1.68	13
2017	3	28	9	6	43	5.91	3.49	1.69	15
2017	4	8	6	59	41	5.83	3.45	1.69	13
2017	4	13	9	4	57	5.91	3.49	1.69	14
2017	4	15	9	10	38	5.85	3.46	1.69	14
2017	4	17	9	37	17	5.89	3.48	1.69	16
2017	4	17	9	37	58	5.84	3.45	1.69	15
2017	4	19	7	3	54	5.72	3.37	1.69	11
2017	5	9	8	57	5	5.92	3.49	1.69	17
2017	5	22	9	5	25	5.85	3.45	1.69	13
2017	5	31	9	3	46	5.86	3.48	1.68	17
2017	7	7	9	5	38	5.78	3.45	1.67	15
2017	7	20	7	4	33	5.82	3.43	1.69	14
2018	1	11	8	31	42.14	5.71	3.47	1.64	15
2018	1	26	7	4	2.18	5.76	3.49	1.65	14

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 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 паробразной ртути (He, Ar, Rn, H₂, CO₂, CH₄, Hg и др.), ионно-солевого состава подземных вод (НСО₃, Cl, CO₃, SO₄, HSiO₃, F, Li, Ca², Mg², Na), химических показателей (*t* °С, рН, 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 тек-

тонических 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.

В табл. 8. приведены примеры вероятного проявления частичного плавления на основе критериев [Nakajima et al., 2001] на участке земной коры Тянь-Шаня в окружении Кумторского месторождения по данным записей трёх-четырёх цифровых станций сейсмических волн взрывов Центрального карьера с указанием глубины проникновения (*h*, км) сейсмических лучей. Наиболее вероятные проявления частичного плавления выделены жирным шрифтом. При этом глубины проникновения лучей взрывов составляли около 12–13 км. Промежуток времени между наиболее вероятными проявлениями частичного плавления, в частности, 10.01.2017 г., 22.01.2017 г., 31.01.2017 г. и 20.05.2017 г., составляет около 12, 9 и 109 суток.

Таблица 8. 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	Месяц	День	Час	Минута	Секунда	V_p , км/с	V_s , км/с	V_p/V_s	<i>h</i> , км
2017	1	6	9	43	38	5.88	3.38	1.74	11
2017	1	10	9	6	54	5.96	3.39	1.76	12
2017	1	22	9	5	42	5.90	3.37	1.75	13
2017	1	28	7	6	43	5.93	3.42	1.73	15
2017	1	28	7	7	13	5.64	3.25	1.73	10
2017	1	31	9	18	37	5.92	3.36	1.76	12
2017	2	2	9	3	20	5.86	3.37	1.74	10
2017	2	24	7	5	0	5.98	3.44	1.73	15
2017	2	24	10	39	31	5.99	3.43	1.74	15
2017	3	20	7	7	9	5.94	3.43	1.73	11
2017	4	13	9	4	22	5.94	3.42	1.73	13
2017	4	17	7	0	28	5.92	3.42	1.73	14
2017	4	24	7	3	56	5.92	3.42	1.73	14
2017	4	24	7	4	38	5.92	3.40	1.74	15
2017	5	5	9	2	24	5.95	3.43	1.73	13
2017	5	20	9	2	9	5.96	3.34	1.78	12
2017	6	1	7	7	53	5.90	3.40	1.73	10
2017	6	11	7	1	43	5.97	3.44	1.73	12
2017	6	13	7	5	7	5.85	3.37	1.73	11
2017	6	17	7	5	47	5.89	3.40	1.73	13
2017	6	26	5	33	26	5.98	3.37	1.77	13
2017	7	26	7	3	27	5.97	3.45	1.73	15
2017	7	26	9	12	22	5.98	3.43	1.74	12
2017	8	7	9	6	5	5.92	3.42	1.73	14
2017	9	2	7	3	12.8	5.92	3.41	1.73	14
2017	12	17	7	0	50.24	5.94	3.42	1.73	14

Таблица 9. 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	Месяц	День	Час	Минута	Секунда	V_p , км/с	V_s , км/с	V_p/V_s	h , км
2017	1	13	9	9	34	6.26	3.72	1.68	22
2017	1	13	9	10	35	6.68	3.81	1.75	25
2017	1	16	7	5	7	6.83	3.78	1.8	25
2017	1	17	7	35	56	6.23	3.63	1.71	20
2017	1	17	7	36	34	6.37	3.64	1.75	21
2017	1	22	9	4	52	6.60	3.66	1.8	23
2017	1	23	7	3	9	7.16	4.02	1.78	30
2017	1	23	7	3	46	6.77	3.82	1.77	26
2017	1	24	7	28	57	7.16	4.04	1.77	30
2017	1	24	7	29	29	6.62	3.81	1.73	26
2017	1	29	7	3	3	6.47	3.69	1.75	24
2017	1	31	6	1	28	6.55	3.72	1.76	23
2017	1	31	9	19	12	6.34	3.68	1.72	21
2017	1	31	9	19	49	6.06	3.62	1.67	19
2017	2	3	8	22	0	6.23	3.62	1.72	21
2017	2	4	9	9	38	6.74	3.81	1.76	27
2017	2	6	9	4	17	6.38	3.66	1.74	20

В табл. 9 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-четырёх цифровых станций сейсмических волн взрывов Центрального карьера с указанием глубины (h , км) проникновения сейсмических лучей. Наиболее вероятные проявления высоких давлений выделены жирным шрифтом. При этом глубины проникновения лучей взрывов составляли около 23–35 км. Промежуток времени между наиболее вероятными проявлениями высоких давлений, в частности, 16.01.2017 г., 23.01.2017 г., 24.01.2017 г. и 04.02.2017 г., составляет около 7, 1 и 10 суток.

Интересно сравнивать время вероятных проявлений флюидов частичного плавления и высоких давлений. Например, 08.01.2017 г. в 07:04:45 отмечалось проявление флюидов. Позже, спустя около двух суток, 10.01.2017 г. в 09:06:54 – проявление частичного плавления. 07.07.2017 г. в 09:04:59, вероятно, было проявление высоких давлений. Позже, 07.07.2017 г., в 09:05:38 отмечалось проявление частичного плавления. В связи с этим можно предположить, что в проявлениях флюидов, частичного плавления и высоких давлений существует определённая последовательность.

Заключение

1. Для проведения исследования были выбраны только взрывы (землетрясения были исключены) в пределах координат $\varphi=41.79-41.87^\circ\text{N}$,

$\lambda=78.17-78.28^\circ\text{E}$ на локальном участке Центрального карьера, например, за январь 2017 г. – январь 2018 года. При этом класс точности определения эпицентра взрывов $d=1$, среднеквадратическое отклонение времён пробега $rms=0.1$, стандартное отклонение от времени вступления $se=0.1$, 68%-ный доверительный интервал в определении положения глубины проникновения лучей $sez=0.3-2.0$. Энергия взрывов составляла от $2.5 \cdot 10^3$ до $5.4 \cdot 10^8$ Дж, в среднем – $2.5 \cdot 10^5$ Дж, а магнитуда $MPV=1.1-3.1$. В непосредственном окружении месторождения «Кумтор» находились цифровые станции: «Тарагай» (TARG) – на юго-западе, «Каджи-Сай» (KDJ) – на северо-западе, «Ананьево» (ANVS) – на севере, «Каракол» (PRZ) – на северо-востоке. В пределах этих станций горные массивы сложены в основном гранитоидами, метаморфическими породами. Скоростные модели участков земной коры в пределах рассматриваемых станций были близкими. Глубины проникновения лучей взрывов находились в пределах 8–35 км, среднее значение составляло $C=15.8$ км, стандартное отклонение – $S=5.3$ км. Соответственно, глубины проникновения лучей взрывов находились в земной коре.

2. На вариации скорости продольных волн V_p выделяется иерархия нелинейных асимметричных циклов – «ритмические составляющие». Циклы, например, третьего порядка определяются при значении $V_p \geq 6.3$ км/с на основе поэтапной оценки полиномиальных трендов с высокой достоверностью аппроксимации ($R^2 \geq 0.95$).

По пикам циклов третьего порядка $V_p \geq 6.8$ км/с выделяются циклы второго порядка. Далее по пикам циклов второго порядка $V_p \geq 7.1$ км/с аналогично предыдущей методике отмечается асимметричный цикл первого порядка. Длительность периода циклов третьего порядка составляет 34–92 сут., циклов второго порядка – около 192 суток.

3. На вариации V_s отмечается иерархия асимметричных циклов. Циклы, например, третьего порядка определяются при значении $V_s \geq 3.5$ км/с на основе поэтапной оценки полиномиальных трендов с высокой достоверностью аппроксимации ($R^2 \geq 0.95$). По пикам циклов третьего порядка $V_s \geq 3.8$ км/с выделяются циклы второго порядка. Далее по пикам циклов третьего порядка $V_s \geq 4.0$ км/с, аналогично предыдущей методике, отмечается цикл второго порядка. Длительность периода циклов третьего порядка составляет 15.6–84.4 сут., циклов второго порядка – около 177 суток.

4. На вариации V_p/V_s наблюдается иерархия асимметричных циклов. Циклы, например, третьего порядка определяются при значении $V_p/V_s \geq 1.75$ на основе поэтапной оценки полиномиальных трендов с высокой достоверностью аппроксимации. По пикам циклов третьего порядка $V_p/V_s \geq 1.78$ выделяются циклы второго порядка. Далее по пикам циклов второго порядка $V_p/V_s \geq 1.84$, 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 вариации A_s/A_p амплитуд поперечных и продольных сейсмических волн взрывов Центрального карьера по сейсмическим станциям отмечается иерархия асимметричных циклов. Циклы по трассе к станции «Каракол», например, третьего порядка определяются при значении $A_s/A_p \geq 10$ на основе поэтапной оценки полиномиальных трендов с высокой достоверностью аппроксимации. По пикам циклов третьего порядка $A_s/A_p \geq 17.6$ выделяются циклы второго порядка. Далее по пикам циклов второго порядка $A_s/A_p \geq 42$, аналогично предыдущей методике, отмечается цикл первого порядка. Длительность периода циклов третьего порядка составляет 22–63 сут., циклов второго порядка – около 99–106 суток.

6. На вариации коэффициента Пуассона σ выделяется иерархия асимметричных циклов. Циклы, в частности, третьего порядка отмечаются при значении $\sigma \geq 0.26$ на основе поэтапной оценки полиномиальных трендов с высо-

кой достоверностью аппроксимации ($R^2 \geq 0.95$). По пикам циклов третьего порядка $\sigma \geq 0.27$ выделяются циклы второго порядка. Далее по пикам циклов второго порядка $\sigma \geq 0.29$ отмечается цикл первого порядка. Циклы третьего порядка имеют длительность 9–65 сут. и частоты повторения 0.110–0.015 в 1/сут., а циклы второго порядка – длительность 67–95 сут. и частоты повторения 0.014–0.011 в 1/сут. В связи с этим можно сказать, что высокочастотным циклам свойственны сравнительно малые значения коэффициента Пуассона, а низкочастотным циклам – сравнительно большие значения этого коэффициента. Соответственно, предполагается динамический коэффициент Пуассона, т.е. σ зависит от частоты геодинамических процессов.

7. На вариации сейсмического параметра Φ наблюдается иерархия асимметричных циклов. Циклы, в частности, третьего порядка отмечаются при значении $\Phi \geq 22.5$ км²/с² на основе поэтапной оценки полиномиальных трендов с высокой достоверностью аппроксимации ($R^2 \geq 0.95$). По пикам циклов третьего порядка $\Phi \geq 26.5$ км²/с² намечаются циклы второго порядка. Далее по пикам циклов второго порядка $\Phi \geq 29.5$ км²/с², аналогично предыдущей методике, отмечается цикл первого порядка.

8. На вариации модуля сжатия K выделяется иерархия асимметричных циклов. Циклы, в частности, третьего порядка выделяются при значении $K \geq 6195$ кбар на основе поэтапной оценки полиномиальных трендов с высокой достоверностью аппроксимации ($R^2 \geq 0.95$). По пикам циклов третьего порядка $K \geq 7725$ кбар намечаются циклы второго порядка. Далее по пикам циклов второго порядка, аналогично предыдущей методике, отмечается цикл первого порядка. Длительность периода циклов третьего порядка составляет 34–90 сут., циклов второго порядка – около 190 суток. В связи с этим можно сказать о явлении динамического модуля сжатия, зависящего от частоты, а именно: в циклах третьего порядка с относительно высокой частотой отмечаются сравнительно малые величины модуля сжатия, а в циклах второго порядка с относительно низкой частотой – сравнительно большие величины модуля сжатия.

9. На вариации модуля сдвига μ отмечается иерархия асимметричных циклов, подобная иерархиям циклов сейсмического параметра Φ и модуля сжатия K . Циклы, в частности, третьего порядка выделяются при значении $\mu \geq 1040$ кбар на основе поэтапной оценки полиномиальных трендов с высокой достоверностью аппроксимации ($R^2 \geq 0.95$). По пикам циклов

третьего порядка $\mu \geq 1200$ кбар намечаются циклы второго порядка. Далее по пикам циклов второго порядка $\mu \geq 1330$ кбар, аналогично предыдущей методике, отмечается цикл первого порядка.

10. Установлено, что соотношения V_p , V_s , V_p/V_s земной коры выражают проявления флюидов, частичного плавления, высоких давлений и других явлений на изучаемом участке Тянь-Шаня. Наиболее вероятные проявления флюидов наблюдаются на глубинах проникновения лучей взрывов около 11–16 км. Промежуток времени между наиболее вероятными проявлениями, в частности, 08.01.2017 г., 28.01.2017 г., 02.02.2017 г. и 07.07.2017 г., составляет около 20, 5 и 155 суток. Наиболее вероятные проявления частичного плавления отмечены на глубинах проникновения лучей взрывов около 12–13 км. Промежуток времени между наиболее вероятными проявлениями частичного плавления, в частности, 10.01.2017 г., 22.01.2017 г., 31.01.2017 г. и 20.05.2017 г., составляет около 12, 9, 109 суток. Наиболее вероятные проявления высоких давлений выделены на глубинах проникновения лучей взрывов около 23–35 км. Промежуток времени между наиболее вероятными проявлениями высоких давлений, в частности, 16.01.2017 г., 23.01.2017 г., 24.01.2017 г. и 04.02.2017 г., составляет около 7, 1 и 10 суток.

11. Отмечено явление динамического модуля сжатия, модуля сдвига, сейсмического параметра, коэффициента Пуассона в земной коре, зависящего от частоты геодинамических процессов, а именно: в циклах, например, третьего порядка с относительно высокой частотой отмечаются сравнительно малые величины модулей (физических параметров среды), а в циклах второго и первого порядков с относительно низкой частотой – сравнительно большие величины модулей.

12. Поглощение сейсмических волн определяется физическими параметрами и состояниями среды.

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 // ДАН. – 2001. – Т. 381, № 6. – С. 822–824.
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

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., Омуралиева А. Явление скачкообразного изменения строения литосферы во время и после крупномасштабного взрыва. – Кыргызпатент, 2011. – № 1616.

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 массопереносакустического эффектов в геологических процессах литосферы // Известия АН Киргизской ССР. – 1987. – № 4. – С. 44–49.

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 внутриматериковых 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.

Рид Г.Д., Вонг Д., Рапони Т.Р. и др. Технический отчет по руднику «Кумтор» (Кыргызская Республика) NI 43-101 от 20 марта 2015 г. – Компания «Центerra Голд Инк.» – Рудник «Кумтор», 2015. – 329 с.

Юдахин Ф.Н. Геофизические поля, глубинное строение и сейсмичность Тянь-Шаня. — Фрунзе: Илим, 1983. — 248 с.

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.

Lahr J.C. HYPOELLIPSE: A Computer Program for Determining Local Earthquake Hypocentral Parameters, Magnitude, and First-Motion Pattern. Open File Report 99-23. Version 1.1 USGS. — URL: https://pubs.usgs.gov/of/1999/ofr-99-0023/HYPOELLIPSE_Full_Manual.pdf

Nakajima J., Matsuzawa T., Hasegawa A., Zhao D. 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. — 2001. — V. 106. — P. 21843–21857.

Omuraliev M., Omuralieva A. Late Cenozoic tectonics of the Tien Shan. — Bishkek: Ilim, 2004. — 166 p.

Williamson E.D., Adams L.H. Density distribution in the Earth // Journal of the Washington Academy of Sciences. — 1923. — V. 13, N 19. — P. 413–428. — URL: https://www.jstor.org/stable/24532814?seq=1#metadata_info_tab_contents

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.

Сведения об авторах

Омурбек кызы Канышай, аспирант, инженер I кат. Института сейсмологии Национальной академии наук Кыргызской Республики (ИС НАН КР), г. Бишкек, Кыргызская Республика. E-mail: kanyshaj.omurbekkyzy@bk.ru

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

Seismic monitoring of explosions in the Central site of the Kumtor deposit, Tien Shan

© 2020 K. Omurbek kyzy, M. Omuraliev

IS NAS KR, Bishkek, Kyrgyz Republic

Abstract Seismic monitoring of explosions was carried out at the local area of the Central site of the Kumtor deposit for January 2017 - January 2018. Velocities of seismic longitudinal and transverse waves, their ratios (V_p , V_s , V_p/V_s), maximum amplitudes and their ratios (A_p , A_s , A_s/A_p) were studied, and average values with standard deviation values were determined, and hierarchies of cycles are distinguished in their variations in time. It is noted that the ratios of V_p , V_s , V_p/V_s reflect the state of the crust medium, small values of V_p , V_s , V_p/V_s express possible manifestation of fluids, and large value of the ratio V_p/V_s – possible manifestation of partial melting, large values of V_p , V_s – possible manifestation of relatively high pressures. Physical parameters of the medium are estimated: seismic parameter Φ , Poisson's ratio, shear modulus, and bulk modulus. It is established that these physical parameters are dynamic parameters that depend on the frequency of geodynamic processes, namely, in cycles, for example, of the third order with a relatively high frequency, relatively small values of modules (physical parameters of the medium) are observed, and in cycles of the second and first orders with a relatively low frequency, relatively large values of modules are observed. Changes in the values of A_p , A_s , A_s/A_p , and the degree of seismic waves' absorption are predetermined by physical parameters and the state of the medium. Change in the penetration depth of seismic waves from an explosion is noted in the range of about 8-35 km.

Keywords Explosion, longitudinal and transverse waves, velocity of seismic waves, cycle variations of seismic waves parameters, hierarchy of cycles, seismic parameter, Poisson's ratio, shear modulus (modulus of rigidity), bulk modulus, seismic waves' absorption.

For citation 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: <https://doi.org/10.35540/2686-7907.2020.4.08>

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.).
- 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 traveltime data. *Doklady Earth Sciences*, 381A, 1119-1121.
- 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.
- 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 seismichnost'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 Akademii nauk SSSR* [Doklady Earth Sciences], 266, 1349-1353. (In Russ.).
- Lahr, J.C. (2012). HYPOELLIPSE: A Computer Program for Determining Local Earthquake Hypocentral Parameters, Magnitude, and First-Motion Pattern. *Open File Report 99-23*. Version 1.1 USGS. Retrieved from https://pubs.usgs.gov/of/1999/ofr-99-0023/HYPOELLIPSE_Full_Manual.pdf
- 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
- 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*, 106, 21843-21857.
- Omuraliev, M., & Omuralieva, A. (2011). [Phenomenon of a jump-like change in the structure of the lithosphere during and after a large-scale explosion]. Patent Kyrgyzstan, 1616. (In Russ.).
- 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* [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., & 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.).
- Omuralieva, A., & Omuraliev, M. (2012). [Kumtor explosions and change in the state of the crust and upper mantle in real time]. In *Izvestija VUZov* [Bulletin of universities of Kyrgyzstan], 6, 80-87. (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 *Materialy V Mezhdunarodnoi seismologicheskoi shkoly "Sovremennye metody obrabotki i interpretatsii seismologicheskikh dannyykh"* [Proceedings of the V International Seismological Workshop "Modern Methods of Processing and Interpretation of Seismological Data"] (pp. 73-76). Obninsk, Russia: GS RAS Publ. (In Russ.).
- Rid, G.D., Vong, D., Raponi, T.R., et al. (2015). *Tekhnicheskij otchjot po rudniku «Kumtor» (Kyrgyzskaja Respublika) NI 43-101 ot 20 marta 2015 g.* [Kumtor Mine Technical Report (Kyrgyz Republic) NI 43-101 dated March 20, 2015]. Kumtor mine, Kyrgyzstan: Centerra Gold Inc. Publ., 329 p. (In Russ.).
- Williamson, E.D., & Adams, L.H. (1923). Density distribution in the Earth. *Journal of the Washington Academy of Sciences*, 13(19), 413-428. Retrieved from https://www.jstor.org/stable/24532814?seq=1#metadata_info_tab_contents
- 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 Tien-Shan. *Geochemical Journal*, 52(1), 59-67.
- Yudakhin, F.N. (1983). *Geofizicheskie polia, glubinnoe stroenie i seysmichnost' Tian'-Shania* [The geophysical fields, deep structure and seismicity of the Tien Shan]. Frunze, Kyrgyzstan: Ilim Publ., 248 p. (In Russ.).

Information about authors

Omurbek kyzy Kanyshtai, Graduate Student, Cat. I Engineer of the Institute of Seismology of the National Academy of Sciences of the Kyrgyz Republic (IS NAS KR), Bishkek, Kyrgyz Republic. E-mail: kanyshtai.omurbekkyzy@bk.ru.

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