ISSN 2411-3336; e-ISSN 2541-9404

ЗАПИСКИ ГОРНОГО ИНСТИТУТА
Journal of Mining Institute
Сайт журнала: pmi.spmi.ru

Научная статья
Геотехнология и инженерная геология

Исследование особенностей формирования удароопасности в зонах тектонических нарушений Хибинских месторождений

И.И.Багаутдинов✉, **А.Н.Шабаров**
Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия

***Как цитировать эту статью*:** Багаутдинов И.И., Шабаров А.Н. Исследование особенностей формирования удароопасности в зонах тектонических нарушений Хибинских месторождений // Записки Горного института. 2026. Т. 278. С. 30-40. EDN IOOQPZ

Аннотация
Опасность горных ударов на Хибинских месторождениях в значительной степени обусловлена их блоковым строением и природным гравитационно-тектоническим полем напряжений в массиве. Детализированный анализ задокументированных случаев горных ударов на месторождениях Кольского п-ова позволил разработать классификацию геодинамических событий по механизму их возникновения. В ходе анализа было установлено, что в период 1980-2024 гг. 40 % всех горных ударов были приурочены к геологическим нарушениям с высокой прочностью материала-заполнителя. Такие геодинамические события происходят в результате активации комбинированного механизма. Причиной геодинамического события в этом случае является сочетание структурных нарушений массива скальных пород с высоким уровнем тектонических напряжений. Важным критерием удароопасности в районе геологических нарушений в высоконапряженных массивах является их относительная жесткость, а следовательно, и степень трещиноватости применительно к натурным условиям массива горных пород. Механизм такого класса горных ударов может быть описан в рамках теории жестких прессов. По результатам исследований обоснована необходимость уделять серьезное внимание разработке специальных мероприятий для предотвращения или минимизации риска возникновения геодинамических событий при приближении к тектоническим нарушениям с высокой прочностью материала-заполнителя очистных и подготовительных выработок.

Ключевые слова
геодинамика; напряженно-деформированное состояние; горный удар; структурно-тектоническое нарушение; дайка

Финансирование
Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда (проект № 23-17-00144).

Поступила: 20.02.2025 ***Принята: 09.12.2025*** ***Онлайн: 04.02.2026*** ***Опубликована: 12.05.2026***

Введение

Геодинамические события на месторождениях отечественных и зарубежных горно-добывающих предприятий оказывают весьма негативное влияние на производственные процессы, которые в настоящее время все более склоняются к циклично-поточным технологиям.

Геодинамическое событие – внезапное и интенсивное разрушение массива горных пород, сопровождающееся выделением энергии, которое происходит в результате ее накопления в горной породе. Геодинамические события зачастую связаны с тектоническими процессами, сейсмической активностью массива горных пород, а также особенностями изменения напряженного состояния массива при интенсивном ведении очистных работ. Механизм возникновения геодинамического события – система причинно взаимодействующих частей и процессов, которые вызывают это событие (явление).

Таким образом, толчки, микроудары, горные удары, горно-тектонические удары и техногенные землетрясения рассматриваются в статье как формы проявления геодинамических событий. В российской нормативной практике различие между этими формулировками лежит скорее в юридической, а не технической плоскости.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Проблема горных ударов на шахтах известна в мировой практике еще с конца XIX в., когда в 1898 г. в Индии был задокументирован первый такой случай на руднике Ургаум на глубине 320 м [1]. С тех пор ситуация не улучшилась, и каждый год число этих негативных событий увеличивается в основных горно-добывающих регионах мира [2].

Первые исследования горных ударов на угольных месторождениях нашей страны начались лишь во второй половине XX в. В 1992-1994 гг. международной группой специалистов (Рабочая группа по углю Европейской экономической комиссии ООН) была разработана единая классификация динамических явлений на основе энергетической теории горных ударов [3]. Согласно принятой классификации выделяются четыре класса явлений: горные удары, выбросы газа, выбросы угля (породы) и газа, горно-тектонические явления. К этому времени И.М.Петуховым были предложены и обоснованы два основных механизма горных ударов, которые вполне согласовывались с разработанной классификацией [4]. К первому относятся непосредственно горные удары, которые могут произойти в том случае, когда скорость деформирования, вызванная нарастанием удельного давления, превысит возможную скорость пластического (или необратимого) деформирования части массива, находящегося в предельном состоянии. При обосновании второго механизма был предложен термин горно-тектонический удар. В этом случае полагалось, что разрушение происходит в результате деформаций сдвига одной части массива относительно другой при развитии и взаимодействии большого числа сдвиговых трещин под воздействием сдвиговых тектонических напряжений, и его энергетический баланс дополняется энергией сейсмических волн.

В таком виде установленные закономерности и классификации фактически без изменений были перенесены в современную нормативную документацию. К настоящему моменту к внешним признакам удароопасности относят заколообразование, шелушение пород и руд, а также характерные импульсы в акустическом диапазоне частот. Специалисты, занимающиеся проблемой горных ударов, отмечают, что указанные положения не отвечают современным представлениям о горно-тектонических ударах и их механизме, не учитывают специфику рудных месторождений, их структурные особенности [5].

Анализ энергии и координатной привязки гипоцентров крупных сейсмических событий на месторождениях Хибинского массива, карточек горных ударов, а также причин их возникновения поставил перед авторами исследования аналогичный вопрос. Не менее чем в 40 % случаев одной из основных причин горного удара являлось наличие дайки или другого тектонического нарушения. В некоторых случаях в результате горного удара были зафиксированы подвижки в районе подобных пострудных геологических структур. Таким образом, полученные результаты не могли быть описаны в рамках существующей единой классификации динамических явлений.

Целью настоящего исследования является анализ существующих классификаций горных ударов и определение направлений их доработки для более полного учета горно-геологических особенностей месторождений. Для условий Хибинских апатит-нефелиновых месторождений важную роль в формировании удароопасности массива горных пород играют геодинамические события в зоне влияния тектонических нарушений, в том числе скрытых, которые образованы прочным материалом-заполнителем (дайки).

Методы

В качестве объекта исследований в работе рассматриваются месторождения Хибинского массива, самого крупного массива нефелиновых сиенитов в мире, его площадь около 1327 км^2. В литературе Хибинский массив относят к массивам центрального типа, для которых характерно кольцевое расположение слагающих его пород.

Вопросами изучения структурно-тектонических особенностей Хибинских месторождений апатит-нефелиновых руд советские и российские ученые занимаются со второй половины XX в. Весомый вклад в эту область был внесен А.В.Галаховым, Ф.М.Онохиным, В.Н.Титовым, В.М.Тряпицыным, А.А.Козыревым и другими специалистами. К настоящему времени детально изучены основные признаки проявления пликативной и дизъюнктивной тектоники месторождений. Анализ работ, посвященных разломно-блоковому строению Хибин, позволяет утверждать, что пострудная тектоника, изучению влияния которой на геодинамическую опасность массива посвящено исследование, представлена жилами пород дайкового комплекса: лампрофиры – мончикиты и камптоны составляют около 40 % от общего числа даек; основные и ультраосновные магматические породы –

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

оливиниты, пикриты и др.; щелочные габброиды – тералиты, шонкиниты и др. Помимо этого, на месторождениях существуют зоны гипергенного окисления (шпреуштейнизации), приуроченные к крупным дизъюнктивным нарушениям.

Чаще всего дайки образуют маломощные пластообразные тела протяженностью несколько сотен метров. Они образуются в тектонических разломах или на контакте интрузий различного геологического возраста путем заполнения существующих крутопадающих трещин и обладают крайне высокими прочностными и деформационными свойствами. По данным испытаний в лаборатории Санкт-Петербургского горного университета были получены пределы прочности на одноосное сжатие дайки мончикитов в диапазоне от 220 до 280 МПа. При трехосных испытаниях с различной величиной бокового давления (от 10 до 40 МПа) прочность дайки мончикитов находилась в диапазоне 360-532 МПа. Полученные результаты свидетельствуют о том, что прочность пород дайкового комплекса превышает такую же для вмещающих пород в 2-3 раза.

Кроме указанных геолого-структурных особенностей, принятый объект исследования характеризуется крайне неоднородным гравитационно-тектоническим полем напряжений со значительным преобладанием тектонической составляющей, которая превышает гравитационную до 10 раз. Наличие зафиксированных случаев горных ударов, а также вмещающих пород и руд, склонных к хрупкому разрушению, позволяет отнести месторождения Хибинского массива к опасным по горным ударам.

Для установления причин возникновения геодинамических событий в качестве основного метода исследований авторы применяли анализ данных натурных наблюдений за интенсивными геодинамическими событиями, которые проявляются в форме горных ударов и горно-тектонических ударов.

В качестве экспериментальной базы для доказательства выдвинутых предположений и критериев приняты задокументированные случаи горных ударов на Хибинских месторождениях в период с 1980 по 2024 гг. Собранные материалы представлены преимущественно карточками горных ударов, которые включают соответствующую горно-техническую и геологическую документацию, и являются в какой-то степени уникальными, так как охватывают значительный период разработки этих месторождений. Особый интерес представляет информация о глубине зафиксированного события, за последние 40 лет она существенно увеличилась, что позволяет выполнить оценку в динамике, в различных геомеханических и геологических условиях [6-8]. Известно, что анализ факторов и причин возникновения геодинамического события часто является субъективным и в значительной степени зависит от квалификации специалистов службы прогноза и предотвращения горных ударов, геологов, маркшейдеров, а также от очевидцев (при наличии) наблюдаемых событий [9-11].

Все задокументированные случаи горных ударов за указанный период были проанализированы по нескольким основным факторам: горно-геологические условия в районе горного удара; глубина от поверхности в районе предполагаемого гипоцентра события; сведения о напряженном состоянии массива; характерные нарушения крепи и выработок; зафиксированная энергия сейсмического события (при наличии); объем выброса горной массы; сведения о профилактических мероприятиях.

В качестве отправной точки принято мнение экспертов, которое непосредственно отражено в карточке горного удара. К одному из важнейших факторов отнесена геологическая характеристика в районе задокументированного геодинамического события. При анализе основной акцент был смещен на скрытые тектонические нарушения с высокой прочностью материала-заполнителя [2, 12].

Немаловажную роль при анализе сыграла обширная база данных зафиксированных сейсмических событий, в которую были включены основные параметры: расчетные координаты гипоцентра; выделенная энергия; момент; время события. Сейсмические события, которые спровоцировали горные или горно-тектонические удары в период с 2010 по 2024 гг., были совмещены с актуальной литолого-структурной моделью исследуемых месторождений. Для сравнения координат гипоцентров сейсмических событий и их приуроченности к тектоническим нарушениям и породам дайкового комплекса выполнялась дополнительная верификация выводов о причине горного удара [2].

Таким образом, на основании всех доступных авторам факторов каждому конкретному случаю задокументированного горного удара присваивался соответствующий класс (табл.1).

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Результаты

В результате выполненного анализа случаев задокументированных горных ударов на удароопасных месторождениях Кольского п-ова было установлено, что не менее 40 % происходит в результате комбинированного механизма. Причиной горного удара в этом случае является сочетание высокопрочных даек в массиве вмещающих пород с высоким уровнем тектонических напряжений.

В табл.1 представлен вариант классификации горных ударов для удароопасных месторождений Хибин с учетом выделения новых факторов удароопасности. В классификации учтен класс горных ударов, который основан на комбинированном механизме их возникновения в области влияния дайкового комплекса. Такой подход позволяет лучше объяснить причины возникновения горных ударов и более обосновано применять меры по их раннему предупреждению.

Таблица 1

Классификация горных ударов по механизму возникновения

Основные причины и процессы	Механизм возникновения		
	Класс 1	Класс 2	Класс 3
	Горный удар	Горно-тектонический удар	Горный удар в районе дизъюнктивного нарушения
Расположение гипоцентра события	В районе возникновения геодинамического события	На удалении от зафиксированного очага разрушения	В дизъюнктивной области либо непосредственно в дайке
Напряженное состояние массива	$\sigma_\theta / \sigma_c \geq 0{,}56$	$\sigma_г / \sigma_в > 2$	$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_{ci}\left(m_b \frac{\sigma_3}{\sigma_{ci}} + s\right)^a$
Физико-механические свойства образца/массива	$E_R / M_R < 1$	Отсутствие открытых трещин, зоны дробления и других нарушений вблизи сместителя	$E_d F / E_m F < 1$
Горно-геологические условия	Массив горных пород, склонный к хрупкому разрушению	Тектоническое нарушение дизъюнктивного типа в массиве горных пород	Дайка высокой прочности или в сочетании с тектонизированными контактами. Интрузивные взаимопересечения, преимущественно под острыми углами
Проявления опасного геомеханического состояния массива	Характерный треск породы, стреляние, выброс горной массы	Сдвиг со смещением по поверхности ослабления не менее III-IV ранга, часто сопровождается катастрофическими последствиями, включающими разрушение горной выработки, очистного блока или потерю целого горизонта	Выброс горной породы в районе залегания даек различного генезиса, в том числе скрытых

Примечания: σ_1, σ_3 – максимальные и минимальные главные напряжения; σ_{ci} – прочность породы в образце при испытании в условиях одноосного сжатия; m_b, s, a – эмпирические параметры критерия прочности Хука – Брауна; σ_c – предел прочности горной породы на одноосное сжатие (в образце); σ_θ – тангенциальное напряжение; $\sigma_г$ – горизонтальная составляющая напряжений в массиве; $\sigma_в$ – вертикальная составляющая напряжений в массиве; E_R – модуль упругости образца породы; M_R – модуль спада образца породы; E_d – модуль деформации дайки; E_m – модуль деформации вмещающих пород; F – площадь контакта дайки и вмещающих пород в зоне опорного давления.

Проблема прогноза и предотвращения горных ударов тесно связана с раскрытием непосредственно механизма разрушения горных пород. К настоящему моменту не существует единой теории механизма разрушения горных пород, так как этот процесс является крайне сложным природным явлением и зависит от множества природных и техногенных факторов [13]. Специалисты в настоящее время опираются на несколько основных концепций (теорий), которые тем или иным образом позволяют объяснить это явление, и, соответственно, разработать комплекс эффективных мероприятий по снижению риска горных ударов. Самыми распространенными являются энергетическая теория, прочностная теория, теория жестких прессов, математическая теория устойчивости (неустойчивости), теория склонности пород к горным ударам [14].

Для обоснования результатов настоящего исследования приведено краткое описание двух теорий возникновения горных ударов – энергетической и теории жестких прессов. Сторонниками энергетической теории были И.М.Петухов и другие ведущие ученые [15]. По И.М.Петухову, в процессе

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Записки Горного института. 2026. Т. 278. С. 30-40
© И.И.Багаутдинов, А.Н.Шабаров, 2026

динамического явления происходит перераспределение энергии составляющих элементов системы. Этот переход подчиняется закону сохранения энергии. Условия перехода из потенциальной энергии в кинетическую при динамических явлениях определяются энергетическим балансом системы «выработка-горный массив».

Баланс энергии в упрощенном виде может быть представлен следующим выражением [16]:

$$W = W_y + W_p,$$

где W – запас полной энергии, участвующей в горном ударе, Дж; W_y – потенциальная энергия, накопленная в разрушаемом материале, Дж; W_p – потенциальная энергия, накопленная во вмещающих породах, Дж.

Исходя из энергетического баланса, динамическое событие в системе происходит при изменении равновесного состояния в результате действия ряда факторов, т.е. количество выделенной энергии превышает количество энергии, которое способна абсорбировать система.

Первые объяснения динамических проявлений горного давления в результате влияния упругих деформаций вмещающих пород вытекали из теории жестких прессов. В 60-е годы XX в. Cook и Hojem получили полную диаграмму деформирования горных пород с помощью жестких прессов. Основная идея заключается в том, что в процессе нагружения образца происходит его разрушение в динамической форме при условии величин жесткости нагружающего устройства меньше жесткости образца в запредельной области диаграммы деформирования (рис.1) [17]:

$$k_m < -f'(\varepsilon_1),$$

где ε_1 – деформации, соответствующие пределу прочности образца на кривой в осях напряжения-деформации; $f'(\varepsilon_1)$ – тангенс угла наклона касательной к кривой деформирования в осях напряжения-деформации.

В нашей стране изучением поведения образцов в запредельной области (с помощью жестких прессов) занимались А.Г.Протосеня, А.Н.Ставрогин, Б.Г.Тарасов и др. [18-20].

Авторами настоящей работы предлагается объяснить механизм горных ударов в районе залегания даек или в сочетании с тектоническими нарушениями дизъюнктивного типа с позиций теории жестких прессов [21]. Геолого-структурные нарушения рассматриваются в данном случае с точки зрения их потенциальной возможности накапливать потенциальную энергию в результате очистных работ или перераспределения напряжений в массиве горных пород, а также с учетом их прочностных и деформационных свойств. Такой механизм возникновения горного удара 3-го класса (табл.1) в районе тектонического нарушения, в том числе скрытого, имеет следующие характерные стадии:

• 1-я стадия – упругая. В условиях сформированного поля гравитационно-тектонических напряжений в районе дайки происходит накопление энергии упругой деформации, незначительное изменение физико-механических свойств пород, закрытие пор и микротрещин, может наблюдаться увеличение скорости прохождения ультразвуковых волн.

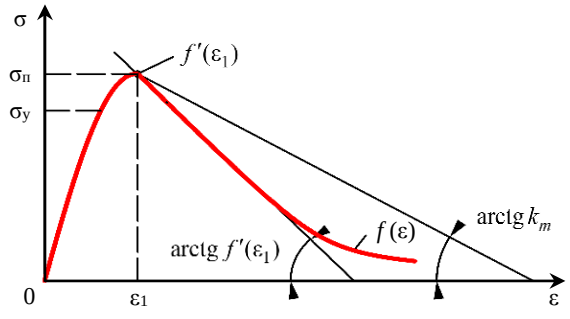


Рис.1. Диаграмма напряжения-деформации для породного образца и нагружающего устройства при динамическом (неконтролируемом) разрушении; σ_y – предел упругости массива, Па; $\sigma_п$ – предел прочности массива, Па; ε_1 – деформации, соответствующие пределу прочности горной породы; $f(\varepsilon)$ – полная диаграмма деформирования горной породы; k_m – безразмерный нормированный параметр

• 2-я стадия – неупругое деформирование. При достижении предела упругости вмещающих пород (на контакте с дайкой) наступает область необратимых деформаций, которая продолжается до предела прочности и часто напрямую связана со значительным изменением напряженно-деформированного состояния породного массива.

• 3-я стадия – запредельное деформирование в динамическом режиме, наступает после достижения предела прочности вмещающих пород (на контакте с дайкой) и продолжается до предела

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

остаточной прочности. Характерной особенностью стадии является продолжающийся процесс деформирования при постепенно снижающейся нагрузке, общая площадь поверхностей сдвига начинает увеличиваться, оказывая все меньшее сопротивление нагрузке. Именно на этом участке происходит динамическое (неконтролируемое) разрушение, при условии притока достаточного количества энергии, запасенной внутри системы «массив-дизъюнктив». Из-за инерции возникает ударное воздействие дайки и вмещающих пород с одной стороны по вмещающему массиву с другой, что приводит к горному удару 3-го класса. Возникают сейсмические колебания, вызванные сдвижением горных пород.

Процесс деформирования пород в районе прочных даек на 3-й стадии также является причиной возникновения стреляний, интенсивных заколообразований и других опасных динамических форм проявления горного давления.

Схема описанного механизма горного удара 3-го класса в районе тектонического нарушения для идеальных условий представлена на рис.2.

В геомеханических условиях объемного напряженного состояния массив вмещающих пород в дизъюнктивной области достигает предела прочности $\sigma_п$. Далее процесс продолжается до достижения предела остаточной прочности σ_0. Для поддержания этого процесса необходима энергия, которая определяется величиной необратимых деформаций в запредельной области [19, 22]. Накопленная в массиве энергия на этом этапе уменьшится на величину $d\sigma$:

$$W = \int_{\varepsilon_1}^{\varepsilon_2} f(\varepsilon).$$

Используя феноменологический подход, представим, что дайка будет достаточно трещиноватой, т.е. ее жесткость $E_d F$ будет меньше жесткости вмещающих пород дизъюнктивной области. Площадь F определяется размером области контакта дайки и вмещающих пород в зоне опорного давления, возникающей от проходки выработки. В этом случае дополнительно выделенная энергия – сумма составляющих кинетической энергии разлетающихся частиц, колебательных движений системы и тепловой энергии, приведет к разрушению массива в динамической форме. Величину этой энергии можно определить по формуле [19, 22]:

$$W_d = \int_{\varepsilon_1}^{\varepsilon_2} \left(f_1(\varepsilon) - f(\varepsilon) \right) d\varepsilon.$$

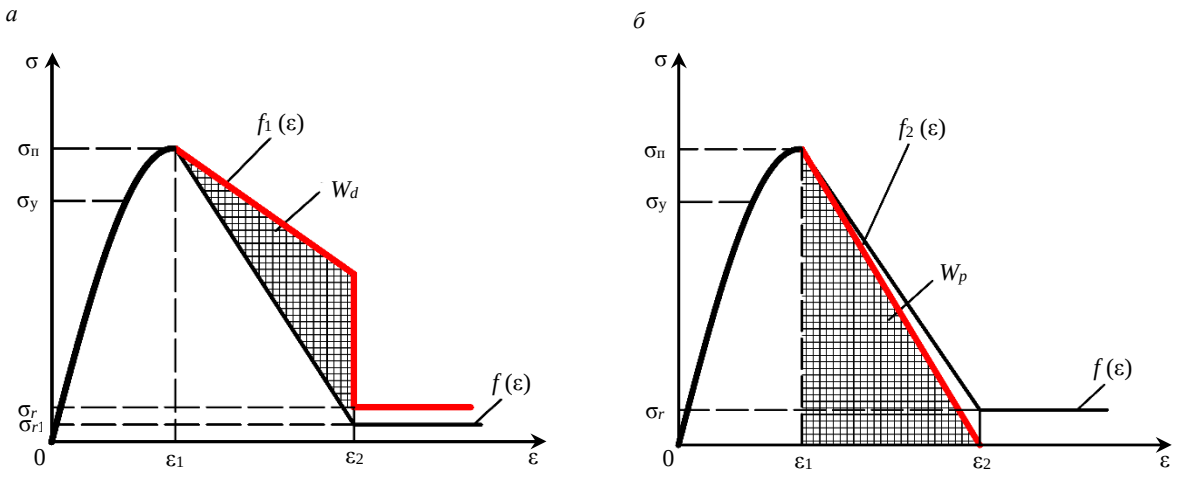


Рис.2. Механизм возникновения горного удара 3-го класса: *а* – опасное геомеханическое состояние массива в дизъюнктивной области; *б* – неопасное геомеханическое состояние массива в дизъюнктивной области; $f(\varepsilon)$ – кривая деформирования вмещающих пород; $f_1(\varepsilon)$, $f_2(\varepsilon)$ – кривые деформирования дайки; W_d, W_p – упругая энергия, запасенная в дайке для случаев опасного и неопасного геомеханического состояния массива, Дж; σ_r, σ_{r1} – пределы остаточной прочности вмещающих пород и дайки, Па; ε_1, ε_2 – деформации, соответствующие пределу прочности и остаточной прочности массива

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

В противном случае, при жесткости дайки или иного прочного включения больше жесткости пород $E_dF > E_mF$, выделенной энергии окажется недостаточно для возникновения геодинамического события и процесс разрушения будет контролируемым (безопасным) непосредственно до достижения массивом остаточной прочности:

$$W_p = \int_{\varepsilon_1}^{\varepsilon_2} f_2(\varepsilon) d\varepsilon.$$

Таким образом, одним из основных критериев удароопасности в высоконапряженных массивах в районе дизъюнктивных нарушений будет соотношение модулей деформации даек и вмещающих пород в дизъюнктивной области массива. Количественные значения и область применимости указанного критерия удароопасности, основанные на выдвинутой идее, еще предстоит получить, в том числе методами численного моделирования и физического моделирования на эквивалентных материалах. Анализ базы данных горных ударов позволил авторам классифицировать их по механизму возникновения в соответствии с табл.1. Результаты анализа приведены на рис.3.

Начиная с нулевых годов XXI в., наблюдается стабилизация числа горных ударов на исследуемых месторождениях с некоторой тенденцией к их плавному уменьшению, что свидетельствует о высокой интенсивности профилактических мероприятий и достаточной компетентности специалистов, занимающихся проблемой горных ударов. Необходимо отметить, что все события фиксируются при постоянном увеличении глубины ведения очистных работ в сложных горно-геологических условиях [23, 24].

Из всех задокументированных событий авторы отнесли к 3-му классу порядка 40 %. Схожие результаты были получены А.А.Козыревым при оценке факторов возникновения геодинамических явлений на месторождениях Апатитовой дуги [25]. В период 1980-1990 гг. таких событий было зарегистрировано 50 %. Это значит, что механизм каждого второго события является комбинированным, т.е. приурочен к действию высоких тектонических напряжений в массиве, а также наличию геологического нарушения, заполненного прочным материалом-заполнителем. При этом процентное соотношение событий 3-го класса изменяется с течением времени вполне закономерно. В период 2010-2024 гг. авторы отнесли к третьему классу 40 % от всех зафиксированных сейсмических событий за этот период.

Гипоцентры сейсмических событий, горных ударов или горно-тектонических ударов за последние 14 лет, совмещенные с литолого-структурной моделью рассматриваемого месторождения, приведены на рис.4.

Из анализа рис.4 видно, что все горные удары с энергией сейсмических событий от $1{,}7\times10^6$ до $1{,}6\times10^8$ Дж зафиксированы в районе залегания мощных тектонических нарушений или в районе их сопряжений. При этом порядка 40 % горных ударов зафиксировано в районе залегания двух мощных даек (рис.4, *б*), что фактически подтверждает ранее сделанные выводы о приуроченности их к 3-му классу по механизму возникновения. В результате анализа установлено, что часто гипоцентры сейсмических событий могут находиться на отдалении от контура очистных и

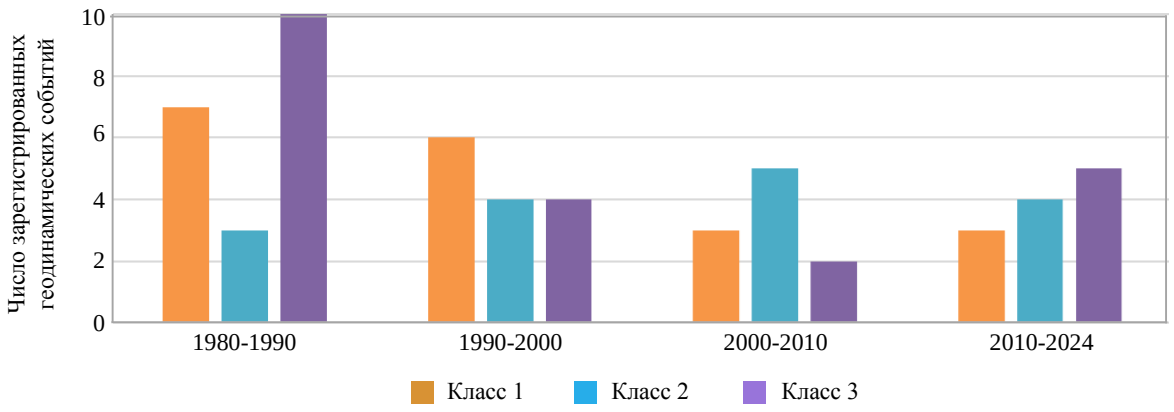


Рис.3. Классификация горных ударов по механизму их возникновения

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

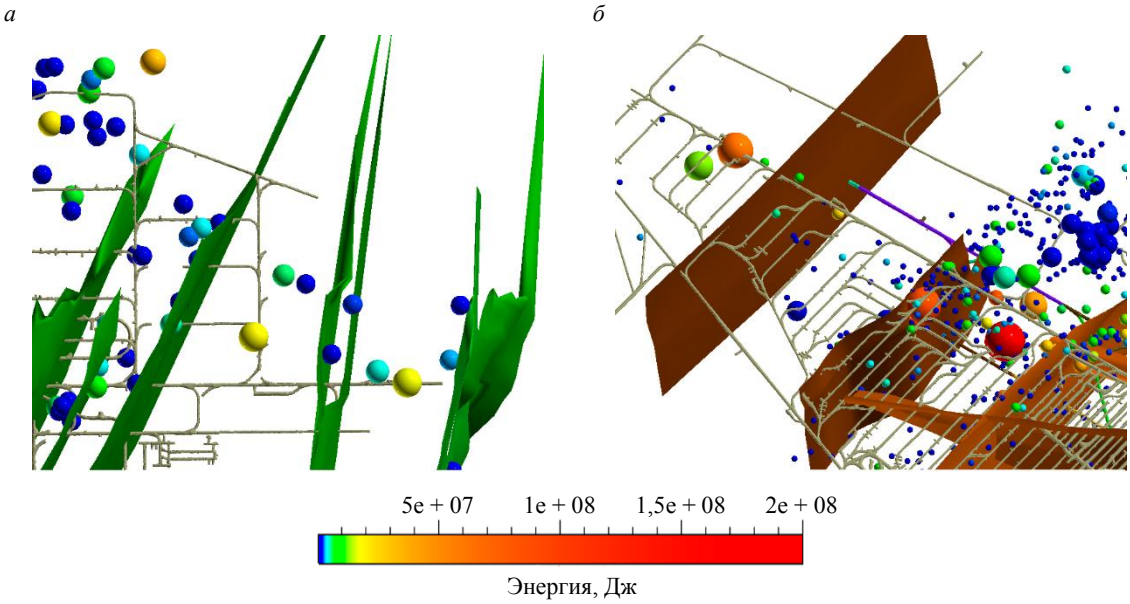


Рис.4. Локализация гипоцентров и энергии сейсмических событий (горных ударов):
а – в районе залегания тектонических нарушений; *б* – в районе залегания мощных даек

подготовительных выработок. В этом случае следует также разделять механизм очага геодинамического события и последствий, которые были зафиксированы в выработках и камерах по результатам визуально-измерительного контроля [26].

Обсуждение

Изучением механизма и генерации землетрясений (горные удары являются частным случаем землетрясения) занимались многие ученые. В работе [27] со ссылкой на проф. Ю.Л.Ребецкого сделан вывод, что известные представления о процессе подготовки землетрясения перешли из механики прочности конструкционных материалов и не учитывают особенности строения сейсмогенных участков земной коры – разломных зон. При этом согласно Рихтеру [27] возникновение землетрясений связано с существованием локализованных зон пониженной прочности, для которых характерны низкие уровни девиаторных напряжений.

Одним из первых, кто обратил внимание на региональные структуры, такие как дизъюнктивы и дайки, был Durrheim [28]. Он провел комплексный анализ механизмов и принципиальных причин возникновения 21 горного удара на глубоких золотых рудниках Южной Африки и пришел к выводу, что частой причиной возникновения этих явлений является расположение шахт, а также наличие указанных структурно-тектонических особенностей массива горных пород.

Согласно выводам [26], горные удары 2-го класса, т.е. возникновения первичных и реактивных сдвигов по существующим тектоническим нарушениям, могут происходить только при крупномасштабных горных работах.

Проведенное авторами работы исследование выгодно отличается тем, что приведенные результаты ранних работ [29, 30] не принимают во внимание скрытые дайки, которые могут залегать в субпараллельном или ортогональном направлении от краевой части массива. Физико-механические свойства этих нарушений, а также содизъюнктивной области массива позволяют отнести их к потенциально опасным или опасным на основании определенных геологических и геомеханических факторов. К таковым следует отнести прочностные и деформационные характеристики, генезис, подверженность смятию или рассланцеванию и др. Причины возникновения горного удара 3-го класса органично встраиваются в хорошо известную теорию жестких прессов, которая имеет немало сторонников среди специалистов, хотя и не лишена некоторых недостатков. В частности, основной вопрос, который стоит перед исследователями, это высокая трудоемкость определения деформационных свойств непосредственно в массиве горных пород.

Разумеется, наряду с единой классификацией динамических явлений, разработанной при участии И.М.Петухова, существует целый ряд других, которые также нашли свое применение в горном деле. Приведем наиболее известные из них, это в значительной поможет при обсуждении

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

результатов исследования и их места в рамках существующих теорий. Наиболее известную на сегодняшний день классификацию горных ударов, основанную на проявлениях сейсмичности и связанным с ними механизмом разрушения массива, предложили в 1994 г. Ortlepp и Stacey [26]. Согласно их концепции, проявление сейсмичности может быть выражено в виде стреляния горных пород, отслаивания (для слоистых и трансверсально анизатропных пород), вывала горной массы, разрушения пород в результате сдвига, а также сдвига со смещением (табл.2).

Таблица 2

Классификация горных ударов по признакам проявления сейсмичности [26]

Проявления сейсмичности (механизм разрушения)	Предполагаемый механизм очага	Первое вступление сейсмограммы	Магнитуда по шкале Рихтера
Стреляние горных пород	Поверхностное разрушение с резким выбросом кусков породного массива	Обычно не фиксируется, может быть имплозивным	–0,2-0
Отслаивание (слоистые и трансверсально анизотропные породы)	Отслаивание ранее существовавших больших плит (слоев), ориентированных параллельно обнажению	Имплозивный	0-1,5
Вывал породы из забоя	Интенсивный выброс породы из забоя тоннеля (выработки)	Имплозивный	1,0-2,5
Разрушение пород в результате сдвига	Интенсивное формирование трещин сдвига через ненарушенный массив горных пород	Двойной парный сдвиг	2,0-3,5
Сдвиг со смещением (подвижка)	Внезапное возобновление движения блоков по существующему разлому или контакту с дайкой	Двойной парный сдвиг	2,5-5,0

Необходимо четко разделять механизм очага геодинамического события и вызванные им повреждения на поверхности обнажения (механизм разрушения). Часто эти два механизма могут быть отличны и фиксироваться на определенном расстоянии друг от друга [26].

Примерно в то же время Hedley [29] классифицировал все геодинамические события по трем категориям (на примере шахт провинции Онтарио): 1) естественные геодинамические события, автор особо подчеркивает, что природные напряжения в массиве достаточны для того, чтобы быть причиной разрушения краевой части массива при активном ведении горно-проходческих работ; 2) индуцированные геодинамические события, такие события возникают при ведении очистных работ и управлении горным давлением при помощи целиков. Причина в данном случае объясняется высокой концентрацией напряжений в оставшихся структурах при нулевом значении латеральной составляющей тензора напряжений ($\sigma_2 = \sigma_3 = 0$); 3) геодинамические события – в результате внезапной подвижки вдоль ослабленной плоскости контакта литологических разностей или иных нарушений. Такой механизм является аналогичным механизму землетрясений, изучаемому в сейсмологии.

Как видно, первые два пункта классификации Hedley [29] во многом соответствуют представлениям И.М.Петухова, хотя были получены в совершенно иных горно-геологических и геомеханических условиях рудных месторождений. Классификацией горных ударов небезуспешно занимались и другие известные специалисты. Например, Hoek [30] выделял геодинамические события двух типов: разрыв и сдвиг. Оба основываются на соответствующих, присущих им механизмах. Наиболее удачную, на наш взгляд, классификацию геодинамических событий приводит в своей работе Tang [31]. В разработанной им классификации за основу взяты три основных механизма возникновения геодинамического события. Первый механизм связан напрямую с существованием выработки, очистной камеры или целика и возникает в результате превышения определенного уровня напряжений в краевой части массива или в его окрестности. Соответственно первый механизм логичным образом объединяет целый класс, приводя его к единому знаменателю. Второй механизм связан непосредственно со структурными особенностями массива, т.е. возникновение геодинамического события обусловлено наличием тектонических нарушений различного генезиса. В этом случае источником геодинамического события является подвижка по существующим поверхностям ослабления или иная сдвиговая активность в массиве. Третьим механизмом геодинамического события [31] является комбинация первых двух механизмов.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Таким образом, предложенные авторами настоящей работы дополнения к классификации геодинамических событий не выходят за рамки существующих в мире представлений [31-33] и в то же время позволяют другим авторам выполнять собственные исследования в рамках предложенного подхода [34]. Такой выбор кажется еще более очевидным сегодня, когда исследователи во всем мире выделяют большое количество особенностей возникновения геодинамических явлений, индивидуальных механизмов, присущих конкретным геологическим и геомеханическим условиям разработки [35, 36].

Заключение

По результатам исследований выявлены основные факторы и причины возникновения горных ударов в высоконапряженных массивах Хибинских апатит-нефелиновых месторождений. В 40 % от всех зарегистрированных здесь геодинамических событий причиной являлось наличие высокопрочных даек в массиве вмещающих пород с высоким уровнем тектонических напряжений. При этом установлено, что отдельные известные классификации горных ударов не в полной мере учитывают существующие особенности проявления удароопасности.

Механизм процесса формирования удароопасности в условиях Хибинских месторождений может быть объяснен с позиций существующей теории жестких прессов. Исходя из этого, одним из важных критериев удароопасности массива в районе даек является их жесткость относительно вмещающих пород содизъюнктивной области в запредельной области полной диаграммы деформирования. Предполагается, что дайки с незначительными нарушениями гораздо более удароопасны, чем монолитные и ненарушенные. Наиболее опасная ситуация прогнозируется при проходке выработок в направлении, субпараллельном скрытому нарушению, особенно на уменьшающийся целик между стенкой выработки и дайковым комплексом или разломом.

Для условий Хибинских месторождений в классификации горных ударов целесообразно учитывать установленные особенности проявления удароопасности, что даст возможности более обоснованно применять меры по раннему предупреждению горных ударов и снижению геодинамического риска.

Авторы выражают благодарность профессору В.Л.Трушко за высказанные критические замечания и предложения при подготовке статьи.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Еременко В.А.* Природные и техногенные факторы возникновения горных ударов при разработке железорудных месторождений Западной Сибири // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2012. № 11. С. 50-59.

2. *Villalobos F.A., Villalobos S.A., Aguilera L.E.* Evaluation of rockburst energy capacity for the design of rock support systems for different tunnel geometries at El Teniente copper mine // Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy. 2022. Vol. 122. № 9. P. 505-515. DOI: 10.17159/2411-9717/1249/2022

3. Прогноз и предотвращение горных ударов на рудниках / Под ред. И.М.Петухова, А.М.Ильина, К.Н.Трубецкого. М.: Изд-во Академии горных наук, 1997. 376 с.

4. *Ловчиков А.В.* Изменение представлений о механизме горных и горно-тектонических ударов в рудниках на современном этапе // Записки Горного института. 2010. Т. 188. С. 63-65.

5. *Ловчиков А.В.* Новая концепция механизма горно-тектонических ударов и других динамических явлений для условий рудных месторождений // Горные науки и технологии. 2020. Т. 5. № 1. С. 30-38. DOI: 10.17073/2500-0632-2020-1-30-38

6. *Маринин М.А., Карасев М.А., Поспехов Г.Б. и др.* Инженерно-геологическое обоснование параметров кучного выщелачивания золота из бедных песчано-глинистых руд // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2023. № 9. С. 22-37 (in English). DOI: 10.25018/0236_1493_2023_9_0_22

7. *Морозов К.В., Демехин Д.Н., Бахтин Е.В.* Многокомпонентные датчики деформаций для оценки напряженно-деформированного состояния массива горных пород // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2022. № 6-2. С. 80-97. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_62_0_80

8. *Нгуен Т.Т., Карасев М.А.* Расчет оптимальных геометрических параметров тоннеля квазипрямоугольного поперечного очертания по силовому фактору // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2021. № 6. С. 59-71. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_6_0_59

9. *Glinskii V.V., Trushko V.L.* Design of seismic-resistant linings for rock burst conditions // Advances in Raw Material Industries for Sustainable Development Goals. London: CRC Press, 2021. P. 99-104. DOI: 10.1201/9781003164395

10. *Ильинов М.Д., Петров Д.Н., Карманский Д.А., Селихов А.А.* Аспекты физического моделирования процессов структурных изменений образцов горных пород при термобарических условиях больших глубин // Горные науки и технологии. 2023. Т. 8. № 4. С. 290-302. DOI: 10.17073/2500-0632-2023-09-150

11. *Вербило П.Э., Вильнер М.А.* Изучение анизотропии прочности и масштабного эффекта трещиноватого массива горных пород // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2022. № 6-2. С. 47-59. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_62_0_47

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

12. *Karasev M.A., Protosenya A.G., Katerov A.M., Petrushin V.V.* Analysis of shaft lining stress state in anhydrite-rock salt transition zone // Rudarsko-geološko-naftni zbornik. 2022. Vol. 37. № 1. P. 151-162. DOI: 10.17794/rgn.2022.1.13

13. *Jian Zhou, Xibing Li, Mitri H.S.* Evaluation method of rockburst: State-of-the-art literature review // Tunnelling and Underground Space Technology. 2018. Vol. 81. P. 632-659. DOI: 10.1016/j.tust.2018.08.029

14. *Zhou Jian, Li Xibing, Shi Xiuzhi.* Long-term prediction model of rockburst in underground openings using heuristic algorithms and support vector machines // Safety Science. 2012. Vol. 50. Iss. 4. P. 629-644. DOI: 10.1016/j.ssci.2011.08.065

15. *Askaripour M., Saeidi A., Rouleau A., Mercier-Langevin P.* Rockburst in underground excavations: A review of mechanism, classification, and prediction methods // Underground Space. 2022. Vol. 7. Iss. 4. P. 577-607. DOI: 10.1016/j.undsp.2021.11.008

16. *Петухов И.М., Линьков А.М.* Механика горных ударов и выбросов. М.: Недра, 1983. 280 с.

17. *Manchao He, Tai Cheng, Yafei Qiao, Hongru Li.* A review of rockburst: Experiments, theories, and simulations // Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering. 2023. Vol. 15. Iss. 5. P. 1312-1353. DOI: 10.1016/j.jrmge.2022.07.014

18. *Иовлев Г.А., Протосеня А.Г., Петров Н.Е.* Определение параметров механических моделей грунтов по данным полевых испытаний // Основания, фундаменты и механика грунтов. 2023. № 6. С. 7-13.

19. *Тарасов Б.Г.* Запредельные свойства горных пород и их связь с динамикой спонтанного разрушения // Горный журнал. 2021. № 1. С. 13-19. DOI: 10.17580/gzh.2021.01.03

20. *Ставрогин А.Н., Протосеня А.Г.* Механика деформирования и разрушения горных пород. М.: Недра, 1992. 224 с.

21. *Jian Zhou, Yulin Zhang, Chuanqi Li et al.* Rockburst prediction and prevention in underground space excavation // Underground Space. 2024. Vol. 14. P. 70-98. DOI: 10.1016/j.undsp.2023.05.009

22. *Тарасов Б.Г.* Парадоксы прочности и хрупкости горных пород в условиях сейсмических глубин // Горный журнал. 2020. № 1. С. 11-17. DOI: 10.17580/gzh.2020.01.02

23. *Казанин О.И., Сидоренко А.А., Евсюкова А.А., Лю Цзылу.* Обоснование технологий поддержания выемочных выработок при отработке пологих угольных пластов на больших глубинах // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2023. № 9-1. С. 5-21. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_91_0_5

24. *Абрашитов А.Ю., Шабаров А.Н., Корчак П.А., Куранов А.Д.* Опыт взаимодействия с горным предприятием при решении проблем геодинамической безопасности // Горный журнал. 2023. № 5. С. 40-48. DOI: 10.17580/gzh.2023.05.06

25. *Козырев А.А., Семенова И.Э., Жукова С.А., Журавлева О.Г.* Факторы изменения сейсмического режима и локализации опасных зон при крупномасштабном техногенном воздействии // Горная промышленность. 2022. № 6. С. 95-102. DOI: 10.30686/1609-9192-2022-6-95-102

26. *Ortlepp W.D., Stacey T.R.* Rockburst mechanisms in tunnels and shafts // Tunnelling and Underground Space Technology. 1994. Vol. 9. Iss. 1. P. 59-65. DOI: 10.1016/0886-7798(94)90010-8

27. *Пантелеев И.А., Наймарк О.Б.* Современные тенденции в области механики тектонических землетрясений // Вестник Пермского научного центра УрО РАН. 2014. № 3. С. 44-62.

28. *Durrheim R.J., Roberts M.K.C., Haile A.T. et al.* Factors influencing the severity of rockburst damage in South African gold mines // Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy. 1998. Vol. 98. Iss. 2. P. 53-57. DOI: 10520/AJA0038223X_2507

29. *Hedley D.G.F.* Rockburst handbook for Ontario hardrock mines. Canada Centre for Mineral and Energy Technology, 1992. CANMET Special Report 92-1E, 312 p. DOI: 10.4095/305107

30. *Hoek E., Brown E.T.* The Hoek–Brown failure criterion and GSI – 2018 edition // Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering. 2019. Vol. 11. Iss. 3. P. 445-463. DOI: 10.1016/j.jrmge.2018.08.001

31. *Baoyao Tang.* Rockburst Control Using Destress Blasting: A Thesis Submitted to the Faculty of Graduate Studies and Research in Partial Fulfilment of the Requirements for the Degree of Doctor of Philosophy. Montreal: McGill University, 2000. 248 p. URL: https://escholarship.mcgill.ca/concern/theses/xd07gv32k (дата обращения 20.02.2025).

32. *Xingdong Zhao, Shujing Zhang, Qiankun Zhu et al.* Dynamic and static analysis of a kind of novel J energy-releasing bolts // Geomatics, Natural Hazards and Risk. 2020. Vol. 11. Iss. 1. P. 2486-2508. DOI: 10.1080/19475705.2020.1833991

33. *Yang Fanjie, Zhou Hui, Xiao Haibin et al.* Numerical simulation method for the process of rockburst // Engineering Geology. 2022. Vol. 306. № 106760. DOI: 10.1016/j.enggeo.2022.106760

34. *Локтюкова О.Ю., Кравчук А.В.* Методика прогнозирования тектонических нарушений на основе переинтерпретации данных геологоразведочных работ // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2025. № 2. С. 114-129. DOI: 10.25018/0236_1493_2025_2_0_114

35. *Litvinenko V., Trushko V.* Modelling of geomechanical processes of interaction of the ice cover with subglacial Lake Vostok in Antarctica // Antarctic Science. 2025. Vol. 37. Iss. 1. P. 39-48. DOI: 10.1017/S0954102024000506

36. *Сидоренко А.А., Дмитриев П.Н., Алексеев В.Ю., Сидоренко С.А.* Совершенствование технологических схем отработки склонных к самовозгоранию пластов угля, опасных по горным ударам // Записки Горного института. 2023. Т. 264. С. 949-961.

***Авторы*: Илья Илдарович Багаутдинов,** *канд. техн. наук, ведущий научный сотрудник* (*Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия*), *bagautdinov_ii@pers.spmi.ru, https://orcid.org/0009-0000-9590-8764*, **Аркадий Николаевич Шабаров,** *д-р техн. наук, директор научного центра* (*Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия*), *https://orcid.org/0000-0001-7925-3163*.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0