

УДК 622.035.4

Л.Л. Кауфман¹, Б.А. Лысиков², А.П. Букань³

ЗАРУБЕЖНЫЙ ОПЫТ СООРУЖЕНИЯ ТУННЕЛЕЙ В ВЫБРОСООПАСНЫХ ПОРОДАХ

¹Нью-Йорк, США

²Донецкий национальный технический университет

³«Інтербудтунель», г. Киев

Подано всесвітній досвід проблем раптових викидів породи при будівництві тунелів, механізм цих подій та захист тунелів від раптових викидів породи.

Ключові слова: тунелі, раптові викиди породи, захист

L.L. Kaufman, B.A. Lisikov, A.P. Bykan

FOREIGN EXPERIENCE OF TUNNEL CONSTRUCTION IN OUTBURST ROCK

The worldwide experience of rock burst problems in tunnel construction, mechanisms of these events and tunnels protection against rock bursts are reviewed.

Keywords: tunnels, rock burst, protection

Из всех опасностей, связанных с горными работами, внезапные выбросы породы являются, возможно, наиболее пугающими и представляют собой насильственное перемещение породных плит из забоя, кровли и стен в созданную подземную полость. Осознаваемый ощущениями человека как сейсмическое событие внезапный выброс породы может высвободить огромное количество энергии и быть оценен значением магнитуды по шкале Рихтера. К примеру, один из выбросов был зарегистрирован сейсмической станцией на расстоянии более 1900 км [1].

Одной из главных причин выбросов являются существенные напряжения в породном массиве. Силы, необходимые для разбрасывания тонн породы, требуют участия значительных энергий. Другой решающий фактор – тип пород: выбросы не происходят в слабых породах. Предполагается, что напряжение, в принципе способное привести к выбросу, в слабых породах высвобождается медленно. Породы, в которых происходят выбросы, почти всегда твердые, прочные и хрупкие. Они могут иметь прочность на сжатие от 100 до 400 МПа.

Литостатическое давление (давление веса пород, перекрывающих район ведения горных работ) не всегда достаточно, чтобы создать напряжения, необходимые для выброса. Должен также существовать механизм, производящий локализованное увеличение напряжений в породах. Это может происходить в местах вулканических интрузий и других неоднородностей пород, концентрирующих напряжения в ограниченных пунктах.

Когда главные условия выброса созданы, требуется механизм, необходимый для его проявления, – срагивание трещин, первоначально направленных в соответствии с главными напряжениями. При наличии открытых поверхностей (в нашем случае – стен подземной полости) трещины распространяются параллельно этим поверхностям (разрушение обобщенным растяжением в объемном поле сжимающих напряжений).

С энергетической точки зрения при подземной экскавации в ее окрестности происходят существенные изменения в потенциальной энергии деформации массива. Потенциальная энергия породы, удаленной при экскавации и поднятой на поверхность, увеличивается пропорционально ее массе, гравитационному ускорению свободного падения и глубине, с которой порода поднята.

Потенциальная энергия пород, оставшихся нетронутыми, вокруг зоны экскавации, наоборот, уменьшается за счет снижения природных сил сцепления, которые существовали в зоне экскавации перед тем, как часть породного массива была отделена. Если удаленная зона напряжений остается постоянной и порода ведет себя упруго, а перемещения поверхности полости неочевидны, часть уменьшенной потенциальной энергии пород вокруг зоны экскавации сохраняется как концентрация упругой энергии деформаций в породах этой зоны. Остальная часть потенциальной энергии рассеивается или высвобождается. Если породы ведут себя не упруго или полость экскавации смыкается, в качестве упругой сохраняется менее половины уменьшенной потенциальной энергии деформаций, а остальная (большая часть потенциальной энергии) рассеивается или высвобождается.

Одно из объяснений происхождения выбросов породы заключается в том, что они являются нестабильными формами высвобождения потенциальной энергии пород вокруг зоны экскавации. Другое объяснение предполагает, что изменения, вызванные горными работами, служат только триггером (пусковым механизмом) остаточных сейсмических событий, вызываемых, главным образом, энергией существующих напряжений. Оба эти объяснения могут быть правильными [2].

Экскавация пород вызывает высокий градиент (темп изменения во времени) напряжений и поэтому потенциально вероятно для высвобождения этой энергии – постепенный ход событий может быть совершенно безопасен, тогда как бурное высвобождение становится явлением, которое называется выбросом породы. В этих обстоятельствах важна последовательность выполнения технологических операций, и поэтому необходимо выбрать такую,

которая позволит осуществить постепенное высвобождение энергии напряжений в породах, избежав таким образом их выброса.

В США существует несколько определений внезапного выброса породы, сделанных рядом государственных агентств:

– «это явление, которое происходит, когда породный массив напряжен свыше предела упругости, а его аккумулированная энергия высвобождается, мгновенно сопровождаясь обрушениями пород»;

– «мгновенное обрушение пород, вызываемое выталкиванием материала на поверхность полости или сейсмическим воздействием на горные работы»;

– «внезапное и бурное обрушение большого объема сверхнапряженных пород, вызываемое мгновенным высвобождением большого объема аккумулированной энергии».

Эти определения, однако, не идентифицируют условия или причины выбросов. Они включают нестабильные явления, начиная с резкого отслаивания нескольких малых кусков породы и заканчивая перемещением большого объема породы, которые подобны локальным землетрясениям.

В настоящее время при сооружении туннелей не существует практических путей предотвращения внезапных выбросов, определенные меры могут быть приняты для минимизации как возможности их возникновения, так и тяжести их последствий.

Опыт проходческих работ показал очевидную зависимость внезапных выбросов породы от геологических особенностей подземного строительства и других горных работ. Нарушения, иные неоднородности являются местами концентрации высоких напряжений и предрасположены к выбросам, когда на них воздействуют любые подземные операции. Проходка туннеля через такие зоны или вдоль них должна производиться так, чтобы минимизировать рост напряжений или предусмотреть меры по разгрузке массива от горного давления.

Важным признаком возможности возникновения внезапного выброса является расслоение на диски керна разведочного бурения. Такое расслоение обычно происходит на большой глубине и в крепких породах: граните, гнейсе, андезите и песчанике. Это явление – признак высоких напряжений, перпендикулярных оси скважины, причем, чем выше напряжение, тем больше количество дисков.

Принято считать, что механизм образования дисков заключается в следующем. Разрывные или растягивающие напряжения, возникающие на внешней части керна, распространяются на его тело. Когда эти напряжения превышают прочность пород на растяжение, происходит разделение керна на диски.

Образование дисков, как правило, предшествует внезапным выбросам породы и поэтому может быть признаком их проявления. Так, в туннеле Jwate (Япония) длиной 25,8 км во время экскавационных работ в туфовых породах в местах, где керны разделялись на диски, наблюдались экстраординарные деформации крепи и явления, подобные внезапным выбросам породы (рис. 1).

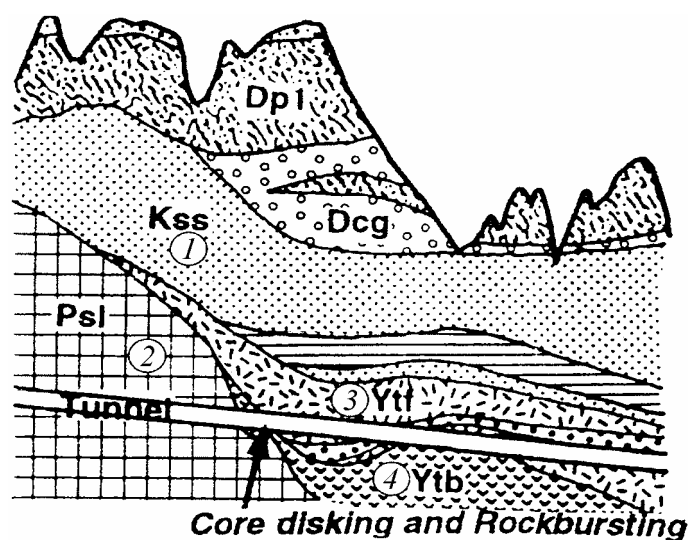


Рис. 1. Зона образования дисков в кернах разведочного бурения и выбросов в туннеле Jwate: 1 – песчаник; 2 – отложения триаса и юрского периода; 3 – туф; 4 – туфбрекчия

Здесь проводилось горизонтальное разведочное бурение, показавшее наличие дисков в кернах, а при перекрывающей толще пород более 200 м произошло обрушение забоя с характерным шумом. Обычно в породных массах, подобных туфу, деформации пород происходят в виде пучения позади забоя. В случае туннеля Jwate породы в забое периодически расщеплялись на блоки в форме тонких плит, толщина которых была меньше 1 м. Затем забой обрушался подобно внезапному выбросу, характерному при отрывных напряжениях в породном массиве [3].

Появление предупредительных признаков внезапного выброса показывает необходимость принятия мер по уменьшению вероятности его возникновения, например правильного выбора скорости подвигания забоя строящегося туннеля. Когда забой подвигается в высоконапряженных породах, перед ним развивается трещиноватая зона. В то время, как большинство трещин появляется в пределах нескольких часов после взрывных работ, граница трещиноватой зоны продолжает перемещаться в течение суток. Глубина этой зоны зависит от размеров забоя и уровня давления горных пород. Трещиноватая зона служит «подушкой» саморазгрузки пород между нетронутым массивом и образованной полостью.

Слишком быстрое подвигание забоя не дает времени развиваться этой зоне постепенно и достичь равенства напряжений, тогда событие выброса становится очень вероятным. В таких случаях должно быть сокращено подвигание забоя за цикл.

Вторым важным фактором, снижающим воздействие выброса, является крепь туннеля или другой сооружаемой плоскости. Традиционная конструкция крепи не выдерживает этого воздействия, поскольку она предназначена для поддержания собственного веса пород, но не для динамических ударных нагрузок, вызываемых выбросом. Жесткая крепь или усиленные тампонажем породы не способны к податливости и, следовательно, обрушаются или деформируются почти мгновенно во время выброса, позволяя породам, окружающим полость, заполнить ее.

При подземных работах очень трудно предотвратить большинство внезапных выбросов. Во многих случаях, однако, возможно избежать выброса разгрузкой массива от горного давления. Это может быть достигнуто искусственным (с помощью взрывных работ) образованием в породах трещиноватой зоны для уменьшения напряжений.

Разгрузочное взрывание, вызывая трещиноватость, рассеивает потенциальную энергию напряжений и создает податливость массива. Обычной процедурой для успешного применения разгрузки является взрывание, по крайней мере, двух параллельных скважин, пробуренных с опережением забоя и двух скважин, направленных под углом к стене туннеля. Это уменьшает высокие напряжения перед забоем, формирующиеся после взрывного цикла проходки и таким образом устраняет или позволяет контролировать «стреляние» породы – малые выбросы.

В дальнейшем применение способа было, однако, прекращено из-за трудного бурения относительно длинных скважин.

Для того чтобы оценить относительную и потенциальную опасность выбросов, устанавливают различные типы сейсмических систем мониторинга. Знания об особенностях района и причинах, приводящих к выбросам, позволяют принять меры, чтобы минимизировать как число событий выброса, так и его последствия.

Примеры снижения воздействия выбросов породы при сооружении туннелей в мировой практике туннелестроения приведены в работе [4]. В Норвегии туннели расположены главным образом в твердых породах, и традиционно большинство из них не закреплены или ограничиваются временной крепью. За исключением слабых участков, которые требовали предварительного тампонажа пород и установки разного рода усиленной крепи. Однако в недавние годы в связи с увеличением глубины залегания несколько туннелей столкнулись с серьезными проблемами внезапных выбросов породы из-за высоких напряжений на большей части длины туннелей.

Выбросы пород вызывались в основном двумя видами начальных условий таких напряжений:

– традиционно много туннелей было пройдено вдоль и вокруг фиордов или примыкающих к ним долин. Часто склон горы, в котором пройден туннель, бывает очень крут, а ее высота достигает 1000–1500 м. Это создает напряжения, которые в Норвегии называют эффектом «стенки желоба». Туннель обычно проводится близко к поверхности, где поля напряжений весьма анизотропны. Это создает большие концентрации напряжений, что вызывает выбросы или расслаивание пород;

– в недавние годы туннели начали строиться через горную цепь между фиордами или долинами, ранее трассы туннелей проходили вдоль фиордов. В этом случае резко возрастает мощность и нагрузка толщи пород, перекрывающих туннель. Большинство таких туннелей расположено в Западной Норвегии в гнейсах, и в первые годы их строительства ожидалось выбросы

пород из стен туннеля, вызванные высокими вертикальными напряжениями. Однако на самом деле выбросы или расслаивания пород происходили в кровле туннеля и в местах со средней, а не максимальной мощностью перекрывающих пород. Это показало наличие высоких горизонтальных напряжений, перпендикулярных оси туннеля, что было доказано измерениями в массиве пород. Горизонтальные напряжения являются более или менее постоянными по длине туннеля за исключением зон, близких к поверхности, на которые влияют эрозионные процессы.

В туннеле *Ноуангер-Ланеффорд* длиной 7,52 км проходческие работы начались в конце 1982 г. Породный массив состоит в основном из различных типов гнейса. Часто встречаются линзы амфиболита, редко – слои кварцита.

Прочность пород на сжатие находится в пределах 60–200 МПа в зависимости от их состава, структуры, размера зерен и т.д. Гнейсы представляют собой монолитный массив с относительно немногими трещиноватыми зонами. В середине горного хребта мощность толщи пород, перекрывающих туннель, составляет 1100 м.

Сечение туннеля почти полукруглое, имеет площадь 50 м². Туннель проходили с двух сторон – Ноуангер и Ланеффорд по обычной технологии буровзрывных работ.

При планировании проходческих работ прогнозировались благоприятные прочностные свойства пород даже в местах максимальной перекрывающей толщи пород. Однако, когда началось строительство со стороны Ноуангер, произошло обширное расслоение кровли туннеля на расстоянии 200 м от портала, т.е. в месте, где перекрывающая толща еще далека от своего максимума. Измерения показали доминирование здесь горизонтальных напряжений, ориентированных нормально к оси туннеля (и параллельно горному хребту). Наивысшее значение σ_1 составило 34 МПа, тогда как в этом же месте величины σ_2 и σ_3 не превышали 8 МПа. Тангенциальные напряжения в кровле туннеля были равны 95 МПа, в то время как его стены находились под малыми напряжениями, что объясняет расслоение кровли.

Другие замеры показали, что с увеличением мощности перекрывающей толщи пород напряжения в кровле снижаются, возрастая в стенах туннеля.

Из этого анализа были сделаны следующие прогнозные выводы:

– с увеличением мощности перекрывающей толщи пород тенденция к расслоению кровли станет менее выраженной, однако некоторые проблемы ее поддержания будут вызваны достаточно высокими тангенциальными напряжениями;

– при максимальной толщине перекрытия туннеля напряжения в его стенках будут увеличиваться до значений, создающих расслоение пород.

Трехлетний период работ показал правильность этого прогноза. Расслоение пород и их выбросы создали серьезные трудности в подвигании туннеля.

Со стороны Ланеффорд на первых 500–600 м от портала были встречены сочленения породных блоков, здесь также наблюдалось значительное рас-

слоение пород кровли, которое увеличивалось при дальнейшем подвигании туннеля. Из кровли и забоя происходили выбросы породы. Их максимальная интенсивность была отмечена, когда длина туннеля от портала составила 2000 м, затем при подвигании забоя до 2800 м выбросоопасная активность уменьшилась. Причиной снижения высоких напряжений стало изменение качества пород от массивного гнейса до слоистого амфиболита.

Для предотвращения расслоения пород в туннеле применяли анкерную крепь с диаметром болтов 20 мм и длиной 2,4 м. Вместе с ними устанавливали полимерные картриджи для закрепления анкеров, треугольные плиты под болты в кровле с размерами 400×500×8 мм. При установке болты не подвергали предварительному напряжению, поскольку его необходимая величина достигалась за счет деформации пород.

В местах с интенсивным расслоением пород и выбросами оборку кровли в первой половине проходческого цикла (при погрузочных работах) не производили. После погрузки части отбитой массы оборку пород и установку анкерной крепи осуществляли в таких точках, которые были для этого доступны, после чего грузили остальную часть отбитой массы. Окончательную оборку и установку анкерных болтов выполняли вблизи забоя. В наихудших местах применяли также проволочную сетку. Иногда требовалось крепление собственно забоя, которое осуществляли с помощью болтов длиной 1 м. В местах умеренного расслоения оборку пород и установку анкерной крепи выполняли сразу на полный проходческий цикл.

В зависимости от интенсивности расслоения и выбросов породы использовали 35–70 анкерных болтов на 4-метровый цикл подвигания забоя. Их общее количество, установленное в туннеле, составило 55 тыс. штук. Позднее было добавлено еще 20 тыс. болтов и 26 тыс. м² проволочной сетки.

Скорость подвигания туннеля на благополучных участках (без проблем с напряжениями пород) составляла 9-11 циклов (10 смен, 40 м) в неделю, на сложных участках – 5-6 циклов в неделю, т.е. уменьшалось вдвое.

Туннель Heggira служит примером борьбы с выбросоопасными проявлениями напряженных пород в туннелях, которые проводились в Норвегии по традиционному направлению вдоль фиорда. Общая длина туннеля составила 5,3 км, сечение полукруглой формы имело площадь 39 м².

Породы, пересекаемые туннелем, состояли из разных видов гнейсов с некоторыми включениями амфиболитов. Гнейсы в основном представляли собой монолит со средней степенью трещиноватости и разделения на блоки. Максимальная мощность пород, перекрывающих туннель, равнялась 700 м, общая высота хребта – 1800 м.

Обширное расслоение пород произошло на расстоянии 800 м от портала туннеля. Оно наблюдалось во внешнем углу (со стороны фиорда) кровли сечения и внутреннему углу почвы. Проблемы с устойчивостью пород в туннеле были решены комбинацией анкерной крепи и набрызгбетона, армированного стальным волокном. При проведении участка длиной 3800 м было

установлено 15500 болтов и 2650 м³ набрызгбетона (16 болтов и 2,8 м³ набрызгбетона на цикл подвигания, равный 4 м). Анкерные болты устанавливали после взрывания и оборки породы. После взрывных работ второго и третьего циклов, наносили соответственно первый и второй слои набрызгбетона до достижения его общей толщины 100 мм. Набрызгбетон направляли от середины кровли к уровню примерно 2 м от почвы.

Число анкерных болтов на 1 м туннеля варьировалось в зависимости от интенсивности расслоения пород и составляло 7,7; 4,8; 3,1 и 2,6 болтов соответственно для высокой, средней, низкой и нулевой степеней расслоения. Скорость проходки составляла соответственно 31,7; 39,5; 43,5 и 52,6 м в неделю.

По сравнению с комбинацией «анкерные болты–проволочная сетка», используемой в туннеле Ноуангер-Lanefjord, применение армированного набрызгбетона в туннеле Неггуга оказалось более дорогим, но позволило существенно ускорить выполнение работ.

Гидроэлектрическая станция Kobbelv Hedro Elekteic Project (Норвегия) включала туннели, которые по гранитным гнейсам проводились буровыми туннельными машинами. Здесь из-за высоких горизонтальных напряжений на длине 1700 м головного туннеля происходили расслоения пород и их внезапные выбросы. Поэтому непосредственно вслед за подвиганием забоя с рабочей платформы буровой туннельной машины устанавливали анкерные болты, позволяющие создать общую «балку» из отдельных слоев породы. Однако проведение таких работ привело к снижению скорости проходки, и потребовалось два месяца сверх установленного графика строительства.

Интенсивное расслоение пород произошло также во время работы буровой машиной по сооружению передаточного туннеля комплекса гидроэлектростанции. Высокие тангенциальные напряжения в кровле и обратном своде туннеля требовали немедленной установки крепи после обнажения пород. С этой целью использовали анкерные болты, металлические полосы и сетку, а также набрызгбетон в обратном своде.

Железнодорожный туннель Lotschberg Base (Швейцария) испытал проблемы, связанные с опасностью внезапных выбросов породы. На трассе строительства мощность перекрывающего слоя пород, состоящих из гранита и гранодиорита, достигает 2000 м в двух местах. Мощность более 1500 м представлена на участке туннеля длиной около 9,3 км, в связи с чем риск внезапных выбросов породы в условиях туннеля очень высок.

Оценку зон ожидаемой выбросоопасности при строительстве туннеля производили в такой последовательности:

- исследование природных геостатических напряжений в породном массиве с помощью компьютерного пространственного моделирования методом конечных элементов;
- сравнение результатов моделирования с выводами разведочного бурения;
- анализ происшедших ранее выбросов.

На основании этих исследований, а также другого подземного строительства в подобных условиях (например, туннеля Mont Blanc) в общей длине туннеля Lotschberg Base (34,6 км) были выделены участки с различными категориями степени риска выбросов от А – наибольшей до D – наименьшей.

При работе буровой туннельной машины идентифицировались две основные опасности, связанные с возможностью возникновения внезапного выброса породы:

– появление в забое бесформенных породных блоков. Вместо плоской поверхности с четкими следами резцов рабочей головки забой приобретает беспорядочный вид. Блоки препятствуют работе машины и снижают скорость подвигания забоя;

– обнаружение позади забоя за пределами щита машины тонких слоев пород, которые отделяются от стен и кровли. При большой толще перекрывающих пород по контуру сечения туннеля появляются ниши глубиной до 1 м, которые в отдельных случаях мешают распору боковых домкратов буровой туннельной машины.

При работе машины в выбросоопасных зонах замечались сильные звуковые явления, но выбросы пород не наблюдались, очевидно, по той причине, что большая часть энергии массива высвобождалась в пределах щита, т.е. в 4 м от забоя.

На участках туннеля, строящихся буровзрывным способом, ощущались спорадические звуковые явления. В опасных местах для предотвращения выбросов устанавливали анкерную крепь и наносили набрызгбетон, армированный стальным волокном. По периметру туннеля укрепляли проволочную сетку. Анкерные болты длиной 3–3,5 м располагали по решетке 1×1,5 м и 1×1 м. Дополнительную защиту обеспечивали поданкерные плиты размером 22×50 см.

Гидроэлектрическая станция Alfalfal (Чили) расположена в Чилийских Андах примерно в 50 км восточнее Santiago на высоте 1330 м над уровнем моря. Станция включает в себя подземную систему длиной 25 км подачи напорной воды, состоящую из туннелей Olivares, Colorado и Alfalfal Main Water Tunnel, которые передают воду в объеме 27 м³/с к турбинам электростанции. Разница гидравлических уровней системы составляет 700 м.

При проходке туннеля Alfalfal Main Water Tunnel была встречена зона, опасная по бурному раскрытию трещин, расслоению и внезапным выбросам породы. Характерными особенностями этой зоны были большая мощность перекрывающей толщи пород (более 900 м), трещиноватость породного массива, наличие локальных нарушений, параллельных направлению туннеля. Длина опасной зоны составляла 2250 м, а критического значения опасность выбросов достигала на участке протяженностью 360 м.

В октябре 1990 г. на расстоянии 8450 м от портала произошел большой интенсивности выброс породы, образуя слой сверхэкскавации сечения размером до 2 м² в верхней части левой стены и левой части свода туннеля. Не-

сколько меньшую сверхэкскавацию наблюдали также в нижней части левой стены. Объем выброшенных пород составил примерно 100 м³. Хотя выброс произошел всего через 2 мин после взрывных работ, никто из персонала не пострадал.

Этот случай побудил подрядчика изменить конструкцию крепи туннеля, применив в ней полиуретановый слой, чтобы обеспечить податливость крепи после затвердения бетона, армированного стальным волокном. Скорость подвигания туннеля в зоне со средними напряжениями пород составила 130–150 м/мес, в районе интенсивных напряжений была снижена до 70–80 м/мес.

Таким образом, исследования устойчивости представленных туннелей показали, что улучшение состояния туннеля в условиях выбросов породы достигается не столько усилением несущей способности крепи, сколько улучшением характеристик ее податливости и способности предотвратить фрагментацию и дезинтеграцию трещиноватой зоны, окружающей туннель. Последнее достигается применением металлической сетки и затяжки закрепного пространства.

Анализ требований к крепи туннелей в выбросоопасных условиях показывает, что системы крепи должны:

- быть способны к максимально возможной податливости смыкания конструктивных узлов;
- иметь минимальное сопротивление 10 кН/м²;
- воспринимать динамические перемещения пород во время внезапного выброса, что так же важно, как и несущая способность крепи;
- быть способными сдерживать дезинтеграцию породных масс, окружающих зону экскавации.

1. *Кауфман Л.Л., Кулдыркаев Н.И., Лысиков Б.А.* Строительство туннелей. Монография в 2-х частях. Часть 1. – Донецк: Норд-Пресс, 2006. – 361 с.
2. *Laverdure L.* A Case Study of Mining-induced Seismicity in Relation to Rock burst and Mining Activities at Creighton Mine. – Sudbury, Ontario.
3. *Ohta T.* Core Disking and «Rock burst» in soft Tuffaceous Rock Masses at Jwate Tunnel. <http://www.istaq.jst.go.jp/plastic/423/130.pdf>.
4. *The Lotschberg Base Tunnel-Connecting Europe.* [http://www.srp.ch\(de/referenzen\)/publication/enrefergte/0252-03-04-MA.pdf](http://www.srp.ch(de/referenzen)/publication/enrefergte/0252-03-04-MA.pdf).

Статья поступила в редакцию 11 марта 2009 года