



Геодинамические эффекты предельно напряженного состояния земной коры

А.С. Батугин✉

Национальный исследовательский технологический университет МИСИС, г. Москва, Российская Федерация
✉as-bat@mail.ru

Резюме: Такие геодинамические явления, как горные удары и сильные техногенные землетрясения с глубиной гипоцентра, намного превышающей глубины ведения горных работ; возникновение сейсмических активизаций на больших расстояниях от объектов освоения недр; локализация эпицентров сильных сейсмических событий на периферии облака форшоков и афтершоков; существование и функционирование блочной структуры земной коры и ее дегазация по реактивированным нарушениям; «медленные» землетрясения; существование силового каркаса земной коры и его реакция на геодинамические процессы в недрах, – требуют дальнейшего исследования. Основная цель публикации – проанализировать примеры проявления перечисленных геодинамических явлений в промышленных районах с точки зрения гипотезы о существовании в земной коре слоя предельно напряженного состояния мощностью от земной поверхности до некоторой глубины для дальнейшего раскрытия природы взаимодействия глобальных геодинамических и локальных геомеханических процессов в районах освоения недр. Геодинамические эффекты, связанные с предельно напряженным состоянием земных недр, рассмотрены на примерах сильных землетрясений в промышленных районах (Бачатское (2013, $M = 6,1$), Нефтегорское (1995, $M = 7-7,2$), Веньчуаньское (2008, $M = 7,8$)), техногенная природа которых предполагается и дискутируется, сейсмических активизаций в районах ведения горных работ и районе реализации геотермальных проектов, блочных структур земной коры Кемеровской области.

Ключевые слова: геодинамическое явление, горный удар, техногенное землетрясение, сейсмичность, магнитуда, глубина гипоцентра, предельно напряженное состояние, блоки земной коры, дегазация недр, медленное землетрясение

Благодарности: Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект №22-27-00728).

Для цитирования: Батугин А.С. Геодинамические эффекты предельно напряженного состояния земной коры. *Горная промышленность*. 2023;(S1):14–21. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2023-S1-14-21>

Geodynamic effects of the critically stressed state of the earth's crust

A.S. Batugin✉

National University of Science and Technology "MISIS", Moscow, Russian Federation
✉as-bat@mail.ru

Abstract: Such geodynamic phenomena as rock bursts and strong man-made earthquakes with a hypocenter depth much greater than the depth of mining operations; the occurrence of seismic activations at large distances from the influence area to the Earth interior; localization of epicenters of strong seismic events at the periphery of the foreshock and aftershock zone, the existence and functioning of the block structure of the earth's crust and its degassing along reactivated faults; "slow slip" earthquake; the existence of a power frame in the earth's crust and its response to geodynamic processes in the depths require further research. The main purpose of the publication is to summarize the factual data on the manifestation of the listed geodynamic phenomena in industrial areas from the viewpoint of the hypothesis that within the earth crust there exists a layer of the critical stress state with the thickness from the earth's surface to a certain depth in order to further reveal the nature of the interaction of global geodynamic and local geomechanical processes in the mining areas. Geodynamic effects associated with the critical stress state of the earth's interior are considered using the examples of strong earthquakes in industrial areas (Bachat (2013, $M = 6.1$), Neftegorsk (1995, $M = 7-7.2$), Wenchuan (2008, $M = 7.8$)) the man-made nature of which is assumed and discussed. Also seismic activations in the areas of mining operations and the area of geothermal projects, block structures of the earth's crust of the Kemerovo and Moscow regions are considered.

Keywords: geodynamic phenomenon, rock burst, technogenic earthquake, seismicity, magnitude, hypocenter depth, critical stress state, crustal blocks, degassing of the Earth interior, slow slip earthquake

Acknowledgments: This work was financially supported by the Russian Science Foundation (Project No. 22-27-00728).

For citation: Batugin A.S. Geodynamic effects of the critically stressed state of the earth's crust. *Russian Mining Industry*. 2023; (1 Suppl.):14–21. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2023-S1-14-21>



Введение

Проблема геодинамической опасности при освоении недр и земной поверхности остается одной из актуальных в России [1–3] и других странах мира [4; 5]. Сильные горные удары рассматриваются как один из видов техногенных сейсмических явлений [6–8], и проблема геодинамической опасности смыкается с проблемой сейсмической опасности. Поскольку существует взаимодействие между глобальными геодинамическими и локальными геомеханическими процессами [9], то проблема геодинамической опасности не может быть решена только с применением локальных мероприятий без учета геодинамической ситуации в регионе [10]. Горняки часто не располагают возможностями управлять опасными геодинамическими процессами, которые развиваются за пределами зоны ведения горных работ, иногда за пределами шахтных полей или на больших глубинах. Требуется дальнейшее исследование по ряду вопросов геодинамики недр, в частности, по дальнейшему раскрытию природы взаимодействия глобальных геодинамических и локальных геомеханических процессов.

Хотя с момента издания первых методических указаний по профилактике горных ударов с учетом геодинамики недр [11] прошло более 40 лет, многие идеи, заложенные в метод геодинамического районирования, не потеряли своей привлекательности и продолжают развиваться. К таким идеям относится гипотеза (концепция) о достижении в земной коре предельно напряженного состояния от поверхности до некоторой глубины под влиянием глобальных сил горизонтального сжатия [12]. В настоящей работе на основе этой концепции представлена попытка объяснения ряда геодинамических явлений, происходящих в земной коре при освоении недр и рассматриваемых как некие феномены. Вот только некоторые из них: эффект возникновения техногенных землетрясений с большой глубиной гипоцентра, эффект возникновения зон сейсмической активизации в стороне от мест ведения горных работ, эффект миграции сейсмичности и возникновения сильных сейсмических событий на периферии облака форшоков, природа существования и отражения в рельефе земной поверхности активных блоков земной коры, «медленные землетрясения». Целью данной работы является анализ возникновения перечисленных геодинамических явлений в промышленных районах с точки зрения гипотезы о существовании слоя предельно напряженного состояния земной коры для дальнейшего раскрытия природы взаимодействия глобальных геодинамических и локальных геомеханических процессов в районах освоения недр.

Представления о существовании в земной коре участков с предельно напряженным состоянием

Теория предельно напряженного состояния нашла широкое применение в геомеханике при решении вопросов безопасности и управления массивом горных пород [13]. Так, зону опорного давления вблизи забоя разделяют на две части – от забоя до максимума опорного давления, где угольный пласт находится в предельно напряженном состоянии, и зону за максимумом опорного давления, в которой уголь находится в упругом состоянии [14]. Основным источником сейсмической эмиссии при движении забоя является зона перехода новой части массива (угольного пласта) в предельно напряженное состояние забоя [10] (рис. 1). Воздействие на массив в зоне А, т.е. приложение дополнительной нагрузки, приводит к перераспределению

напряжений и смещению максимума опорного давления вглубь массива, что вызывает переход в предельное состояние его новых частей, их деформацию и эмиссию сейсмической энергии. То есть при воздействии на массив в зоне А, его реакция отмечается в месте его перехода в предельно напряженное состояние, зона В (см. рис. 1).

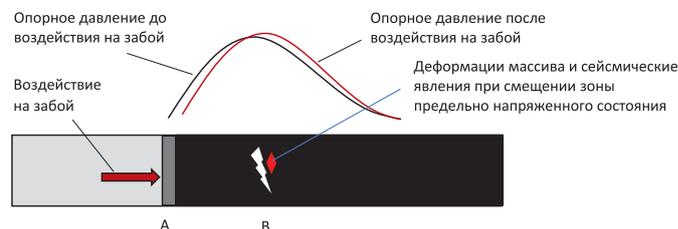


Рис. 1
Схема расположения области деформации массива и излучения сейсмической энергии в зоне максимума опорного давления при движении забоя (по [10])

Fig. 1
Schematic drawing of the location of the rock mass deformation and seismic energy emission area within the zone of maximum abutment pressure during the face advance (according to [10])

В начале 1960-х годов на многих месторождениях экспериментально было установлено превышение горизонтальных напряжений над вертикальными, что постепенно привело к представлению о тектонической природе этого эффекта [15]. И.М. Петуховым была высказана гипотеза о предельно напряженном состоянии больших участков верхней части земной коры, возникающем в результате действия тектонических сил [12]. Эта гипотеза согласуется с представлениями о существовании в земной коре высоко напряженных зон, находящихся в состояниях: «близком к пределу длительной прочности» [16]; достижения (превышения) напряжениями порога трещинообразования [17; 18], близком к пределу разрушения [19], «за пределом прочности разрушения» [20], которые используются при анализе сейсмичности и других происходящих в земной коре геодинамических процессов. Ниже с позиции этой гипотезы рассмотрены некоторые геодинамические эффекты, возникающие при освоении недр.

Геодинамические эффекты предельно напряженного состояния земной коры

1. Возникновение сильных техногенных землетрясений с глубоким расположением гипоцентров

Предполагается, что некоторые сильные землетрясения в промышленных районах имеют смешанную природу, получившую название природно-техногенная [21], техногенно-тектоническая [22], индуцированная [6], а их триггером выступает какое-то инженерное воздействие на недра. Некоторые примеры приведены в табл. 1. Основными аргументами против техногенной составляющей природы сильных землетрясений являются их большая энергия и значительная глубина гипоцентра [23; 24]. В работе [25] предложена гипотеза, объясняющая эффект возникновения землетрясений с большой магнитудой и глубоким расположением гипоцентра при техногенном воздействии на массив с поверхности на примере Бачатского (2013) и других землетрясений, природа которых дискутируется (рис. 2).

Бачатское землетрясение произошло под одноименным

угольным разрезом и его магнитуда оценивается как $M_L = 6,1$, а глубина расположения гипоцентра 4 км [26]. По известным зависимостям [27] можно получить, что размеры очага землетрясения при его магнитуде $M_L = 6,1$ составили не менее 10 км, что подтверждается также размерами афтершоковой зоны. При таких параметрах этого сейсмического события можно полагать, что его очаг достигал земной поверхности и, поскольку угольный разрез располагался в эпицентре, техногенное воздействие (ведение горных работ) непосредственно осуществлялось на готовящуюся очаговую зону. Очаг землетрясения рассматривается как подземное пространство, в котором разрываются и смещаются горные породы, т.е. достигается предельно напряженное состояние. На рис. 2 очаг Бачатского землетрясения показан как некая область предельно напряженного состояния земной коры, к которой прикладывается дополнительная нагрузка от ведения горных работ. Воздействие на область предельно напряженного состояния приводит к переходу новой части массива в предельно напряженное состояние (показано на рис. 2 затененным участком). При выполнении условий неустойчивости, т.е. превышения скорости приложенной нагрузки над скоростью релаксации напряжений [28], разрушение предельно напряженного участка массива происходит в динамической форме. Таким образом, сильное землетрясение в горнопромышленном районе с глубоким расположением гипоцентра может произойти при ведении инженерной деятельности буквально на поверхности земли. По-видимому, это относится и к землетрясениям, возникающим при других видах инженерной деятельности.

На рис. 3 и 4 для примера показаны тектонофизические схемы для Нефтегорского ($M = 7,0-7,2$) и Веньчуаньского ($M = 8$) землетрясений. Очаг этих землетрясений достигал земной поверхности, вблизи которой (или на которой) находился крупный источник техногенного воздействия: эксплуатация месторождений нефти на Сахалине [23; 29] и водохранилище Цзыпинпу с высотой плотины более 150 м [30].

Таблица 1
Примеры сильных землетрясений, причиной которых предполагается их техногенная природа

Землетрясение, год	Магнитуда	Глубина гипоцентра, км	Источник
Бачатское, 2013	6,1	4	[24; 26]
Нефтегорское, 1995	7,0–7,2	15–18	[23; 31]
Непальское, 2015	7,8	15	[32]
Веньчуаньское, 2008	8,0	16	[6; 30]

Table 1
Examples of strong earthquakes that are assumed to be man-made

В этих случаях, а также многих других [33] техногенное воздействие осуществлялось непосредственно на зону предельно напряженного состояния, сформированную накануне землетрясения в земной коре. В какой-то момент произошло нарушение условий стабильности, что вызвало разрушение этой зоны в динамической форме. Таким образом, эффект возникновения сильных землетрясений техногенной природы с глубоким расположением очага землетрясения может быть объяснен с позиции представ-

лений о существовании в земной коре участков с предельно напряженным состоянием.



Рис. 2
Тектонофизическая схема Бачатского (2013) землетрясения

Fig. 2
Tectonophysical scheme of the Bachatsky (2013) earthquake

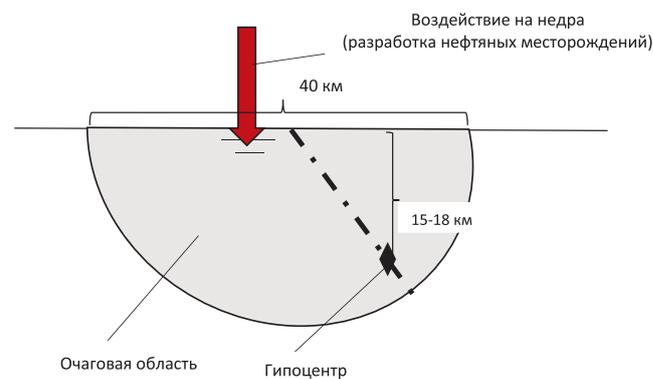


Рис. 3
Тектонофизическая схема Нефтегорского (1995) землетрясения

Fig. 3
Tectonophysical scheme of the Neftegorsk (1995) earthquake

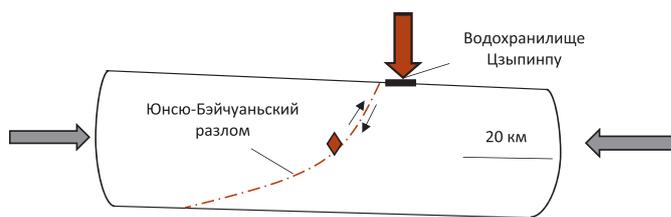


Рис. 4
Тектонофизическая схема Веньчуаньского (2008) землетрясения, по материалам из [6]

Fig. 4
Tectonophysical scheme of the Wenchuan (2008) earthquake, based on data from [6; 30]

2. Эффект миграции сейсмичности и возникновения сильных сейсмических событий на периферии облака форшоков

При сейсмическом мониторинге шахтных полей обнаружен эффект появления более сильных сейсмических событий в периферийной области рассеянной сейсмичности [34]. Аналогичный эффект наблюдается и при анализе пространственного распределения форшоков землетрясений [35; 36]. На рис. 5 показана генерализованная схема



положения техногенного землетрясения с магнитудой $M = 4$ на геотермальном поле в Калифорнии на фоне облака форшоков по материалам из [6]. Наблюдаемый эффект также может быть объяснен развитием области предельно напряженного состояния участка массива (земной коры). Развитие мелких сейсмических явлений свидетельствует о достижении в зонах их нуклеации предельно напряженного состояния. Совокупность таких зон образует зону предельно напряженного состояния следующего иерархического уровня. Поэтому при ее разрастании на границе перехода новых участков массива в предельно напряженное состояние происходит сейсмическое событие более высокого энергетического класса.



Рис. 5
Сейсмическое событие с $M = 4$ на периферии зоны сейсмической активизации в Эйдлине, геотермальный район Гейзерс, Калифорния, по материалам из [6]

Fig. 5
Seismic event with $M = 4$ at the periphery of the seismic activity zone in Eildin, Geysers geothermal region, California, based on data from [6]

3. Реактивация нарушений, «медленные землетрясения» и блочное строение земной коры

Крупным результатом геомеханико-геодинамических исследований XX в. называют заключение о фундаментальной роли блочно-иерархического строения горных пород и массивов в объяснении широкой гаммы возникающих геомеханических процессов при освоении недр [9]. Одними из первых таких исследований применительно к проблеме горных ударов были исследования по геодинамическому районированию на рудниках [11]. В дальнейшем изучалось влияние блочных структур земной коры разных рангов на условия разработки угольных, нефтяных месторождений, условия эксплуатации крупных инженерных объектов, были построены схемы блочного строения Кузбасса, Московской области, других регионов [10]. Рельеф земной поверхности связан с тектоническим рельефом и отражает особенности геологического развития земной коры [37], но геомеханическая природа существования границ блоков, глубина их заложения, возможность реактивации образовавшихся в геологическую историю дизъюнктивных нарушений, их связь с газовым режимом недр, остаются важными вопросами, требующими дальнейшего изучения.

Если принять во внимание гипотезу существования в земной коре слоя предельно напряженного состояния переменной мощности, измеряемой от земной поверхности до некоторой глубины, то блочную структуру земной коры можно рассматривать как отражение запредельных деформаций предельно напряженных участков земной коры. В этом случае на участках земной коры, отличающихся мощностью слоя предельно напряженного состояния, глубина заложения выраженных в рельефе разломов (границ блоков) земной коры будет различной, а сам этот

слой можно рассматривать как тектонически активный (рис. 6). Само существование блочной структуры земной коры, ее выраженность в рельефе земной поверхности можно рассматривать как геодинамический эффект существования слоя предельно напряженного состояния. Например, в призабойной зоне в угольном пласте, находящемся в условиях предельно напряженного состояния, идет развитие смещений по имеющимся поверхностям ослабления (трещинам) с образованием зон отжима угля. В земной коре под воздействием горизонтального сжатия происходят смещения по нарушениям, благоприятно ориентированным для этого в действующем поле напряжений с образованием блочных структур разного ранга, распространяющихся до нижней границы слоя предельно напряженного состояния земной коры. В зоне предельно напряженного состояния возможны большие (до 5–10%) деформации угольного пласта за счет смещений по поверхностям природной трещиноватости и слоистости [10]. В геологических структурах можно наблюдать надвиги и шарьяжи с амплитудами смещения во многие километры. Непосредственно наблюдаемые асейсмические смещения по разломам получили название «медленные землетрясения» [38]. В работе [39] отмечается, что явления медленного скольжения возникают не только на больших глубинах в земной коре, но также в ледниках, оползнях. Фактически речь идет о деформировании предельно напряженного массива. Можно заключить, что «медленные землетрясения» также проявляются как следствие предельно напряженного состояния земной коры и представляют собой вид суперинтенсивных деформаций земной коры, происходящих на границах ее тектонически активных блоков.



Рис. 6
Схематическое изображение блочной структуры земной коры на участках с различной мощностью слоя ее предельно напряженного состояния

Fig. 6
Schematic representation of the block structure of the earth's crust in areas with different thicknesses of the layer of its critical stress state

4. Эффект периодического выхода глубинных газов на земную поверхность

В горнопромышленных районах отмечен эффект периодического поступления газов из земных недр на земную поверхность [40; 41]. Одним из путей миграции газов признаются тектонические нарушения, но причина периодичности процесса миграции до конца не изучена, в связи с чем сохраняются значительные риски взрыва, удушья или отравления при миграции шахтного газа на поверхность в местах закрытых и действующих шахт. В работе [43] авторы предполагают, что неотектонические движения земной коры способствуют процессу дегазации недр. В работе [43] рассмотрен клапанный механизм поступления флюидов из глубоких частей земной коры в сейсмоактивную зону, что обеспечивает периодичность процесса подготовки землетрясений.

Однако периодичность поступления глубинных газов на поверхность может быть также связана с процессом



смещения зоны перехода массива в предельное состояние на более глубокие горизонты под влиянием инженерной деятельности. Наблюдения за развитием сейсмичности в зонах ведения горных работ показывают, что со временем происходит развитие зоны сейсмической активизации по глубине и латерали [26], т.е. развитие зоны предельно напряженного состояния на более глубокие горизонты и соседние области. На более глубоких горизонтах горного массива его переход в предельное состояние происходит при все более высоких напряжениях. В этих условиях возможен отжим флюидов в верхние слои земной коры, что может приводить к периодической реактивации разломов и обеспечивать спонтанное поступление газов на земную поверхность.

Дискуссия и выводы

Возникновение горных ударов на глубинах 150–200 м [44], проявление процессов заколообразования в карьере на глубине 25–30 м [34], проявление сейсмичности свидетельствуют о достижении массивом предельно напряженного состояния от поверхности и до некоторой глубины. По И.М. Пегухову, предельно напряженное состояние – это «вид, форма, условие существования геомеханической, а вернее, геодинамической системы «массив горных пород»» [10]. Массив горных пород в этой зоне «составлен из многих участков с предельно напряженным состоянием, размеры и формы которых зависят от величины и степени техногенных воздействий». С этой точки зрения можно представить, что в образующихся из-за дискретного характера распределения напряжений тектонически напряженных зонах происходит упрочнение массива и такие зоны составляют своеобразный несущий каркас в земной коре. Воздействие на одну из таких зон приводит к перераспределению напряжений, пригрузке соседних зон и возникновению реакции массива на техногенное воздействие в одном или даже нескольких местах, находящихся иногда на большом расстоянии от места воздействия. Так, в работе Д.Т. Тейлора (1963) [44] описаны случаи возникновения сильных горных ударов с сейсмическим эффектом на месторождениях Колар (Индия) гипоцентры которых находились далеко от рудной жилы, вне зоны влияния очистных работ. На свинцово-цинковом Тирольском месторождении (Австрия) на руднике Райбл в 1929 и 1930 гг. произошли крупные горные удары в районах, где десятки лет никто не работал. В Кузбассе отмечено возникновение сейсмиче-

ских активизаций в районах, удаленных от мест ведения горных работ на несколько километров [45].

Динамическая реакция массива на техногенное воздействие может проявляться тем сильнее, чем больше мощность слоя земной коры с участками предельно напряженного состояния. Поскольку массив в зонах предельно напряженного состояния сохраняет способность к накоплению потенциальной энергии упругого сжатия (запасы которой пропорциональны квадрату величин действующих напряжений), то чем больше мощность этого слоя, тем выше степень геодинамической опасности ведения работ по освоению недр [25], тем отчетливее могут проявляться рассмотренные эффекты.

Взгляд на окружающую среду как на важнейший производственный ресурс [46] приводит к выводу, что и геодинамическое состояние недр можно рассматривать как ресурс, «обладающий сложнейшей вещественно-энергетической структурой, способной поддерживать в каждом из своих участков баланс всех тех частей природных биосфер, которые составляют собственно биосферу». В этой связи геодинамическая опасность выступает как недостаточно изученный и недооцененный вид экологической опасности, который все отчетливее приобретает общественное значение. Для решения этой сложной проблемы важно обеспечить комплексность исследований, опирающихся на достижения в развитии систем геодинамического мониторинга [47–49], методов компьютерного и геомеханического моделирования [50–53], теоретических и экспериментальных исследований [9; 10].

Вывод

Понимание природы таких геодинамико-геомеханических процессов, как горные удары и сильные техногенные землетрясения с глубиной гипоцентра, намного превышающей глубины ведения горных работ, возникновение сейсмических активизаций на больших расстояниях от объектов освоения недр, локализация эпицентров сильных сейсмических событий на периферии облака форшоков и афтершоков, существование и функционирование блочной структуры земной коры и ее дегазация по реактивированным нарушениям, «медленные землетрясения», существование силового каркаса в земной коре и его реакция на геодинамические процессы в недрах может быть расширено за счет привлечения гипотезы предельно напряженного состояния земной коры.

Список литературы

1. Рассказов И.Ю., Федотова Ю.В., Сидляр А.В., Потапчук М.И. Анализ проявлений техногенной сейсмичности в удароопасном массиве пород Николаевского месторождения. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2020;(11):46–56. <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2020-11-0-46-56>
2. Козырев А.А., Семенова И.Э., Журавлева О.Г., Пантелеев А.В. Гипотеза происхождения сильного сейсмического события на Расвумчоррском руднике 09.01.2018. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2018;(12):74–83. <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2018-12-0-74-83>
3. Еременко А.А., Машуков И.В., Еременко В.А. Геодинамические и сейсмические явления при обрушении блоков на удароопасных месторождениях Горной Шории. *Физико-технологические проблемы разработки полезных ископаемых*. 2017;(1):70–76.
4. He M., Cheng T., Qiao Y., Li H. A review of rockburst: Experiments, theories, and simulations. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. 2022. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2022.07.014>
5. Keneti A., Sainsbury B.A. Review of published rockburst events and their contributing factors. *Engineering Geology*. 2018;246:361–373. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2018.10.005>
6. Foulger G.R., Wilson M.P., Gluyas J.G., Julian B.R., Davies R.J. Global review of human-induced earthquakes. *Earth-Science Reviews*. 2018;178:438–514. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2017.07.008>
7. Адушкин В.В., Турунтаев С.В. *Техногенная сейсмичность – индуцированная и триггерная*. М.: ИДГ РАН; 2015. 364 с.
8. Козырев А.А., Онуприенко В.С., Жукова С.А., Журавлева О.Г. Развитие инструментального и методического обеспечения кон-



- троля наведенной сейсмичности на Хибинских апатит-нефелиновых месторождениях. *Горный журнал*. 2020;(9):19–26. <https://doi.org/10.17580/gzh.2020.09.02>
9. Мельников Н.Н. (ред.) *Геомеханические поля и процессы: экспериментально-аналитические исследования формирования и развития очаговых зон катастрофических событий в горнотехнических и природных системах*. Новосибирск: СО РАН; 2018. Т. 1. 549 с.
 10. Петухов И.М., Батугина И.М. *Геодинамика недр*. М.: Недра коммуникэйшенз; 1999. 288 с.
 11. Батугина И.М., Петухов И.М. (ред.) *Методические указания по профилактике горных ударов с учетом геодинамики месторождений*. Ленинград: ВНИМИ; 1980. 46 с.
 12. Петухов И.М. О природе горизонтальных сил в земной коре. В кн.: Норватов Ю. А. (ред.) *Изучение и прогноз смещений и деформации массива горных пород, гидрогеомеханических процессов при отработке месторождений подземным и открытым способами*. СПб.: ВНИМИ; 1991.
 13. Фисенко Г.Л. *Пределные состояния горных пород вокруг выработок*. М.: Недра; 1976. 272 с.
 14. Петухов И.М., Сидоров В.С., Раевская Г.Г. О зоне опорного давления. *Труды ВНИМИ*. 1968;46:208–212.
 15. Гзовский М.В. и др. Напряженное состояние земной коры по данным измерений в горных выработках и тектоно физического анализа. В кн.: Кропоткин П.Н. (ред.) *Напряженное состояние земной коры*. М.: Наука; 1973. С. 50–61.
 16. Соболев Г.А., Пономарев А.В. *Физика землетрясений и предвестники*. М.: Наука; 2003. 270 с.
 17. Scholz C.H. *The Mechanics of Earthquakes and Faulting*. New York: Cambridge Univ. Press; 1990. 439 p.
 18. Métivier L., de Viron O., Conrad C.P., Renault S., Diament M., Patau G. Evidence of earthquake triggering by the solid earth tides. *Earth and Planetary Science Letters*. 2009;278(3–4):370–375. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2008.12.024>
 19. Ellsworth W.L. Injection-induced earthquakes. *Science*. 2013;341(6142):1225942. <https://doi.org/10.1126/science.1225942>
 20. Тарасов Б.Г. Запредельные свойства горных пород и их связь с динамикой спонтанного разрушения. *Горный журнал*. 2021;(1):13–19. <https://doi.org/10.17580/gzh.2021.01.03>
 21. Яковлев Д.В., Лазаревич Т.И., Цирель С.В. Природно-техногенная сейсмоактивность Кузбасса. *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*. 2013;(6):20–34.
 22. Адушкин В.В. Развитие техногенно-тектонической сейсмичности в Кузбассе. *Геология и геофизика*. 2018;59(5):709–724. <https://doi.org/10.15372/GiG20180510>
 23. Иващенко А.И. Нефтегорское землетрясение 27(28) мая 1995 года и его значение в сейсмической истории Сахалина. В кн.: Левин Б.В., Лихачева О.Н. (ред.) *Геодинамические процессы и природные катастрофы. Опыт Нефтегорска: материалы Всерос. науч. конф. с международным участием, г. Южно-Сахалинск, 26–30 мая 2015 г.* Владивосток: Дальнаука; 2015. Т. 1. С. 20–23.
 24. Кочарян Г.Г., Кишкина С.Б., Будков А.М., Иванченко Г.Н. О генезисе Бачатского землетрясения 2013 года. *Геодинамика и тектонофизика*. 2019;10(3):741–759. <https://doi.org/10.5800/GT-2019-10-3-0439>
 25. Batugin A. A proposed classification of the earth's crustal areas by the level of geodynamic threat. *Geodesy and Geodynamics*. 2021;12(1):21–30. <https://doi.org/10.1016/j.geog.2020.10.002>
 26. Еманов А.Ф., Еманов А.А., Фатеев А.В. Бачатское техногенное землетрясение 18 июня 2013 г. с $M_L=6.1$, $I_0=7$ (Кузбасс). *Российский сейсмологический журнал*. 2020;2(1):48–61. <https://doi.org/10.35540/2686-7907.2020.1.05>
 27. Садовский М.А. *Избранные труды: Геофизика и физика взрыва*. М.: Наука; 2004. 440 с.
 28. Petukhov I.M., Linkov A.M. Theoretical principles and fundamentals of rock burst prediction and control. In: *5th ISRM Congress*. 1983, pp. D113–D120.
 29. Полец А.Ю., Злобин Т.К. Изучение особенностей очаговой зоны разрушительного Нефтегорского землетрясения. В кн.: Левин Б.В., Лихачева О.Н. (ред.) *Геодинамические процессы и природные катастрофы. Опыт Нефтегорска: материалы Всерос. науч. конф. с международным участием, г. Южно-Сахалинск, 26–30 мая 2015 г.* Владивосток: Дальнаука; 2015. Т. 1. С. 141–145.
 30. Yuanzheng L., Jin M., Tong J. Insights gained from the seismicity around the Zipingpu reservoir before the Wenchuan Ms8.0 earthquake. *Geodynamics & Tectonophysics*. 2014;5(3):777–784. <https://doi.org/10.5800/GT-2014-5-3-0154>
 31. Николаев А.В. О возможном влиянии разработки нефти на параметры Нефтегорского землетрясения. М.: ФССН МЧС России; 1995.
 32. Kundu B., Vissa N.K., Gahalaut V.K. Influence of anthropogenic groundwater unloading in Indo-Gangetic plains on the 25 April 2015 Mw 7.8 Gorkha, Nepal Earthquake. *Geophysical Research Letters*. 2015;42(24):10607–10613. <https://doi.org/10.1002/2015GL066616>
 33. Батугин А.С. Общие закономерности проявления сильных горных ударов и индуцированных землетрясений на участках земной коры с предельно напряженным состоянием. *Горный журнал*. 2021;(1):22–27. <https://doi.org/10.17580/gzh.2021.01.04>
 34. Козырев А.А., Савченко С.Н., Панин В.И., Семенова И.Э., Рыбин В.В., Федотова Ю.В. и др. *Геомеханические процессы в геологической среде горнотехнических систем и управление геодинамическими рисками*. Апатиты: КНЦ РАН; 2019. 431 с. <https://doi.org/10.37614/978.5.91137.391.7>
 35. Bukchin B.G., Fomochkina A.S., Kossobokov V.G., Nekrasova A.K. Characterizing the foreshock, main shock, and aftershock sequences of the recent major earthquakes in Southern Alaska, 2016–2018. *Frontiers in Earth Science*. 2020;8:584659. <https://doi.org/10.3389/feart.2020.584659>
 36. Riga G., Balocchi P. How to identify foreshocks in seismic sequences to predict strong earthquakes. *Open Journal of Earthquake Research*. 2017;6(1):55–71. <https://doi.org/10.4236/ojer.2017.61003>
 37. Орлова А.В. *Блоковые структуры и рельеф*. М.: Недра; 1975. 232 с.
 38. Vidale J.E., Houston H. Slow slip: A new kind of earthquake. *Physics Today*. 2012;65(1):38–43. <https://doi.org/10.1063/PT.3.1399>
 39. Peng Z., Gomberg J. An integrated perspective of the continuum between earthquakes and slow-slip phenomena. *Nature Geoscience*. 2010;3:599–607. <https://doi.org/10.1038/ngeo940>
 40. Василенко Т.А., Волошина Н.И., Кольчик И.Е., Молодецкий А.В., Подрухин А.А. Исследование содержания метана в почвенном воздухе в области выхода под наносы геологических нарушений. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2016;(7):159–166.
 41. Pokryszka Z., Tauziède C., Lagny C., Guise Y., Gobillot R., Planchenault J.-M., Lagarde R. Gas migration from closed coal mines to the surface risk assessment methodology and prevention means. In: *Symposium Post mining 2005, Nov. 2005, Nancy, France*. Available at: <https://core.ac.uk/download/pdf/52665588.pdf>
 42. Гресов А.И., Яцук А.В. Газовая зональность и газоносность многолетнемерзлых отложений угленосных бассейнов восточной арктики и прилегающих регионов. *Геозкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геохронология*. 2013;(5):387–398.
 43. Sibson R.H. Preparation zones for large crustal earthquakes consequent on fault-valve action. *Earth, Planets and Space*. 2020;72:31. <https://doi.org/10.1186/s40623-020-01153-x>
 44. Batugina I.M., Petukhov I.M. *Bibliography of Rock Bursts*. Part 1 (1900–1979). Rotterdam: A.A. Balkema Publishers; 1990. 308 p.



45. Еманов А.Ф., Еманов А.А., Лескова Е.В., Фатеев А.В., Семин А.Ю. Сейсмические активизации при разработке угля в Кузбассе. *Физическая мезомеханика*. 2009;12(1):37–43.
46. Чаплыгин Н. Н. Экологическая перспектива и освоение недр: ресурсный аспект. *Экология и жизнь*. 2007;(10):16–19.
47. Яковлев Д.В., Цирель С.В., Мулев С.Н. Закономерности развития и методика оперативной оценки техногенной сейсмической активности на горных предприятиях и в горнодобывающих регионах. *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*. 2016;(2):34–47.
48. Рыбин В.В., Константинов К.Н., Каган М.М., Панасенко И.Г. Принципы организации комплексной системы мониторинга устойчивости объектов горнодобывающего предприятия. *Горный журнал*. 2020;(1):53–57. <https://doi.org/10.17580/gzh.2020.01.10>
49. Gvishiani A.D., Tatarinov V.N., Manevich A.I., Kaftan V.I. Geodynamic interpretation of modern geodynamic movements in the southern part of the yenisei ridge (in application to the problems of underground isolation of radioactive waste). *Eurasian Mining*. 2021;(2):7–11. <https://doi.org/10.17580/em.2021.02.02>
50. Сидоров Д.В., Пономаренко Т.В. Методология оценки геодинамического состояния природно-техногенных систем при реализации проектов освоения месторождений. *Горный журнал*. 2020;(1):49–52. <https://doi.org/10.17580/gzh.2020.01.09>
51. Сергунин М.П., Дарбинян Т.П. Выделение параметров трещиноватости массива горных пород из геологических моделей, построенных в современных геоинформационных системах (на примере Micromine). *Горный журнал*. 2020;(1):37–41. <https://doi.org/10.17580/gzh.2020.01.07>
52. Бирючев И.В., Макаров А.Б., Усов А.А. Геомеханическая модель рудника. Часть 1. Создание. *Горный журнал*. 2020;(1):42–48. <https://doi.org/10.17580/gzh.2020.01.08>
53. Kobylkin S.S. Pugach, A. S. Rock burst forecasting technique and selecting a safe coal face advance direction. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2022;7(2):126–136. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2022-2-126-136>

References

1. Rasskazov I.Yu., Fedotova Yu.V., Sydyar A.V., Potapchuk M.I. Analysis of induced seismic events in rockburst-hazardous Nikolaevsk deposit. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2020;(11):46–56. (In Russ.) <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2020-11-0-46-56>
2. Kozyrev A.A., Semenova I.E., Zhuravleva O.G., Pantelev A.V. Hypothesis of strong seismic event origin in Rasvumchorr mine on January 9, 2018. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2018;(12):74–83. (In Russ.) <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2018-12-0-74-83>
3. Eremenko A.A., Mashukov I.V., Eremenko V.A. Geodynamic and seismic events under rockburst-hazardous block caving in Gornaya Shoria. *Journal of Mining Science*. 2017;53(1):65–70. <https://doi.org/10.1134/S1062739117011859>
4. He M., Cheng T., Qiao Y., Li H. A review of rockburst: Experiments, theories, and simulations. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. 2022. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2022.07.014>
5. Keneti A., Sainsbury B.A. Review of published rockburst events and their contributing factors. *Engineering Geology*. 2018;246:361–373. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2018.10.005>
6. Foulger G.R., Wilson M.P., Gluyas J.G., Julian B.R., Davies R.J. Global review of human-induced earthquakes. *Earth-Science Reviews*. 2018;178:438–514. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2017.07.008>
7. Adushkin V.V., Turuntaev S.V. *Technogenic seismicity: induced and triggered*. Moscow: Institute of Dynamics of Geospheres of the Russian Academy of Sciences; 2015. 364 p. (In Russ.)
8. Kozyrev A.A., Zhukova S.A., Zhuravleva O.G., Onuprienko V.S. Induced seismicity of rock mass: development of instrumental and methodological support to control seismicity at the khibiny apatite-nepheline deposits. *Gornyi Zhurnal*. 2020;(9):19–26. (In Russ.) <https://doi.org/10.17580/gzh.2020.09.02>
9. Melnikov N.N. (ed.) *Geomechanical fields and processes: experimental and analytical studies into formation and development of focal zones of catastrophic events in mining and natural systems*. Novosibirsk: Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences; 2018. Vol. 1. 549 p. (In Russ.)
10. Petukhov I.M., Batugina I.M. *Subsoil geodynamics*. Moscow: Nedra kommunikatsionnaya; 1999. 288 p. (In Russ.)
11. Batugina I.M., Petukhov I.M. (eds) *Methodological guidelines for prevention of rock bursts with account of geodynamics of the deposits*. Leningrad: VNIMI; 1980. 46 p. (In Russ.)
12. Petukhov I.M. On the nature of horizontal forces in the earth's crust. In: Norvatov Yu.A. (ed.) *Studies and forecasts of rock mass displacements and deformations, hydrogeomechanical processes in underground and surface mining*. St. Petersburg: VNIMI; 1991. (In Russ.)
13. Fisenko G.L. *Limit states of rocks around mine workings*. Moscow: Nedra; 1976. 272 p. (In Russ.)
14. Petukhov I.M., Sidorov B.C., Raevskaya G.G. On the bearing pressure zone. *Trudy VNIMI*. 1968;46:208–212. (In Russ.)
15. Gzovsky M.V. et al. Stress state of the earth's crust according to measurements in mine workings and tectonic-physical analysis. In: Kropotkin P.N. (ed.) *Stress state of the earth's crust*. Moscow: Nauka; 1973, pp. 50–61. (In Russ.)
16. Sobolev G.A., Ponomarev A.V. *Earthquake physics and foreshocks*. Moscow: Nauka; 2003. 270 p. (In Russ.)
17. Scholz C.H. *The Mechanics of Earthquakes and Faulting*. New York: Cambridge Univ. Press; 1990. 439 p.
18. Métivier L., de Viron O., Conrad C.P., Renault S., Diament M., Patau G. Evidence of earthquake triggering by the solid earth tides. *Earth and Planetary Science Letters*. 2009;278(3–4):370–375. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2008.12.024>
19. Ellsworth W.L. Injection-induced earthquakes. *Science*. 2013;341(6142):1225942. <https://doi.org/10.1126/science.1225942>
20. Tarasov B.G. Post-limit properties and correlation with spontaneous fracture dynamics in rocks. *Gornyi Zhurnal*. 2021;(1):13–19. (In Russ.) <https://doi.org/10.17580/gzh.2021.01.03>
21. Yakovlev D.V., Lazarevich T.I., Tsirel' S.V. Natural and induced seismic activity in Kuzbass. *Journal of Mining Science*. 2013;49(6):862–872. <https://doi.org/10.1134/S1062739149060038>
22. Adushkin V.V. Technogenic tectonic seismicity in Kuzbass. *Russian Geology and Geophysics*. 2018;59(5):571–583. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2018.04.010>
23. Ivashchenko A.I. Neftegorsk earthquake of May 27(28), 1995, and its significance in the seismic history of Sakhalin. In: Levin B.V., Likhacheva O.N. (eds) *Geodynamic processes and natural disasters. Neftegorsk experience: Proceedings of the All-Russian Scientific Conference with international participation, Yuzhno-Sakhalinsk, May 26-30, 2015*. Vladivostok: Dalnauka; 2015, pp. 20–23. (In Russ.)
24. Kocharyan G.G., Kishkina S.B., Budkov A.M., Ivanchenko G.N. On the genesis of the 2013 Bachat earthquake. *Geodynamics & Tectonophysics*. 2019;10(3):741–759. (In Russ.) <https://doi.org/10.5800/GT-2019-10-3-0439>
25. Batugin A. A proposed classification of the earth's crustal areas by the level of geodynamic threat. *Geodesy and Geodynamics*. 2021;12(1):21–30. <https://doi.org/10.1016/j.geog.2020.10.002>
26. Emanov A.F., Emanov A.A., Fateev A.V. Bachatskiy induced earthquake on June 18, 2013, ML=6.1, I0=7 (Kuzbass). *Russian Journal of Seismology*. 2020;2(1):48–61. (In Russ.) <https://doi.org/10.35540/2686-7907.2020.1.05>



27. Sadovsky M.A. *Selected works: Geophysics and blast physics*. Moscow: Nauka; 2004. 440 p. (In Russ.)
28. Petukhov I.M., Linkov A.M. Theoretical principles and fundamentals of rock burst prediction and control. In: *5th ISRM Congress*. 1983, pp. D113–D120.
29. Polets A.Yu., Zlobin T.K. Studies of focal zone features of the catastrophic Neftegorsk earthquake. In: Levin B.V., Likhacheva O.N. (eds) *Geodynamic processes and natural disasters. Neftegorsk experience: Proceedings of the All-Russian Scientific Conference with international participation, Yuzhno-Sakhalinsk, May 26-30, 2015*. Vladivostok: Dalnauka; 2015. Vol. 1, pp. 141–145. (In Russ.)
30. Yuanzheng L., Jin M., Tong J. Insights gained from the seismicity around the Zipingpu reservoir before the Wenchuan Ms8.0 earthquake. *Geodynamics & Tectonophysics*. 2014;5(3):777–784. <https://doi.org/10.5800/GT-2014-5-3-0154>
31. Nikolaev A.V. On the possible impact of oil development on the Neftegorsk earthquake parameters. Moscow: Seismological Observation and Earthquake Prediction System, EMERCOM of the Russian Federation; 1995. (In Russ.)
32. Kundu B., Vissa N.K., Gahalaut V.K. Influence of anthropogenic groundwater unloading in Indo-Gangetic plains on the 25 April 2015 Mw 7.8 Gorkha, Nepal Earthquake. *Geophysical Research Letters*. 2015;42(24):10607–10613. <https://doi.org/10.1002/2015GL066616>
33. Batugin A.S. General features of strong rock bursts and induced earthquakes in critical-stress areas of the Earth's crust. *Gornyi Zhurnal*. 2021;(1):22–27. (In Russ.) <https://doi.org/10.17580/gzh.2021.01.04>
34. Kozyrev A.A., Savchenko S.N., Panin V.I., Semenova I.E., Rybin V.V., Fedotova Yu.V. et al. Geomechanical processes in geological environment of mining systems and geodynamic risk management. Apatity: Kola Scientific Center of Russian Academy of Sciences; 2019. 431 p. (In Russ.) <https://doi.org/10.37614/978.5.91137.391.7>
35. Bukchin B.G., Fomochkina A.S., Kossobokov V.G., Nekrasova A.K. Characterizing the foreshock, main shock, and aftershock sequences of the recent major earthquakes in Southern Alaska, 2016–2018. *Frontiers in Earth Science*. 2020;8:584659. <https://doi.org/10.3389/feart.2020.584659>
36. Riga G., Balocchi P. How to identify foreshocks in seismic sequences to predict strong earthquakes. *Open Journal of Earthquake Research*. 2017;6(1):55–71. <https://doi.org/10.4236/ojer.2017.61003>
37. Orlova A.V. *Block structures and topography*. Moscow: Nedra; 1975. 232 p. (In Russ.)
38. Vidale J.E., Houston H. Slow slip: A new kind of earthquake. *Physics Today*. 2012;65(1):38–43. <https://doi.org/10.1063/PT.3.1399>
39. Peng Z., Gomberg J. An integrated perspective of the continuum between earthquakes and slow-slip phenomena. *Nature Geoscience*. 2010;3:599–607. <https://doi.org/10.1038/ngeo940>
40. Vasilenko T.A., Voloshina N.I., Kolchik I.E., Molodetskiy A.V., Podruchkin A.A. Research of methane maintenance in soil air in the area of geological faults output under the sediments. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2016;(7):159–166. (In Russ.)
41. Pokryszka Z., Tauziède C., Lagny C., Guise Y., Gobillot R., Planchenault J.-M., Lagarde R. Gas migration from closed coal mines to the surface risk assessment methodology and prevention means. In: *Symposium Post mining 2005, Nov. 2005, Nancy, France*. Available at: <https://core.ac.uk/download/pdf/52665588.pdf>
42. Gresov A.I., Yatsuk A.V. Gas zoning and gas presence in permafrost of the coal-bearing basins in eastern arctics and adjacent regions. *Geoekologiya. Inzheneraya Geologiya, Gidrogeologiya, Geokriologiya*. 2013;(5):387–398. (In Russ.)
43. Sibson R.H. Preparation zones for large crustal earthquakes consequent on fault-valve action. *Earth, Planets and Space*. 2020;72:31. <https://doi.org/10.1186/s40623-020-01153-x>
44. Batugin I.M., Petukhov I.M. *Bibliography of Rock Bursts*. Part 1 (1900–1979). Rotterdam: A.A. Balkema Publishers; 1990. 308 p.
45. Emanov A.F., Emanov A.A., Leskova E.V., Fateev A.V., Semin A.Yu. Seismic activation at coal mining in Kuzbass. *Fizicheskaya Mezomekhanika*. 2009;12(1):37–43. (In Russ.)
46. Chaplyghin N.N. Environmental outlook and development of resources. *Ecology and Life*. 2007;(10):16–19. (In Russ.)
47. Yakovlev D.V., Tsirel' S.V., Mulev S.N. Laws of spreading and operational evaluation procedure for induced seismicity in mines and in mining areas. *Journal of Mining Science*. 2016;52(2):233–244. <https://doi.org/10.1134/S1062739116020369>
48. Rybin V.V., Konstantinov K.N., Kagan M.M., Panasenko I.G. Methodology of integrated stability monitoring in mines. *Gornyi Zhurnal*. 2020;(1):53–57. (In Russ.) <https://doi.org/10.17580/gzh.2020.01.10>
49. Gvishiani A.D., Tatarinov V.N., Manevich A.I., Kaftan V.I. Geodynamic interpretation of modern geodynamic movements in the southern part of the yenisei ridge (in application to the problems of underground isolation of radioactive waste). *Eurasian Mining*. 2021;(2):7–11. <https://doi.org/10.17580/em.2021.02.02>
50. Sidorov D.V., Ponomarenko T.V. Estimation methodology for geodynamic behavior of nature-and-technology systems in implementation of mineral mining projects. *Gornyi Zhurnal*. 2020;(1):49–52. (In Russ.) <https://doi.org/10.17580/gzh.2020.01.09>
51. Sergunin M.P., Darbinyan T.P. Identification of rock mass jointing parameters in geological models in modern geoinformation systems (in terms of Micromine). *Gornyi Zhurnal*. 2020;(1):37–41. (In Russ.) <https://doi.org/10.17580/gzh.2020.01.07>
52. Biryuchev I.V., Makarov A.B., Usov A.A. Geomechanical model of underground mine. Part I. Creation. *Gornyi Zhurnal*. 2020;(1):42–48. (In Russ.) <https://doi.org/10.17580/gzh.2020.01.08>
53. Kobylkin S.S., Pugach, A. S. Rock burst forecasting technique and selecting a safe coal face advance direction. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2022;7(2):126–136. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2022-2-126-136>

Информация об авторе

Батугин Андриан Сергеевич – доктор технических наук, профессор кафедры безопасности и экологии горного производства, Национальный исследовательский технологический университет МИСИС; e-mail: as-bat@mail.ru

Information about the author

Andrian S. Batugin – Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Department Mining Safety and Ecology of National University of Science and Technology "MISIS"; e-mail: as-bat@mail.ru

Информация о статье

Поступила в редакцию: 10.02.2023
Поступила после рецензирования: 01.03.2023
Принята к публикации: 04.03.2023

Article info

Received: 10.02.2023
Revised: 01.03.2023
Accepted: 04.03.2023