

ОЦЕНКА ИНТЕНСИВНОСТИ СЕЙСМИЧЕСКИХ НАГРУЗОК ОТ ВЗРЫВНЫХ РАБОТ НА ОХРАНЯЕМЫЕ ОБЪЕКТЫ НАКЫНСКОЙ НЕФТЕБАЗЫ

*И.Ф. Бондаренко, С.В. Ковалевич, Р.Я. Никитин,
Якутский научно-исследовательский и проектный институт алмазодобывающей промышленности
«Якутнипроалмаз» АК «АЛРОСА» (ПАО), г. Мирный, Республика Саха (Якутия), Россия*

Аннотация: С целью оценки интенсивности сейсмических нагрузок от взрывных работ на углубленный фундамент с установленными на них стальными вертикальными резервуарами РВС-2000 для хранения нефтепродуктов в 2021 году авторами был выполнен инструментальный замер колебаний грунта на основании охраняемых объектов. При этом с помощью сейсмометрических методов была определена фактическая нагрузка на охраняемые объекты по шкале сейсмической интенсивности MSK-64 в натурных условиях производства БВР на карьерах Мирнинско-Нюрбинского горно-обогатительного комбината (МНГОК). По результатам проведенных исследований были разработаны рекомендации по определению параметров БВР, обеспечивающих сейсмическую безопасность резервуаров РВС-2000 Накынской нефтебазы.

Ключевые слова: буровзрывные работы (БВР), сейсмическая скорость колебания грунта, шкала сейсмической интенсивности MSK-64.

Для цитирования: Бондаренко И.Ф., Ковалевич С.В., Никитин Р.Я. Оценка интенсивности сейсмических нагрузок от взрывных работ на охраняемые объекты Накынской нефтебазы // Маркшейдерия и недропользование. 2023. №6. С. 68-76. DOI: 10.56195/20793332_2023_6_68_76.

ASSESSMENT OF THE INTENSITY OF SEISMIC LOADS FROM BLASTING OPERATIONS ON THE PROTECTED FACILITIES OF THE NAKYN OIL DEPOT

*I.F. Bondarenko, S.V. Kovalevich, R.Ya. Nikitin,
Yakutniproalmaz Research and Design Institute of Diamond Mining Industry, PJSC «ALROSA», Mirny,
Republic of Sakha (Yakutia), Russia*

Abstract: In order to assess the intensity of seismic loads from blasting operations on a deep foundation of vertical steel tanks RVS-2000 installed in 2021 for storing petroleum products, the authors performed instrumental measurement of ground vibrations at the foundations of the protected facilities. The actual load on protected facilities was determined using seismometric methods, according to the MSK-64 seismic intensity scale in full-scale conditions of drilling and blasting operations at the Mirny-Nyurba MPD open pits. Based on the results of the study, recommendations were developed to determine the parameters of the drilling and blasting operations that ensure the seismic safety of the RVS-2000 tanks of the Nakyn oil depot.

Keywords: drilling and blasting operations (DBO), seismic velocity of ground motion, MSK-64 seismic intensity scale.

For citation: Bondarenko I.F., Kovalevich S.V., Nikitin R.Ya. Assessment of the intensity of seismic loads from blasting operations on the protected facilities of the Nakyn oil depot. Surveying and subsoil use. 2023;(6): С. 68-76. DOI: 10.56195/20793332_2023_6_68_76.

В ходе проведения исследований взрывные работы на кимберлитовых карьерах «Нюрбинский» и «Ботубинский» производились на расстояниях 700 и более метров от промплощадки Накынской нефтебазы.

В этой связи актуальной являлась инструментальная оценка интенсивности сейсмических нагрузок от взрывных работ на фундамент резервуаров РВС-2000 Накынской нефтебазы с целью предупреждения разрушений в их конструкции.

Процесс разрушения горных пород - это результат развития естественных статистически распределенных в массиве микро- макротрещин, так как обычно реализуемая при взрывах штатных химических взрывчатых веществ (ВВ) энергия на два-три порядка ниже той энергии, которая необ-

ходима для создания в среде новых трещин с нарушением сил молекулярного сцепления. Поскольку при разрушении горных пород процесс развития трещин является определяющим, то изучению его параметров и должно быть уделено больше внимания.

Известно, что горные породы деформируются главным образом хрупко. Однако при хрупком по внешним признакам разрушении развитию трещин сопутствует некоторая пластическая деформация [1]. Следовательно, разрушение горных пород может быть как хрупким, так и пластичным, что зависит от внутреннего строения среды, характера и условий возникновения и распространения трещин, скорости нагружения и скорости деформации. Поэтому процесс хрупкого или пластического поведения пород при взрыве должен

быть увязан, прежде всего, с их упругопластическими свойствами.

Хрупкое разрушение происходит почти мгновенно после достижения максимального значения внешних усилий и возникновения начальной трещины, когда напряжение сразу же падает с максимума до нуля.

Пластическое разрушение развивается постепенно с падением напряжений, что часто приводит к разгрузке среды, предохраняя ее от окончательного разрушения. В связи с этим, к хрупким должны быть отнесены породы, характеризующиеся высокой скоростью деформации, к пластичным — породы, характеризующиеся низкой скоростью деформации.

Данные, полученные К. Б. Бробергом [2] и Е. А. Кузьминым [3] при исследовании процессов развития трещин, показывают, что скорость роста трещин прямо пропорциональна скорости продольных волн и зависит не только от упругих, но и прочностных свойств среды, которые определяются, прежде всего, ее «дефектностью»: с изменением начальной трещиноватости среды ее сопротивление растяжению резко снижается. Следовательно, начальную трещиноватость среды, определяющую ее «дефектность» и прочность, можно рассматривать как основной критерий склонности пород к разрушению.

Также данные исследования свидетельствуют о наличии некоторой предельной и постоянной скорости развития трещин в твердых телах [4]. В том случае, когда скорость распространения трещины становится несколько выше критической, направление ее распространения перестает быть направлением максимального разрывающего напряжения, и трещина начинает искривляться. Установлено, что предельным значением равномерного и устойчивого распространения трещин с постоянной скоростью является скорость волн Релея, определяемая как:

$$C_R \approx 0,92 \sqrt{\frac{(1-2\mu)}{2(1-\mu)}} C_p, \quad (1)$$

где C_p — скорость продольных волн в среде; μ — коэффициент Пуассона.

При превышении скоростью роста трещин скорости волн Релея на концах ее начинается формироваться некомпенсированное поле напряжений и скорость ее резко снижается.

Физически равномерное и устойчивое распространение трещин с постоянной скоростью, близкой к скорости волн Релея, реализуется в режиме, соответствующем предельной скорости перевода упругой энергии, накопленной средой, в поверхностную энергию трещин. Это достигается в том случае, когда удельная плотность энергии соответствует некоторой критической величине, а интенсивность ее подвода к вершине трещины несколько превышает скорость расхода упругой энергии на ее рост (рис. 1).

Анализ результатов экспериментальных исследований [1] показывает (рис. 1), что критическое значение удельной плотности энергии прямо пропорционально акустической жесткости ($\bar{A} = \rho \times C_p$, кг/м³×м/с) разрушаемой среды. На основании проведенных исследований это предельное критическое значение энергии ВВ может быть определено как

$$q = \frac{0,125 \rho C_p}{Q_V}, \text{ кг/м}^3, \quad (2)$$

где q — удельный расход ВВ, кг/м³; Q_V — потенциальная энергия ВВ, кгс×м/кг; $\rho \times C_p$ — акустическая жесткость пород, кг/м³×м/с.

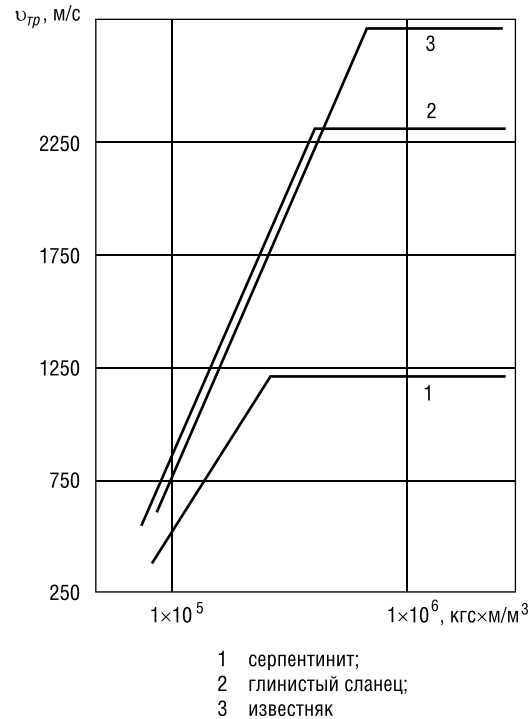


Рис. 1. Изменение скорости роста трещин в зависимости от удельной плотности энергии разрушения при: 1 — серпентинит; 2 — глинистый сланец; 3 — известняк /

Fig. 1. Change in fracture propagation rate depending on the specific density of crushing energy: 1 — serpentinite; 2 — argillaceous slate; 3 — limestone

Также в результате анализа известных достоверных случаев повреждения охраняемых объектов установлено, что из всех элементов сейсмической волны (амплитуда смещения, скорость смещения, ускорение, период и т.д.) лучше всего коррелирует с начальным повреждением массива величина векторной скорости смещения грунта у основания объекта [1].

Векторная скорость ($\dot{v}$) является характеристикой поверхностной плотности сейсмической энергии, которая, как всякая энергия, подчиняясь известному закону сохранения, в меньшей степени изменяется в зависимости от свойств среды, чем другие параметры.

Таким образом, общий принцип охраны сооружений определяется соотношением:

$$\dot{v} \leq \dot{v}_{дон}, \quad (3)$$

где $\dot{v}$ и $\dot{v}_{дон}$ — соответственно, фактическая (расчетная) и предельно допустимая скорость колебания грунта в основании охраняемого объекта при взрывах, см/с.

Фактическое значение скорости колебания грунта в основании охраняемого объекта определяется экспериментальным путем.

На практике для определения скоростей смещения пользуются максимальной векторной скоростью колебаний грунта, которая не является мгновенной в данной точке, а достигает максимальных значений в разных составляющих (X, Y, Z) неодновременно:

$$v_{\text{век}}^{\text{max}} = \sqrt{v_x^2 + v_y^2 + v_z^2}, \quad (4)$$

где v_x^2 , v_y^2 и v_z^2 — максимальные мгновенные скорости по соответствующим направлениям (определяются путем непосредственных замеров сейсмического эффекта взрывов по записям скоростей колебаний), см/с.

Допустимые скорости колебаний для гражданских и промышленных зданий и сооружений определяются на основании специальной шкалы сейсмической интенсивности, разработанной для оценки последствий землетрясений, применимой с известным коэффициентом надежности и для оценки последствий взрывов [5-7]. При этом допустимая скорость колебаний зависит от назначения и состояния зданий и сооружений того или иного класса.

Интенсивность сейсмических воздействий в баллах (сейсмичность) для района строительства следует принимать на основе комплекта карт общего сейсмического районирования территории Российской Федерации согласно СП 14.13330.2018 «Строительство в сейсмических районах. Актуализированная редакция СНиП II-7-81»* (с Изменениями N 2, 3), которая для данного района соответствует 5 баллам.

Связь между балльностью (магнитудой) и кинематическими элементами движения почвы (смещения, скорости, ускорения), строго говоря, для каждого из сейсмических регионов своя. В настоящее время преимущественно пользуются шкалой MSK-64. По этой шкале 5 баллов соответствует 1-2 см/с предельно допустимой скорости (среднее значение 1,5 см/с).

Аппаратурное оснащение



Рис. 2. Регистратор «Байкал-АСН» / Fig. 2. Baikal-ASN recording apparatus

Для замеров в натурных условиях использовались регистраторы серии «Байкал-АСН», представляющие собой 3-ка-

нальные автономные сейсмические станции расширенного частотного диапазона с внутренним модулем GPS, каналом USB 2.0 для связи с компьютером и внутренней памятью на основе FLASH- или SD-карт (рис. 2).

Объект исследования

Объектом исследований являлся заглубленный фундамент резервуаров РВС-2000, а также сейсмические колебания грунта у основания объектов, возникающих в результате производства взрывных работ на карьерах МНГОК.

Ситуационный план исследуемых сооружений приведен на рис. 3.

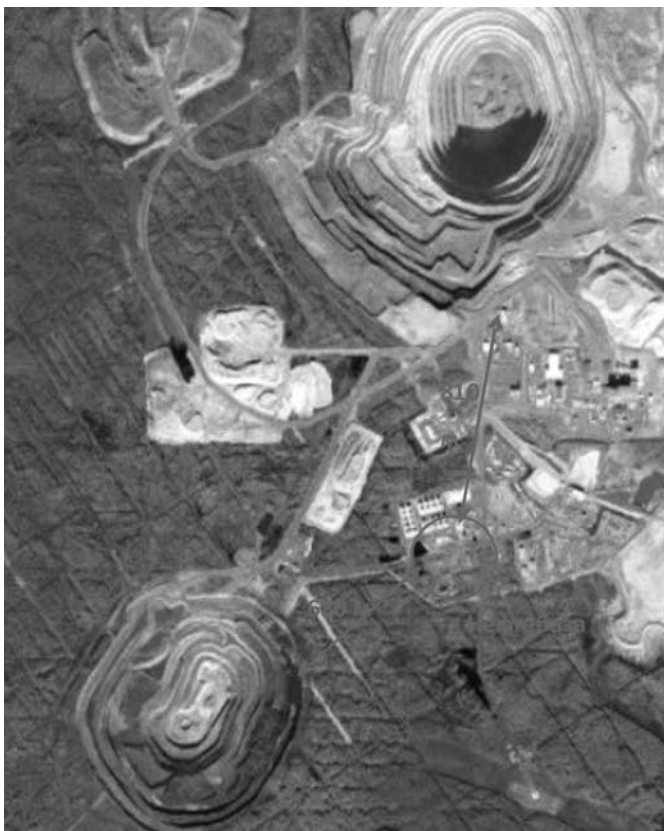


Рис. 3. Ситуационный план расположения объектов исследования / Fig. 3. Site layout plan with the objects of the study Нефтебаза - oil depot

Обработка и анализ экспериментальных данных

С целью определения сейсмической нагрузки на основание фундамента ближнего резервуара Накынской нефтебазы от места производства взрывных работ были выполнены опытно-промышленные взрывы блока 69Б-20 на гор. +235 карьера «Ботуобинский» и блока 134Н-20 гор. +130 карьера «Нюрбинский».

Расположение пунктов наблюдения (ПН) и места проведения взрывных работ приведены на рис. 4 и 5.

Основные параметры БВР были следующие: диаметр скважин — 230 мм, высота уступа — 15 м, расстояния между скважинами — 7,5 м, вес заряда — 460 кг, общий вес эмульсионных ВВ — 88 т, инициирование осуществлялось неэлектрическими системами «ИСКРА» с номиналом замедления 450 мс внутрискважинное и 42 мс поверхностное.

Инструментальные замеры сейсмического воздействия на фундамент резервуаров Накынской нефтебазы в результате взрыва блока 69Б-20 на карьере «Ботуобинский» проводи-



Рис. 4. Ситуационный план расположения взрывного блока 685-20 /
Fig. 4. Layout of the 685-20 blasting block ПН - observation point, расстояние 840,87 м (2 758,77 фут.) - 840.87 m (2,758.77 ft) distance



Рис. 5. Ситуационный план расположения взрывного блока 134H-20 /
Fig. 5. Layout of the 134H-20 blasting block: ПН - observation point, фабрика ОФ 16 - Processing plant #16, расстояние 1,90 км - 1.9 km (1,18 miles) distance



Рис. 6. Общий вид расположения пункта наблюдения /
Fig. 6. General view of the observation point location. ПН - observation point

лись 30.11.2021 в 16 ч 10 мин. При этом пункт наблюдения (ПН) при регистрации сейсмических воздействий взрыва располагался на основании фундамента резервуара (бетонная плита), который находился на наименьшем расстоянии со стороны взрывных работ. Необходимо отметить, что наибольшая интенсивность сейсмической волны на остальные резервуары будет равной или меньше инструментально зарегистрированных значений.

Общий вид расположения ПН приведен на рис. 6.

Обработка и анализ экспериментальных данных осуществлены с помощью специализированного программного обеспечения, которое позволяет интегрировать данные по ускорению с применением фильтров Поттера и Баттерворда, а также проводить спектральный анализ с целью получения несущей частоты колебаний грунта. На рис. 7 и в табл. 1 приведены результаты обработки и анализа экспериментальных данных.

При расчетах с целью определения скоростей смещения пользуются максимальной векторной скоростью колебаний грунта (4), которая не является мгновенной в данной точке,

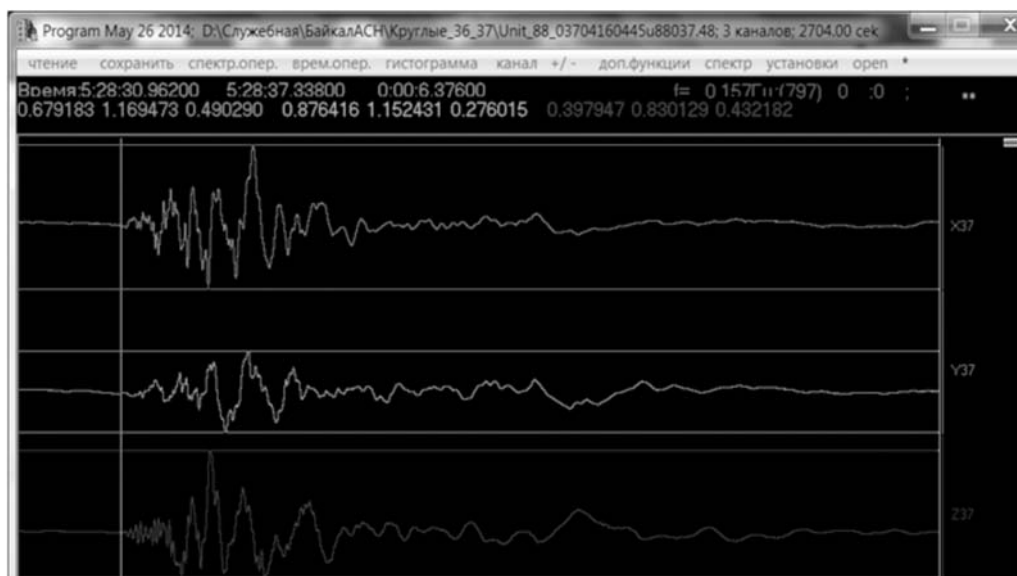


Рис. 7. Велосиграма колебаний грунта по осям X, Y и Z / Fig. 7. Velocigram of ground vibrations along the X, Y and Z axes

а достигает максимальных значений в разных составляющих (X, Y, Z) неодновременно.

Таблица 1 / Table 1

Результаты обработки и анализа экспериментальных данных по блоку 69Б-20 /
Results of experimental data processing and analysis for the 69Б-20 block

№ пп./ No.	Наименование/ Description	Значения/ Value
1	Макс. амплитуда скорости колебания по оси X, мм/с / Max. amplitude of vibration velocity along the X axis, mm/s	4,44
2	Макс. амплитуда скорости колебания по оси Y, мм/с / Max. amplitude of vibration velocity along the Y axis, mm/s	2,98
3	Макс. амплитуда скорости колебания по оси Z, мм/с / Max. amplitude of vibration velocity along the Z axis, mm/s	3,64
4	Векторная сумма скоростей Uxyz, мм/с / Vector sum of velocities Uxyz, mm/s	5,21
5	Преобладающая спектральная частота волны f, Гц / Predominant spectral wave frequency f, Hz	13,5
6	Макс. смещение упругого колебания по оси X, мм / Max. displacement of elastic vibration along the X axis, mm	0,040
7	Макс. смещение упругого колебания по оси Y, мм / Max. displacement of elastic vibration along the Y axis, mm	0,042
8	Макс. смещение упругого колебания по оси Z, мм / Max. displacement of elastic vibration along the Z axis, mm	0,043
9	Расстояние от взрыва до пункта наблюдения, м / Distance from the blasting to observation point, m	840,00
10	Суммарный вес в группе зарядов, кг / Total weight in a group of charges, kg	2305,00
11	Вес заряда в скважине, кг / Weight of the charge in the blast hole, kg	461,00
12	Максимальное количество скважин в группе, шт. / Maximum number of blast holes in a group	5,00
13	Интервал замедления между скв. и рядами, мс / Deceleration interval between blast holes and rows, ms	42,00
14	Общая продолжительность взрыва, с / Total duration of the blast, s	3,63

Сопоставление инструментальных данных скорости колебаний грунта со шкалой сейсмической интенсивности MSK-64 осуществляется с помощью табл. 2.

Согласно результатам обработки и анализа экспериментальных данных (табл. 1) векторная сумма скорости колебаний составила 5,21 мм/с или 0,52 см/с. Таким образом, сейсмическая интенсивность в результате взрыва блока 69Б-20 на гор. +235 карьера «Ботубинский» составила 3?4 балла по шкале MSK-64.

Инструментальные замеры сейсмического воздействия на фундамент резервуаров Накынской нефтебазы от взрыва блока 134Н-20 в карьере «Нюрбинский» проводились 04.12.2021 в 16 ч 00 мин.

Таблица 2 / Table 2

Соотношение балльности шкалы сейсмической интенсивности и скорости смещения колебаний / The relationship between the seismic intensity scale and the vibration displacement rate

I, балл MSK-64/I, point MSK-64	V, см/с (MSK-64)/ V, sm/s (MSK-64)	
	I	II
1	-	0,12
2	0,18	0,12-0,25
3	0,37	0,25-0,5
4	0,75	0,5-1
5	1,5	1-2
6	3	2-4
7	6	4-8
8	12	8-16
9	24	16-32

Общий вид расположения сейсмодатчика представлен на рис. 8.



Рис. 8. Расположение сейсмодатчика в ПН / Fig. 8. Location of the seismic sensor at the observation point

Полученная по результатам обработки и анализа экспериментальных данных (табл. 3) векторная сумма скорости колебаний составляет 0,8 мм/с или 0,08 см/с. Таким образом, сейсмическая интенсивность в результате взрыва блока 134Н-20 на гор. +130 карьера «Нюрбинский» составила 1 балл по шкале MSK-64.

Однако, если пропорционально перенести данный взрыв на максимально близкие расстояния карьера «Нюрбинский» (810 м от ближнего резервуара нефтебазы) и учесть повышающий коэффициент, равный 3 при сравнении объемного взрыва на рыхление с контурным, то получим максимально возможное значение скорости колебания грунта в ПН, равное 0,44 см/с или 3 баллам по шкале сейсмической интенсивности MSK-64.

Спектральный анализ

Спектральный анализ сейсмических сигналов в пунктах наблюдения приведен на рис. 9 и 10.

Таблица 3 / Table 3

Результаты обработки и анализа экспериментальных данных
по блоку 134Н-20 /
Results of experimental data processing and analysis
for the 134Н-20 block

№ пп./ No.	Наименование/ Description	Значения/ Value
1	Макс. амплитуда скорости колебания по оси X, мм/с / Max. amplitude of vibration velocity along the X axis, mm/s	0,56
2	Макс. амплитуда скорости колебания по оси Y, мм/с / Max. displacement of elastic vibration along the Y axis, mm	0,79
3	Макс. амплитуда скорости колебания по оси Z, мм/с / Max. displacement of elastic vibration along the Z axis, mm	0,62
4	Векторная сумма скоростей Uxyz, мм/с / Vector sum of velocities Uxyz, mm/s	0,80
5	Преобладающая спектральная частота волны f, Гц / Predominant spectral wave frequency f, Hz	8,9
6	Макс. смещение упругого колебания по оси X, мм / Max. displacement of elastic vibration along the X axis, mm	0,012
7	Макс. смещение упругого колебания по оси Y, мм / Max. displacement of elastic vibration along the Y axis, mm	0,030
8	Макс. смещение упругого колебания по оси Z, мм / Max. displacement of elastic vibration along the Z axis, mm	0,020
9	Расстояние от взрыва до пункта наблюдения, м / Distance from the blasting to observation point, m	1900,00
10	Суммарный вес в группе зарядов, кг / Total weight in a group of charges, kg	2340,00
11	Вес заряда в скважине, кг / Weight of the charge in the blast hole, kg	36,00
12	Максимальное количество скважин в группе, шт. / Maximum number of blast holes in a group	65,00
13	Интервал замедления между скв. и рядами, мс / Deceleration interval between blast holes and rows, ms	0,00
14	Общая продолжительность взрыва, мс / Total duration of the blast, s	30,00

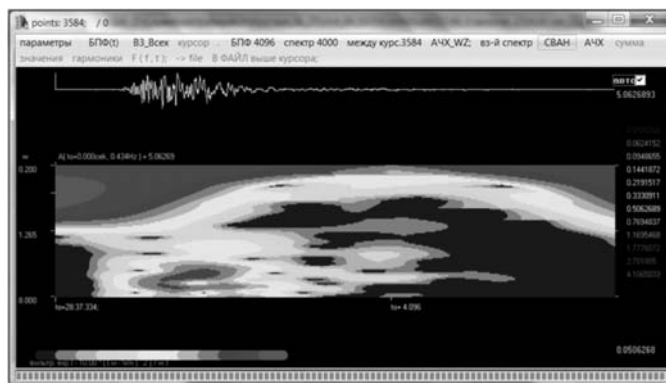


Рис. 9. Полный спектр сейсмического сигнала по блоку 695-20 /

Fig. 9. Full spectrum of seismic signal for the 695-20 block

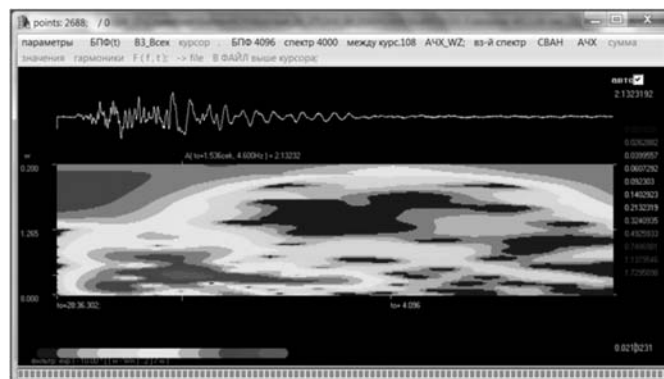


Рис. 10. Полный спектр сейсмического сигнала по блоку 134Н-20 /

Fig. 10. Full spectrum of seismic signal for the 134Н-20block

В результате спектрального анализа полученных сейсмических сигналов можно определить несущую частоту волны, как частоту волны, которая при распространении в массиве горных пород несет с собой наибольшую интенсивность и энергию разрушения [8-11].

В ходе данных сейсмических исследований был построен сравнительный график по спектрам сигналов в соответствующих пунктах наблюдения, который приведен на рис. 11.



Рис. 11. Сравнительный график спектров сейсмического сигнала:

амплитуда сигнала, дсскр; спектр сигналов по датчикам; датчик; частота сигнала, Гц; /

Fig. 11. Comparative graph of seismic signal spectra: signal amplitude, dscr; spectrum of sensors signals; sensor, signal frequency, Hz

На рис. 11 можно наблюдать совпадение максимумов спектра частот от разных сейсмических датчиков, установленных на удалении друг от друга на разных пунктах наблюдения, что подтверждает наличие постоянной несущей частоты сейсмической волны на всем ее распространении по массиву горных пород. Значение 4,51 Гц является несущей частотой сейсмических волн в результате массовых взрывов в карьере «Нюрбинский» и «Ботубинский», из чего следует, что до 80 % разрушающей энергии сейсмической волны приходится на данную частоту. Таким образом, учитывая полученную несущую частоту, необходимо избегать значений отдельных или суммарных замедлений между скважинами или группами скважин, равных 220 ± 5 мс, с целью исключения эффекта наложения сейсмических волн от разных групп замедлений скважин, а также использовать другие

методы снижения сейсмической опасности взрывных работ [12-20].

Заключение

В результате проведенных исследований было установлено следующее:

- 1) интенсивность воздействия взрывных работ на охраняемые объекты не превышает 4 баллов по шкале MSK-64;
- 2) исследования геологических условий района показали отсутствие участков с повышенной проводимостью сейсмических волн от мест производства взрывов до охраняемых объектов;
- 3) анализ экспериментальных данных показал, что вступление собственных частот колебания бортов карьера в резонанс с преобладающими частотами сейсмических возмущений грунта от массовых взрывов является случайным и маловероятным событием;
- 4) при выборе интервалов замедлений рекомендуется избегать значений отдельных или суммарных замедлений между

скважинами или группами скважин, равных 220 ± 5 мс, с целью исключения вероятности наложения амплитуд сейсмических волн от соседних групп скважин, а также необходимо обеспечить поскважинную последовательность взрывания путем выбора различающихся значений интервалов замедлений между скважинами и их рядами;

5) для обеспечения максимального эффекта снижения интенсивности сейсмического воздействия взрывов на охраняемые объекты рекомендуется при монтаже поверхностной взрывной сети применять разные интервалы замедления между скважинами и их рядами.

Выводы

Результаты выполненной работы используются при обеспечении сейсмической безопасности заглубленных фундаментов резервуаров РВС-2000 Накынской нефтебазы за счет использования максимального эффекта снижения интенсивности воздействия взрывов на карьерах МНГОК. ■

ЛИТЕРАТУРА

1. Мосинец В.Н. Дробящее и сейсмическое действие взрыва в горных породах. М.: «Недра», 1976. 271 с.
2. Броберг К.Б. Ударные волны в упругой и упругопластической среде. М.: Госгортехиздат, 1959. 116 с.
3. Кузьмин Е.А., Пух В.П. Скорость роста хрупкой трещины в стекле и канифоли. - В кн.: «Некоторые проблемы прочности твердого тела», М.-Л.: «Наука», 1959. С. 367-374.
4. Мосинец В.Н., Богацкий В.Ф. Основные научно-технические проблемы сейсмики ближней зоны // Взрывное дело. 1983. №85/42. М.: «Недра», 1983. 89-101 с.
5. Ганопольский М.И., Пупков В.В., Ненахов И.А., Фоменкова В.Е. Обоснование сейсмобезопасных условий производства взрывных работ // Взрывное дело. 2015. №113/70. С. 347-364.
6. Куликов В.И., Дмитриев А.Ю., Галушко Ф.И. Сейсмическое действие БВР с электронной системой инициирования // Взрывное дело. 2015. №113/70. С. 366-382.
7. Шубин Г.В., Заровняев Б.Н., Бондаренко И.Ф., Хон В.И. Инженерные мероприятия обеспечения безопасности при взрывном разрушении горных пород на этапе доработки сверхглубокого карьера «Удачный» // Взрывное дело. 2015. №113/70. С. 384-396.
8. Yuguang Ji, Mingyang Wang, Jie Li, Shuxin Deng, Zhihao Li, Tianhan Xu, Fei Gao. «A laboratory method to simulate seismic waves induced by underground explosions» // Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering // Volume 14, Issue 5, October 2022, P. 1514-1530.
9. S. Ziaran, M. Musil, M. Cekan, O. Chlebo. «Analysis of Seismic Waves Generated by Blasting Operations and their Response on Buildings» // World Academy of Science, Engineering and Technology International Journal of Environmental and Ecological Engineering Vol:7, No:11, 2013.
10. Lung Sang Chan, Walter Alvarez. «Natural explosion structures in rocks» // Journal of Structural Geology, Volume 174, September 2023, 104933.
11. Yanbing Wang, Zhijie Wen, Guoqing Liu, Jianguo Wang, Zhouqi Bao, Keqin Lu, Dongchen Wang, Baozhu Wang. «Explosion propagation and characteristics of rock damage in decoupled charge blasting based on computed tomography scanning» // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, Volume 136, December 2020, 104540.
12. Holub K., Rusajova J. Regularity of particle velocity decrease with scaled distance for rockbursts and shot holes // Acta Montanistica Slovaca. 2015. Vol. 20. No. 2. P. 80-85.
13. Oncu M. E., Yon B., Akkoyun O., Taskiran T. Investigation of blast-induced ground vibration effects on rural buildings // Structural Engineering and Mechanics. 2015. Vol. 54. No.3. P. 545-560.
14. Woodward K., Wesseloo J. Observed spatial and temporal behaviour of seismic rock mass response to blasting // Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy. 2015. Vol. 115. No. 11. P. 1044-1056.
15. Cardu M., Seccatore J., Vaudagna A., Rezende A., Galvao F. et al. Evidences of the influence of the detonation sequence in rock fragmentation by blasting. Part I // REM: Revista Escola de Minas. 2015. Vol. 68. No. 3. P. 337-342.
16. Эквист Б.В. Повышение безопасности короткозамедленного взрывания // ГИАБ. 2017. № 5. С. 389-394.
17. Оника С.Г. Взрывы вблизи объектов. Минск: Тэхналогія, 2006. 183 с.
18. Белин В.А., Горбонос М.Г., Астахов Е.О. Влияние средств инициирования на эффективность и безопасность взрывных работ // Горный журнал. 2017. № 7. С. 63-67.
19. Оника С.Г., Орловский В.Ч., Халявкин Ф.Г., Гец А.К. Обеспечение сейсмической безопасности массовых взрывов на карьере природного камня // Горный журнал. 2020. № 11. С. 32-36.
20. Бондаренко И.Ф., Жариков С.Н., Зырянов И.В. и др. Буровзрывные работы на кимберлитовых карьерах Якутии / Екатеринбург: ИГД УрО РАН, 2017. 172 с.

REFERENCES

1. Mosinets V. N. Crushing and seismic effect of explosion in rocks. M.: Nedra, 1976. 271 p.
2. Broberg K. B. Shock waves in elastic and elastoplastic media. M.: Gosgortekizdat, 1959. 116 p.
3. Kuz'min E. A., Pukh W. P. Growth rate of brittle cracks in glass and rosin. - In.: Some problems of solid strength, M.-L.: Nauka, 1959. pp. 367-374.
4. Mosinets V. N., Bogatskii W. F. Main scientific and technical problems of near-field seismic // Vzryvnoye Delo. 1983. №85/42. M.: Nedra, 1983. 89-101 p.
5. Ganopolskii M. I., Pupkov V. V., Nenakhov I. A., Fomenkova B. E. Justification of seismically safe conditions for blasting operations // Vzryvnoye Delo. 2015. №113/70. pp. 347-364.
6. Kulikov V. I., Dmitriyev A. Yu., Galushko F. I. Seismic impact of drilling and blasting operations using electronic initiation system // Vzryvnoye Delo. 2015. №113/70. pp. 366-382.
7. Shubin G. V., Zarovniyev B. N., Bondarenko I. F., Khon B. I. Engineering measures to ensure safety during rocks blasting operations at the stage of completion of ultra-deep Udachny open pit // Vzryvnoye Delo. 2015. №113/70. pp. 384-396.
8. Yuguo Ji, Mingyang Wang, Jie Li, Shuxin Deng, Zhihao Li, Tianhan Xu, Fei Gao. A laboratory method to simulate seismic waves induced by underground explosions // Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering // Volume 14, Issue 5, October 2022, pp. 1514-1530.
9. S. Ziaran, M. Musil, M. Cekan, O. Chlebo. Analysis of Seismic Waves Generated by Blasting Operations and their Response on Buildings // World Academy of Science, Engineering and Technology International Journal of Environmental and Ecological Engineering Vol: 7, No:11, 2013.
10. Lung Sang Chan, Walter Alvarez. Natural explosion structures in rocks // Journal of Structural Geology, Volume 174, September 2023, 104933.
11. Yanbing Wang, Zhijie Wen, Guoqing Liu, Jianguo Wang, Zhouqi Bao, Keqin Lu, Dongchen Wang, Baozhu Wang. Explosion propagation and characteristics of rock damage in decoupled charge blasting based on computed tomography scanning // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, Volume 136, December 2020, 104540.
12. Holub K., Rusajova J. Regularity of particle velocity decrease with scaled distance for rockbursts and shot holes // Acta Montanistica Slovaca. 2015. Vol. 20. No. 2. P. 80-85.
13. Oncu M. E., Yon B., Akkoyun O., Taskiran T. Investigation of blast-induced ground vibration effects on rural buildings // Structural Engineering and Mechanics. 2015. Vol. 54. No.3. P. 545-560.
14. Woodward K., Wesseloo J. Observed spatial and temporal behaviour of seismic rock mass response to blasting // Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy. 2015. Vol. 115. No. 11. P. 1044-1056.
15. Cardu M., Seccatore J., Vaudagna A., Rezende A., Galvao F. et al. Evidences of the influence of the detonation sequence in rock fragmentation by blasting. Part I // REM: Revista Escola de Minas. 2015. Vol. 68. No. 3. P. 337-342.
16. Aekwist B.V. Improving the safety of short-delay blasting // GIAB. 2017. №5. pp. 389-394.
17. Onika S.G. Explosions near objects. Minsk: Tekhnalogiia, 2006. 183 p.
18. Belin B.A., Gorbons M.G., Astakhov Ye.O. The influence of initiation tools on the efficiency and safety of blasting operations // Gornyi Zhurnal. 2017. № 7. pp. 63-67.
19. Onika S.G., Orlovskii V.Ch., Khaliavkin F.G., Getz A.K. Ensuring seismic safety of mass explosions at a natural stone quarry // Gornyi Zhurnal. 2020. № 11. pp. 32-36.
20. Bondarenko I.F., Zharikov S.N., Zyrianov I.V. et al. Drilling and blasting operations at kimberlite open pit mines in Yakutia / Yekaterinburg: IGD UrO RAN, 2017. 172 p.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ



Бондаренко Иван Федорович:
кандидат технических наук,
главный научный сотрудник,
Якутский научно-исследовательский и проектный
институт алмазодобывающей промышленности
«Якутнипроалмаз» АК «АЛРОСА» (ПАО),
г. Мирный, Республика Саха (Якутия), Россия,
e-mail: BondarenkoIF@alrosa.ru,
<https://orcid.org/0000-0002-9414-2661>

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Ivan Fiodirovich Bondarenko:
Ph.D. in engineering,
senior researcher,
Yakutian Diamond-Mining Industry Research and
Design Institute Yakutnioproalmaz PJSC «ALROSA»,
Mirny, Republic of Sakha (Yakutia), Russia,
e-mail: BondarenkoIF@alrosa.ru,
<https://orcid.org/0000-0002-9414-2661>



Ковалевич Сергей Васильевич:
кандидат технических наук,
заведующий сектором разрушения горных пород,
Якутский научно-исследовательский и проектный
институт алмазодобывающей промышленности
«Якутнипроалмаз» АК «АЛРОСА» (ПАО),
г. Мирный, Республика Саха (Якутия), Россия,
e-mail: KovalevichSV@alrosa.ru,
<https://orcid.org/0000-0003-1087-0395>

Sergey Vasilievich Kovalevich:
Ph.D. in engineering,
head of Rocks fragmentation sector,
Yakutian Diamond-Mining Industry Research and
Design Institute Yakutnioproalmaz PJSC «ALROSA»,
Mirny, Republic of Sakha (Yakutia), Russia,
e-mail: KovalevichSV@alrosa.ru,
<https://orcid.org/0000-0003-1087-0395>



Никитин Роман Яковлевич:
старший научный сотрудник,
Якутский научно-исследовательский и проектный
институт алмазодобывающей промышленности
«Якутнiproalmaz» АК «АЛРОСА» (ПАО),
г. Мирный, Республика Саха (Якутия), Россия,
e-mail: NikitinRYa@alrosa.ru

Roman Yakovlevich Nikitin :
Senior researcher,
Yakutian Diamond-Mining Industry Research and
Design Institute Yakutniproalmaz PJSC «ALROSA»,
Mirny, Republic of Sakha (Yakutia), Russia,
e-mail: NikitinRYa@alrosa.ru

КРИТЕРИИ АВТОРСТВА / CONTRIBUTION: Вклад авторов в написание статьи равнозначен / The contribution of the authors to the writing of the article is equivalent.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ / CONFLICT OF INTEREST: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflict of interest.



МАГНИТОГОРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМ. Г. И. НОСОВА

Магнитогорский государственный технический университет
им. Г. И. Носова – один из крупнейших многопрофильных вузов
страны, в котором обучается более девяти тысяч студентов
и работает около двух тысяч преподавателей и сотрудников.

Институты, факультеты, кафедры

Институт металлургии, машиностроения и материалобработки

Институт горного дела и транспорта

Институт энергетики и автоматизированных систем

Институт дополнительного профессионального образования и кадрового инжиниринга МГТУ «Горизонт»

Проектная школа

Контакты : единый контакт-центр: +7 800 100 1934, e-mail: mgtu@magtu.ru

приемная комиссия: +7 3519 33 09 39, e-mail: priem@magtu.ru



WWW.N-GN.RU



РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ГЕОЛОГОРАЗВЕДОЧНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ СЕРГО ОРДЖОНИКИДЗЕ (МГРИ)

Информируем Вас

Университет берет свое начало с геологоразведочного факультета
Московской горной академии, созданной в сентябре 1918 г.

Факультеты:

- ◆ Геологоразведочный факультет,
- ◆ Факультет технологии разведки и разработки,
- ◆ Факультет геологии и геофизики нефти и газа,
- ◆ Гидрогеологический факультет,
- ◆ Факультет экономики и управления,
- ◆ Экологический факультет

Контакты : 117997, Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 23; +7(495)255-40-20 10:00-18:00 e-mail: priem@mgri.ru,

<https://www.mgri.ru/commission/poryadok-postupleniya/>



WWW.N-GN.RU