УДК: 551.435.587

ИССЛЕДОВАНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ КАРСТОВОЙ ПЕЩЕРЫ ХЭЭТЭЙ К ДИНАМИЧЕСКИМ ВОЗДЕЙСТВИЯМ ПРИ ВЗРЫВНОМ СПОСОБЕ РАЗРАБОТКИ УСТЬ-БОРЗИНСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ ИЗВЕСТНЯКОВ В ВОСТОЧНОМ ЗАБАЙКАЛЬЕ

© 2017 г. И. И. Железняк, В. В. Манилюк

Институт природных ресурсов, экологии и криологии СО РАН, 672014, Чита, ул. Недорезова, 16-а, а/я 521, e-mail: lgc255@mail.ru

Поступила в редакцию 04.10.2016 г.; принята к печати 03.03.2017 г.

Статья посвящена исследованию пещеры Хээтэй – памятника природы Забайкальского края, в связи с проблемой его сохранения в условиях разработки взрывом расположенного рядом Усть-Борзинского месторождения известняков. Добычу известняков для переработки планируется осуществить открытым способом с формированием карьера в виде 5 уступов высотой по 15 м каждый. Дана характеристика природных условий территории, геологических, геокриологических и гидрогеологических особенностей вмещающего пещеру массива горных пород, приведены сведения о формах, расположении, свойствах покровных льдов оказывающих влияние на динамическую устойчивость пещеры и ее элементов. Представлен анализ результатов экспериментальных исследований динамической устойчивости карстовой пещеры Хээтэй к воздействиям взрывов при разработке открытым способом Усть-Борзинского месторождения известняков в Восточном Забайкалье. Основная цель инженерно-сейсмометрических измерений колебаний массива горных пород вмещающего пещеру Хээтэй, заключалась в изучении амплитудно-частотного состава колебаний для оценки сейсмического эффекта от взрывов, проводимых в ближайшем карьере при добыче известняка. Натурные измерения параметров колебаний пород в пещере Хээтэй предусматривали варьирование влияния общего веса зарядов, расстояние от источника колебаний до пунктов регистрации, различие в параметрах групповых взрывов на амплитудно-частотные характеристики распространения колебаний в во вмещающем пещеру массиве горных пород. Приведен анализ результатов натурных измерений колебаний пород и расчетов динамической устойчивости пещеры с учетом влияния массива покровного донного льда, заполнения пещеры водой, экранирующих устройств. Особое внимание обращено на влияние пустых и заполненных льдом понор в массиве горных пород при распространении в нем механических колебаний. Представлены выводы научного и прикладного характера.

Ключевые слова: *горные породы, лед, взрыв, колебания, устойчивость*

STABILITY KARST CAVE HEETEI TO DYNAMIC IMPACTS DURING BLASTING DEVELOPMENT UST'-BORZINSKY LIMESTONE DEPOSITS IN EAST TRANSBAIKALIA

Il'ya I. Zheleznyak, Vladimir V. Manilyuk

Institute of Natural Resources, Ecology and Cryology SB RAS, a/ya 521, 16-a Nedorezov st., Chita, Russia, 672014, e-mail: lgc255@mail.ru

Received 04.10.2016; accepted 03.03.2017

The article devotes to investigations the caves Heetey – natural monument Trans-Baikal Territory, in connection with the problem of their preservation during the blasting development of the nearby located Ust'-Borzinsky limestone deposits. Limestone processing is planned to open by a career with 5 ledges height of 15 m each. The characteristics of natural conditions, geological, and hydrogeological properties of permafrost enclosing rock massif, provides information about the shape, location and characteristics of ice cover, which affects on the dynamic stability of the cave and its elements. The analysis of the results of experimental studies of dynamic stability of karst cave Heetey to the effects of explosions in the development of the open method of Ust'-Borzinsky limestone deposits is presented. The main purpose of engineering and seismic measurements of vibrations of the rock mass enclosing Heetey cave was to study the amplitude and frequency content of vibrations to assess the seismic effect of explosions carried out in the near quarry with limestone mining. Actual measurements of the parameters of the rocks fluctuations in the cave Heetey included varying the total weight of the impact

Для цитирования: Железняк И.И., Манилюк В.В. (2017) Исследование устойчивости карстовой пещеры Хээтэй к динамическим воздействиям при взрывном способе разработки Усть-Борзинского месторождения известняков в Восточном Забайкалье. *Литосфера*, **17**(4). 137-143.

For citation: Zheleznyak I.I., Manilyuk V.V. (2017) Stability karst cave Heetei to dynamic impacts during blasting development Ust'-Borzinsky limestone deposits in East Transbaikalia. *Litosfera*, **17**(4), 137-143.

of charges, the distance from the source of vibrations to the registration points, the difference in the parameters of group explosions on the amplitude-frequency characteristics of wave propagation in a cave in the enclosing rock mass. The analysis of the results of field measurements of cave rock vibrations and calculations, of their dynamic stability taking into account the effect of the array of bottom cover of ice, filling with water of the cave and shielding devices is cited. Particular attention is paid to the effect of empty and filled with ice holes in the rock mass in the propagation of mechanical vibrations in it. Presented findings of scientific and applied pattern.

Keywords: *rocks, ice, blast, vibration, resistance*

ВВЕДЕНИЕ

Исследования пещеры Хээтэй, являющейся памятником природы Забайкальского края (решение Исполнительного комитета Читинской области № 353 от 14.07.1983), связаны с проблемой ее сохранения в условиях освоения расположенного рядом месторождения известняков проектируемым Усть-Борзинским цементным заводом. При этом в качестве главного технологического фактора учитывается открытый способ разработки известняков с формированием карьера в виде пяти уступов высотой по 15 м каждый взрывным способом.

С целью оценки и прогноза динамической устойчивости пещер выполнены натурные экспериментальные исследования распространения колебаний во вмещающем массиве горных пород и в основных элементах пещеры, создаваемых в результате промышленных взрывов при добыче известняков во временном карьере глубиной до 15 м, расположенном на расстоянии около 1000 м. от нее.

Характеристика вмещающего пещеру массива горных пород включает в себя следующие основные ведения. Пещера Хээтэй расположена в отрогах хребта Адун-Челон в пределах Онон-Шилка-Аргунской области денудационного низкогорья Юго-Восточного Забайкалья, относящейся к территории Онон-Аргунских степей. Район находится в зоне палеозойской складчатости в известняках Усть-Борзинской свиты нижне-среднедевонского возраста, входящих в структуру Усть-Борзинского синклинория. Климат района суровый, резко континентальный (индекс континентальности 0.91).

Вмещающие пещеру известняки представляют собой светло- или темно-серую массивную, реже, слоистую мелкокристаллическую породу с хаотической трещиноватостью, почти полностью состоящую из кальцита. По данным П.М. Большакова [1958], известняки характеризуются высоким содержанием CaO (до 55%) и незначительным содержанием $A1_20_3$ – 0.54% и Fe_20_3 – от 0.04 до 0.10%.

Благодаря своей устойчивости к эрозии, известняки залегают на возвышенностях, имеющих абсолютные отметки 760–800 м. Ниже залегают сланцы.

Широко развитая сеть трещин и карстовых пустот способствует интенсивной циркуляции подземных вод, образующих сравнительно мощный подземный поток, направленный в сторону бессточной котловины озер Ике-Цаган-Нор и Богча-Цаган-Нор.

Трещинно-карстовые воды залегают на глубинах от 10–12 до 36, а в отдельных случаях – до 70 м. Пьезометрические напоры вод комплекса характеризуются величинами от 1.3–2.0 до 35–37 м. Верхним водоупором для них служат современные суглинистые и глинистые отложения, мощностью от первых метров до 13–15 м. Предположительная глубина залегания нижнего водоупора составляет 120–150 м. Статические уровни трещинно-карстовых вод устанавливаются от 3.1 до 27.2 м. Производительность скважин колеблется от 0.13 м^3/час до 0.22 м^3/час.

Питание трещинно-карстовых вод происходит, главным образом, за счет инфильтрации осадков и подтока трещинно-пластовых вод прилегающего песчано-сланцевого нижнесреднедевонского водоносного комплекса. В водораздельных частях хребтов Кэтуй-Нуру и Адун-Челон воды безнапорные, а в долинах приобретают напор, величина которого достигает 30 м. Разгрузка трещинно-карстовых вод осуществляется родниками (Баян-Булак, Шэбэртуй, Ара-Булак и др.) и в долинах падей и распадков. Режим их сравнительно постоянный. Воды пресные, умеренно-жесткие (минерализация 0.3–1.0 г/л), по составу гидрокарбонатно-кальциево-магниевые.

Среднегодовая температура воздуха и горных пород, слагающих свод пещеры, отрицательная и составляет –2.3…–25°C [Бордонский и др., 2010]. Покровный лед присутствует в пещере в форме наледного покрова (распластанного горизонтального массива, покрывающего пол обледеневшего грота); в форме крутопадающего ледяного языка в привходовой части пещеры; в форме внутреннего ледяного бугра, подпирающего свод пещеры (в дальнейшем именующихся соответственно покровный массив, привходовый висячий ледопад и внутренний купольный бугор) [Мальчикова, 2000].

Покровный ледяной массив по площади грота имеет не одинаковую толщину: вблизи стен свода она составляет 10–120 см, а в центре грота достигает 3.5–4.0 м. В покровном ледяном массиве сосредоточены значительные объемы льда, которые по ориентировочным расчетам, составляют около

13 300–15 300 м^3. Покровный ледяной массив имеет слоистое строение, свидетельствующее о его многолетнем накоплении в результате медленного послойного намораживания.

При кристаллизации порционных поступлений воды на поверхность льда или слоя наносов вода растекается тонкими слоями образуя относительно равномерную плоскую слоистость – сланцеватую и пластинчатую. При этом лед имеет кристаллизационно-слоистую и равномерно-зернистню структуры. Преобладают плоские кристаллы со средними размерами в шлифе 0.5–2.0 см; средняя площадь кристаллов 1.4–1.6 см^2; средняя длина границ кристаллов в шлифе 5.0–5.2 см. Коэффициент удлинения равен 4.0–6.0.

В шлифе покровного льда, залегающего на глубине 2.3–2.8 м наблюдаются полые цилиндрические отверстия “трубки”, объемом 0.07–1.0 см^3. Лед прозрачный – мелких газовые включения и примеси в нем отсутствуют. Структура льда в этих горизонтах равномерно-зернистая. Преобладают кристаллы с перпендикулярной к поверхности замерзания ориентировкой оптических осей. Довольно крупные размеры кристаллов свидетельствуют о достаточно высокой температуре замерзания, порядка –1.0…–1.5° (не ниже –2°С). В связи с высокой температурой кристаллизации и медленным ростом кристаллов лед, слагающий покровный массив, отличается малым количеством примесей (как газовых, так и минеральных).

Привходовый висячий ледник в виде крутопадающего ледяного языка имеет высоту 14–15 м при крутизне 80–90°.Установлено, что висячий ледник имеет самую низкую термодинамическую температуру поверхности. Возможно, это связано с усилением циркуляции воздуха в определенной области и обусловлено увеличением скорости испарения льда.

Внутренний купольный ледник в виде ледяного бугра, подпирающего часть свода пещеры, располагается между ответвлениями от обледеневшего грота в ее теплую часть. Его диаметр по основанию составляет 35 м. Основание ледника сложено обломками породы, суглинком и супесью.

Вмещающий пещеру массив известняков включает в себя значительное количество мелких, средних и крупных понор. По виду – это каналы округлого или эллиптического сечения от нескольких десятков сантиметров до более метра. Их длина колеблется от нескольких метров до нескольких десятков метров. Часть крупных понор пуста в силу вытаивания ранее заполнявшего их льда. Однако имеются и заполненные льдом поноры – каналы, явившиеся источником образования ледяных сталагнатов.

По сейсмической активности территория относится к зоне слабых землетрясений [Бордонский и др., 2010].

МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ

Полевые измерения скорости и ускорения колебаний вмещающего пещеру массива горных пород выполнены по комплексной методике исследований динамических воздействий на пещеру основанной на известных проверенных опытом методиках [Медведев, 1964; Миронов, 1973; Единые правила…, 1976; Мосинец, 1976]. Использовались четыре комплекта аппаратуры с 15 сейсмометрическими каналами, из которых 12 регистрировали скорость колебаний и 3 – ускорения колебаний пород. Сейсмоприемники подключались к гальванометрам через шунтовую коробку ШК-2, что обеспечивало возможность загрубления чувствительности канала в 3, 5, 10, 20, 100 раз без изменения формы его частной характеристики. Выбранные параметры аппаратуры обеспечивали запись скорости и ускорения колебаний пород в интервале частот от 1 до 50 Гц на уровне 0.8 от максимума амплитудно-частотной характеристики.

Регистрировались три взаимно перпендикулярные составляющие колебаний: H_1 – радиальная (колебания вдоль оси “пункт взрыва – пункт наблюдения”), H_o – тангенциальная (колебания перпендикулярно оси “пункт взрыва – пункт наблюдения”), Z – вертикальная в 4-х пунктах.

Пункты сейсмометрических измерений колебаний пород, слагающих пещеры или пункты наблюдений располагались на поверхности и внутри пещеры. Схема расположения фотоупругих датчиков внутри пещеры показана на рис. 1.

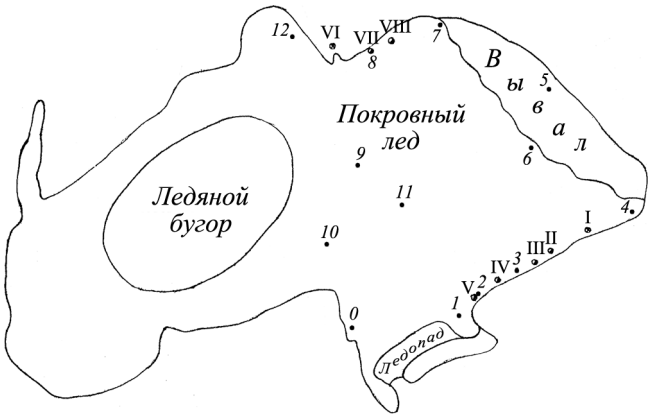

Рис. 1. Схема расположения фотоупругих датчиков внутри пещеры Хээтэй.

0–12 – точки теодолитных ходов; **I, VI – датчики, установленные в зацементированные щели;** II–V, VII, VIII – датчики, вмороженные в лед.

Fig. 1. Scheme of location photoelastic sensors inside the cave Heetey.

0–12 – point theodolite moves; I, VI – sensors mounted in slots cemented; II–V, VII, VIII – sensors frozen into ice.

На поверхности пещеры располагались пункты наблюдений, находящиеся на расстоянии 24 м друг от друга. В основании пещеры пункты наблюдения были установлены на ледяном массиве дна пещеры мощностью 3.5–4.0 м и на крупнообломочных и валунных породах, образовавшихся в результате вывала из стен пещеры.

В пунктах наблюдения на поверхности на массиве крупнообломочных и валунных горных пород регистрировались только амплитуды скорости колебаний, а в пункте наблюдения на ледяном массиве дна пещеры наряду с регистрацией скорости колебаний частиц породы, регистрировались амплитуды ускорений колебаний. Для анализа амплитудно-частотного состава сейсмических колебаний пород были использованы записи трех взрывов, зарегистрированных в указанных выше пунктах наблюдений [Федотов, 1993]. Данные взрывы проводились в соответствии с графиком буровзрывных работ на карьере известняка. Схема отработки карьера представлена на рис. 2.

Общий вес заряда первого взрыва составлял 23.0 т, второго – 25.4, третьего – 6.4 т. Расстояние до пунктов регистрации было примерно одинаковое – 800 м. Различие в параметрах взрывов заключалось в том, что количество групп взрывания у первого взрыва было равно 6 при максимальном заряде в группе 4536 кг. Во втором взрыве было 3 группы, причем, в первых двух группах взрывалось по 6366 кг, а в третьей группе 12230 кг. В третьем взрыве заряда в группах было несколько меньше, соответственно 1700, 2700 и 2016 кг.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ

Анализ результатов экспериментальных исследований показал, что в среднем амплитудно-частотный состав колебаний пород внутри и на поверхности пещеры примерно одинаков. Амплитуды скорости колебаний пород на поверхности пещеры изменяются от 0.14 см/с до 0.56 см/с в основании пещеры, т.е. на ее дне от 0.2 см/с до 0.3 см/с. Амплитуды ускорений колебаний пород регистрировались только в основании пещеры. Их значения при двух зарегистрированных взрывах изменялись от 13.0 см/с^2 до 22.8 см/с^2.

Видимые периоды колебаний пород при двух взрывах изменялись на их поверхности от 0.06 с до 0.17 с, а в основании пещеры от 0.05 с до 0.20 с. При этом существенного различия между значениями видимых периодов скоростей и ускорений колебаний не отмечалось. Анализ полученных при “ручной” обработке сейсмограмм взрывов показал следующее. Во-первых, практически не наблюдается уменьшения амплитуд колебаний с глубиной. Этот факт согласуется с результатами исследований [Окамото, 1980; Оценка…, 1983]. В данном случае, очевидно, играют важную роль такие факторы, как недостаточно глубокое положение осно-

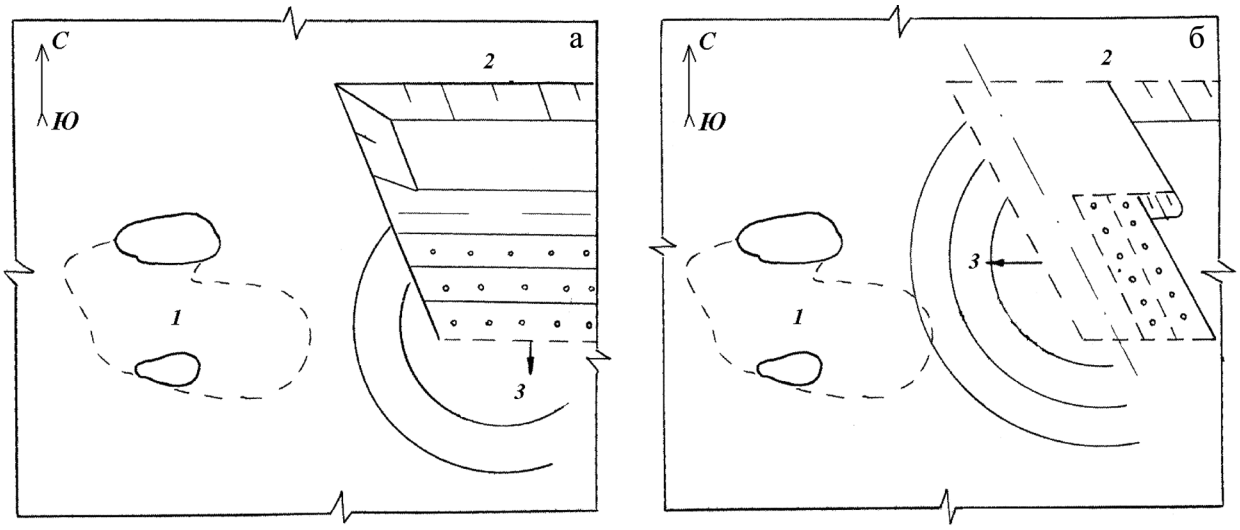

Рис. 2. Схема направления фронтов от взрывного воздействия при разработке карьера известняков: а – в южном направлении; б – в западном направлении.

1 – пещера Хээтэй, *2* – карьер, *3* – основной фронт взрывного воздействия.

Fig. 2. Scheme of the direction of the fronts from the explosive impact in the development of a limestone quarry: a – to the south; б – to the western direction.

1 – Heetei cave, *2* – quarry, *3* – the main front of the explosive impact.

вания пещеры от поверхности (примерно 40–50 м) и то, что в основании пещеры сейсмоприемники установлены на породы (лед, валунный материал), акустические жесткости которых меньше, чем у скальных пород (известняков) на поверхности. Как показано в работе [Оценка…, 1983], существенное, в 1.5 раза, уменьшение амплитуд колебаний при строительстве тоннелей наблюдается при заложении основания тоннеля, начиная с 80 м от поверхности. Зарегистрированные при взрывах максимальные значения скоростей и ускорений колебаний пород, слагающих пещеры, позволяют, используя существующие сейсмические шкалы, оценить, хотя бы формально, сейсмическое воздействие в баллах. Максимальное значение скорости колебаний, зарегистрированное при взрывах, составляет 0.56 см/с, а максимальное значение ускорения 22.8 см/с^2. По сейсмической шкале для землетрясений МК-64, принятой в России, значение скорости соответствует интенсивности 3 балла, значение ускорения–интенсивности – 5 баллов. Если использовать специальные шкалы для оценки сейсмической интенсивности по взрывам, то значение скорости колебаний 0.56 см/с [Богатский, 1983] будет соответствовать примерно двум баллам, а значение ускорения колебаний 22.8 см/с^2 будет соответствовать интенсивности 2–3 балла [Миронов, 1973].

Спектральным анализом установлено, что максимальные значения спектральных плотностей колебаний пород на поверхности пещеры на порядок ниже, чем в основании пещеры. Частоты, соответствующие максимальным значениям спектральных плотностей, в ряде случаев значительно отличаются от видимых частот, соответствующих максимальным амплитудам на записях взрывов во временной области. Значительные различия в значениях спектральных плотностей колебаний пород на поверхности и в основании пещеры объясняются тем, что условная длительность колебаний пород на поверхности воронок пещеры в 4–5 раз меньше, чем длительность колебаний пород в основании пещеры. На основании анализа амплитудно-частотных характеристик колебаний пород пещеры при взрывах можно сделать вывод о том, что частотный состав колебаний пород лежит в основном в полосе частот инженерно-сейсмологического диапазона 1–10 Гц. Максимальное значение скорости колебаний, зарегистрированное при взрывах, составляет 9.56 см/с, максимальное значение векторной скорости, найденное как корень квадратный из суммы квадратов скоростей по трем взаимно-перпендикулярным составляющим колебаний равно примерно 0.9 см/с.

Следует учитывать, что если для зданий и сооружений пределы значений критической скорости колебаний известны [СНиП117-81, 2014], то для такого уникального природного объекта, как пещера Хээтэй, подобных данных нет [Садовский, 1946; Цейтлин, Смолий, 1981]. В этом случае к выбору значения критической скорости целесообразно подходить с позиций законов деформирования горных пород при взрывах. Наши исследования подтвердили объективность такого подхода.

Сопоставление результатов оценки параметров произведенных взрывов показали, что третий взрыв оказал наибольшее сейсмическое воздействие на объект по сравнению с первыми двумя, хотя производился наименьшим весом взрываемого заряда. Это связано с тем, что ряды взрываемых скважин располагались таким образом, что основной фронт сейсмической энергии был направлен прямо на пещеру, т.е. направление отбойки известняка существенно сказывается на интенсивности взрывного воздействия на пещеру.

Полученные данные позволяют рассчитывать допустимый вес заряда в группе при определенном значении критической скорости колебаний пород в пещере. Критическая скорость в свою очередь может быть определена из расчетов устойчивости пещеры на сейсмовзрывное воздействие [Федотов, 1993].

Зоны наиболее нарушенных тектоническими трещинами пород обнаружены в куполе пещеры. Эти места выделялись на расчетных схемах как отдельные блоки, которым придавались значения сцепления и модуля Юнга, заниженные на порядок, по сравнению со значениями, принятыми для основной вмещающей породы (известняка).

Оказалось, что результаты расчетов существенно зависят от учета этих зон. Так, например, наличие зоны интенсивной трещиноватости в куполе большого зала пещеры предопределяет возможность вывала из его центральной части небольших объемов породы при сейсмическом воздействии в 6 баллов, эквивалентном взрыву 1 т взрывчатых веществ на расстоянии 200 м от пещеры, что, однако, не угрожает обрушением свода основного зала пещеры.

Результаты измерения скорости смещения пород показывают, что все ее компоненты не одинаковы. Объясняется это, на наш взгляд, тем, что неодинакова проводимость известняков по отношению к их слоистости. Так, например, для горизонтальной составляющей колебаний, направленной вдоль слоистости, наблюдаются небольшие значения (2–2.5 раза) амплитуд, чем для вертикальной составляющей *Z*, направленной поперек слоистости, и в 1.2–1.7 раза, чем для горизонтальной составляющей X, направленной вкрест простирания слоев. Таким образом, горизонтальное направление усиливает сейсмическое колебание от взрыва и, следовательно, оказывает наибольшее влияние на устойчивость пещеры.

Из этого можно сделать вывод, что тектоническая нарушенность и слоистость по отношению к направлению сейсмического воздействия могут

способствовать как нарушению устойчивости, так и ее сохранению. В связи с этим представляет интерес влияние экранирующих пространств.

С целью выработки эффективных методов обеспечения устойчивости пещеры к воздействию промышленных взрывов при добыче известняков проведен патентный поиск, в результате которого установлено достаточно большое количество эффективных инженерно-технических решений, с помощью которых можно целенаправленно управлять воздействием сейсмических волн на различные объекты. В первую очередь, к ним относятся экраны для гашения волн, включающие в себя полости, заполненные твердыми, жидкими или паровоздушными сейсмоакустическими материалами. Результаты патентных исследований использованы в расчетах.

Экранирующие пространства в расчетах учитывались как гасители сейсмических волн при воздействии промышленных взрывов. В случае с пещерой Хээтэй наиболее подходит вариант, при котором на расстоянии от нее создается компенсационное пространство. Это может быть либо вертикальная глубокая выработка, огибающая пещеру по периметру, либо зона пород, разрыхленных с помощью зарядов небольшой мощности. Нами анализировалось несколько наиболее вероятных случаев влияния экрана, представляющего собой зону разрыхленных пород, на устойчивость пещеры.

Рассматривался также и случай, когда экранирующее пространство было расположено на расстоянии 100 м от края пещеры. Расчетная схема, составленная для этого случая, кроме того, позволила оценить устойчивость охранного двухсотметрового целика по мере отработки и углубления карьера. Сейсмическое воздействие задавалось 6-балльной акселерограммой, эквивалентной взрыву 1 т взрывчатых веществ на расстоянии 200 м от пещеры.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что экранирующая зона в этом случае не оказывает существенного влияния на устойчивость пещеры.

Кроме того, учитывалось влияние заполнения пещеры водой на ее устойчивость. Результаты расчетов показали, что пещера, вероятнее всего, сохранит устойчивость в условиях полного заполнения воронки пещеры водой и взрыва, аналогичного описанному, а при увеличении сейсмического воздействия до 6 баллов или взрыве эквивалентной мощности 1 т взрывчатых веществ на расстоянии 200 м свод пещеры, заполненной водой, может обрушиться.

Особый интерес представляет роль понор в оценке амплитудно-частотных характеристик распространения механических колебаний в массиве горных пород с понорами-каналами. Учет в расчетах их влияния на динамическую устойчивость пещеры к промышленным взрывам или природным сейсмическим воздействиям в настоящее время не представляется возможным из-за отсутствия необходимых сведений о них. Однако, несомненно и то, что система пустых понор-каналов во вмещающем пещеру массиве горных пород снижает амплитудно-частотные характеристики динамических волн и, в целом, колебание самого массива.

ВЫВОДЫ

1. Перемещения в зоне трещиноватости, расположенной между верхней и нижней полостями пещеры на порядок больше, чем в окружающей ее вмещающей породе, что указывает на возможность обвала потолочины между полостями при взрыве большой мощности.

2. Минимально устойчивое состояние пещеры соответствует шестибальному сейсмическому воздействию, которое эквивалентно взрыву 1 т взрывчатых веществ на расстоянии 200 м (т.е. в пределах охранного целика).

3. Предельно допустимой скоростью колебаний пород свода пещеры следует считать значение $V = 1.9$ см/с.

4. Экранирующие пространства, удаленные от пещеры на 40–100 м, дают положительный эффект, но их влияние на устойчивость пещеры не велико.

5. Покровный ледяной массив на дне пещеры, система пустых понор-каналов и трещиноватость массива горных пород снижают негативное воздействие на него, а следовательно и на пещеру, динамических колебаний и, таким образом, служат стабилизирующим фактором.

6. Усиление сейсмического воздействия на пещеру зависит от направления фронта сейсмического воздействия, слоистости и трещиноватости пород.

7. Заполнение пещеры водой понижает ее устойчивость.

8. Отработка карьера на проектную глубину при взрывах оптимальной мощности не окажет разрушающего влияния на устойчивость пещеры.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Богатский В.Ф. (1983) Прогноз и ограничение сейсмической опасности промышленных взрывов. *Сейсмика промышленных взрывов.* М.: Недра, 201-213.

Большаков П.М. (1958) О карсте Усть-Борзинского месторождения известняков Восточного Забайкалья. *Труды Иркутского горнометаллургического института*. Сер. геологическая. Вып. 15, 101-106.

Бордонский Г.С., Гурулев А.А., Цыренжапов С.В., Орлов А.О., Крылов С.Д. (2010) Радиолокационное исследование карстовой пещеры Хээтэй (Забайкальский край). *Спелеология и Спелестология*, (1), 79-81.

Единые правила безопасности при взрывных работах. (1976) М.: Недра, 240 с.

Мальчикова И.Ю. (2000) Лед в пещерах Забайкалья. *Изв. РГО*, **132**(5). СПб., 38-43.

Медведев С.В. (1964) Сейсмика горных взрывов. М.: Недра, 188 с.

Миронов Н.С. (1973) Взрывы и сейсмобезопасность сооружений. М.: Недра, 167 с.

Мосинец В.Н. (1976) Дробящее и сейсмическое воздействие взрывов в горных породах. М.: Недра, 227 с.

Окамото Ш. (1980) Сейсмостойкость инженерных сооружений. М.: Стройиздат, 342 с.

Оценка влияния грунтовых условий на сейсмическую опасность (1983) (Отв. ред. О.В. Павлов). М.: Наука, 223 с.

Садовский М.А. (1946) Простейшие примеры определения сейсмической опасности при взрывах. М.: ИГД ММ СССР, 38 с.

СНиП 12-69. (1977) Строительство в сейсмичных районах. М.: ФАУ "ФЦС", 54 с.

Тресков А.А., Медведев С.В., Флоренсов Н.А., Солоненко В.П. (1958). Землетрясения и сейсмическое районирование Восточной Сибири. *Геологическое строение и полезные ископаемые Восточной Сибири*. М.: АН СССР, 108-116.

Федотов С.А. (1993) Взрывать не разрушая. Параметры взрывных работ с учетом сейсмического воздействия на объект. *Недра Востока*, (2), 36-38.

Цейтлин Я.И., Смолий Н.Н. (1981) Сейсмические и ударные воздушные волны промышленных взрывов. М.: Недра, 191 с.

REFERENCES

Bogatskii V.F. (1983) Prediction and limitation of seismic hazard industrial explosions. *Seysmika promyshlennyh vzryvov* [Seismisity of industrial explosions]. Moscow, Nedra Publ., 201-213. (In Russian)

Bol'shakov P.M. (1958) About Ust'-Borzinsky karst limestone deposits of Eastern Transbaikalia. *Trudy Irkutskogo gornometallurgicheskogo instituta*. Ser. Geol. V. 15, 101-106. (In Russian)

Bordonskii G.S., Gurulev A.A., Cyrenzhapov S.V., Orlov A.O., Krylov S.D. (2010) The radar study karst cave Heetey (Chita region). *Speleologiya i Spelestologiya*, (1), 79-81. (In Russian)

Ceytlin Ya.I., Smolii N.N. (1981) *Seysmicheskie i udarnye vozdushnye volny promyshlennyh vzryvov* [Seismic and shock air waves of industrial explosions]. Moscow, Nedra Publ., 191 p. (In Russian)

Edinye pravila bezopasnosti pri vzryvnykh rabotakh (1976) [Uniform safety rules for blasting operations]. Moscow, Nedra Publ., 240 p. (In Russian)

Fedotov S.A. (1993) Blowing up without destroying. *Nedra Vostoka*, (2), 36-38. (In Russian)

Mal'chikova I.Yu. (2000) Ice in Trans-Baikal caves. *Izv. RGO*, 132(5). St-Petersburg, 38-43. (In Russian)

Medvedev S.V. (1964) *Seismika gornyh vzryvov* [Seismic of rock explosions]. Moscow, Nedra Publ., 188 p. (In Russian)

Mironov N.S. (1973) *Vzryvy i seismobezopasnost' sooruzhenii* [Explosions and seismic safety of buildings]. Moscow, Nedra Publ., 167 p. (In Russian)

Mosinets V.N. (1976) *Drobyashchee i seismicheskoe vozdeistvie vzryvov v gornyh porodakh* [Crushing and seismic effect of explosions in the rocks]. Moscow, Nedra Publ., 227 p. (In Russian)

Okamoto S.H. (1980) *Seismostoikost' inzhenernyh sooruzhenii* [Earthquake stability of engineering structures]. Moscow, Stroizdat Publ., 342 p. (In Russian)

Otsenka vliyaniya gruntovyh uslovii na seismicheskuyu opasnost' (1983) (Otv. red. O.V. Pavlov) [Assessment of soil conditions on seismic hazard]. Moscow, Nauka Publ., 223 p. (In Russian)

Sadovskii M.A. (1946) *Prosteishie primery opredeleniya seismicheskoi opasnosti pri vzryvah* [The simplest examples of determination of seismic hazard in the explosions]. Moscow, IGD MM SSSR, 38 p. (In Russian)

SNiP 12-69. (1977) *Stroitel'stvo v seismichnyh raionah* [Construction in seismic regions]. Moscow, FAU "FTsS", 54 p. (In Russian)

Treskov A.A., Medvedev S.V., Florensov N.A., Solonenko V.P. (1958) Earthquakes and seismic zoning of Eastern Siberia. *Geologicheskoe stroenie i poleznye iskopaemye Vostochnoi Sibiri* [Geological structure and minerals of Eastern Siberia]. Moscow, Akad. Nauk SSSR, 108-116. (In Russian)