

РИСК-ОРИЕНТИРОВАННЫЙ ПОДХОД К ВЫБОРУ ГЕОТЕХНОЛОГИЙ ПОДЗЕМНОЙ РАЗРАБОТКИ МЕСТОРОЖДЕНИЙ НА БОЛЬШИХ ГЛУБИНАХ

И.И. Айнбиндер¹, Д.Р. Каплунов¹

¹ ИПКОН РАН, Москва, Россия, e-mail: geoexpert@yandex.ru

Аннотация: Рассмотрены основные природные и техногенные факторы, определяющие формирование опасных зон при разработке рудных месторождений на больших глубинах. Оценка природных опасностей представляет собой комбинацию факторов, которые могут быть ранжированы по важности влияния на выбор геотехнологии добычи руд в зависимости от глубины ведения горных работ, определяются статистическим анализом и выражены суммированием критериев опасности в следующей последовательности: глубина разработки, исходное напряженное состояние массива, тектоническая нарушенность и трещиноватость пород, удароопасность массива, обводненность пород, газоносность и температура массива. Техногенные факторы обусловлены изменением состояния массива горных пород и опасностями, связанными с разрушением сплошности массива, повреждением горных конструкций, увеличением водо- и газопроницаемости пород, что требует в условиях больших глубин качественной и количественной оценки вероятности возникновения разрушений массива, в том числе с катастрофическими последствиями. Показано, что выбор систем и технологии разработки на больших глубинах, в отличие от общепринятого учета горнотехнических условий и экономической эффективности выемки, должен быть обоснован особенностями образования опасных зон, которые оказывают влияние на устойчивость горных конструкций и безопасность отработки месторождений. На этой основе рекомендован риск-ориентированный подход к выбору геотехнологии отработки месторождений на больших глубинах, учитывающий геомеханический, гидрогеомеханический, газодинамический риски в опасных зонах разработки.

Ключевые слова: большая глубина, исходное напряженное состояние массива, тектоническая нарушенность пород, трещиноватость, физико-механические свойства, горные удары, газонасыщенность пород, обводненность пород, горное давление, геомеханический риск, гидрогеомеханический риск, газодинамический риск.

Для цитирования: Айнбиндер И. И., Каплунов Д. Р. Риск-ориентированный подход к выбору геотехнологий подземной разработки месторождений на больших глубинах // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2019. – № 4. – С. 5–19. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-04-0-5-19.

Risk-based approach to selection of deep-level mining technology

I.I. Aynbinder¹, D.R. Kaplunov¹

¹ Institute of Problems of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources
of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia, e-mail: geoexpert@yandex.ru

Abstract: The main natural and induced factors that determine formation of hazardous zones during deep-level ore mining are considered. Natural hazards are evaluated as a combination of factors

that can be ranked according to their importance in geotechnology selection depending on mining depth. Such hazards are determined from statistical analysis and expressed by summing the hazard criteria in the following sequence: mining depth, natural stress state of rock mass, tectonic disturbance and fracturing of rocks, rockburst hazards, watering, gas content and temperature rocks. Man-made factors are caused by changes in rock mass condition and by hazards associated with the rock mass discontinuity, damage of mine structures, as well as by increase in water and gas permeability of rocks, which requires a qualitative and quantitative assessment of probability of rock mass failure at great depths, including catastrophic consequences. It is shown that the choice of methods and technology for deep-level mining should be justified by features of formation of hazardous zones which affect stability of mine structures and safety of mining. Thereupon, a risk-based approach to the selection of deep-level mining technology taking into account geomechanical, hydrogeomechanical and gasdynamic risks in hazardous zones is recommended.

Key words: great depth, natural rock-mass stress state, tectonic disturbance, fracturing, physical and mechanical properties, rockbursts, gas content of rocks, water content of rocks, rock pressure, geomechanical risk, hydrogeomechanical risk, gas-dynamic risk.

For citation: Aynbinder I. I., Kaplunov D. R. Risk-based approach to selection of deep-level mining technology. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'*. 2019;4:5-19. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-04-0-5-19.

Современный этап развития горного производства в России связан с переходом открытых и подземных горных работ на большие глубины, где наиболее остро встают проблемы освоения месторождений в условиях повышенного горного давления, газо- и гидродинамических явлений, которые обуславливают развитие геотехнологий, учитывающих опасность возникновения разрушений массива, в том числе с катастрофическими последствиями, при разработке залежей.

В настоящее время подход к проектированию и освоению месторождений сводится в основном к общепринятому учету горнотехнических условий и выбору на этой основе систем и технологии разработки, принимая во внимание также экономическую эффективность горных работ [1].

Как правило, выбранная в проекте технология горных работ является общей для разработки месторождения и не в полной мере учитывает необходимые ее изменения при выемке в опасных природных и техногенных зонах, которые влияют на устойчивость горных конструкций и безопасность ведения горных работ.

Под опасной зоной понимается разрабатываемый участок недр, в пределах которого при ведении горных работ требуются дополнительные меры безопасности, сопровождаемые, как правило, отдельными проектами, а также обоснованием безопасности опасных производственных объектов, предусмотренным Федеральным законом «О промышленной безопасности опасных производственных объектов» [2]. В таких зонах необходимы специальные меры управления состоянием массива горных пород, изменения параметров технологии и порядка отработки запасов.

К природным факторам, в первую очередь, следует отнести глубину разработки и параметры залежей, исходное напряженное состояние массива, его тектоническую нарушенность и трещиноватость пород, их физико-механические свойства, определяющие склонность массива к горным ударам, газонасыщенность пород, гидродинамическое и геотермальное состояние массива.

По глубине ведения подземные горные работы могут быть классифицированы как глубокие (600—1400 м), весьма глубокие (1400—2000 м) и сверхглубо-

кие (более 2000 м) [3]. Переход на большие глубины характеризуется возникновением первых признаков динамических форм проявления горного давления при проходке подготовительных выработок в виде шелушения, стреляния пород и отдельных толчков в массиве, целиках, днищах блока, проявляющихся при достижении в массиве напряжений 0,5–0,6 от предела прочности образцов руд и пород на одноосное сжатие. С этих глубин месторождение относят к опасным по горным ударам.

Анализ измерений напряжений в не тронутым горными работами массиве на рудниках мира показал, что вертикальные напряжения в исходном поле растут в основном прямо пропорционально росту глубины. В то же время, значения горизонтальных напряжений в исходном поле с увеличением глубины горных работ в тектонически активных районах мира приближается к вертикальным, т.е. на сверхглубоких рудниках можно ожи-

дать гидростатического распределения напряжений.

На рис. 1 представлены обобщенные зависимости отношения среднего горизонтального напряжения (δ_x) к вертикальному (δ_z) с глубиной (H) на месторождениях Фенноскандинавского (а), Канадского щита (б) и Норильского района, где серыми точками отмечены значения исходных напряжений на различных глубинах разработки.

Об этом свидетельствуют измерения напряжений в исходном поле, проведенные на глубоких рудниках Норильского района («Октябрьский», «Таймырский», «Глубокий»). Здесь на глубинах 800–1000 м отмечалось действие больших горизонтальных напряжений, в 1,5–2,0 раза превышающих вертикальные [4].

Последние измерения напряжений, выполненные ИГД им. Н.А. Чинакала СО РАН на рудниках «Таймырский» и «Глубокий» показали, что на глубинах 1700–1850 м параметры исходного поля напря-

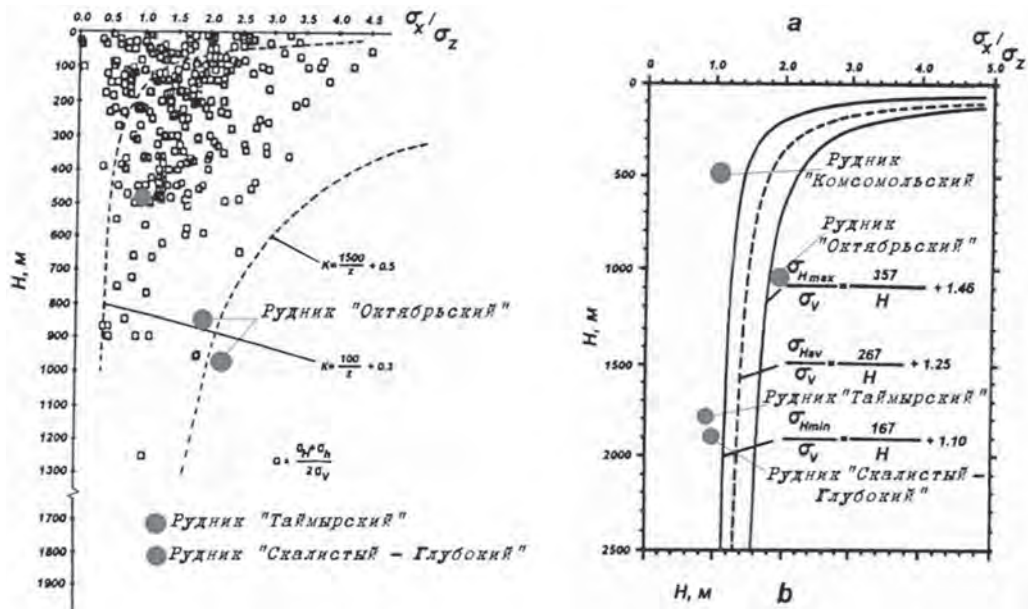


Рис. 1. Изменение отношения среднего горизонтального напряжения к вертикальному с глубиной (H) на месторождениях Фенноскандинавии (а), Канадского щита (б) и Норильского района

Fig. 1. The change in the ratio of the average horizontal to vertical stress with depth (H) in the fields of Fennoscandia (a), the Canadian Shield (b), the Norilsk District

жений соответствуют гидростатическому распределению в породных массивах Октябрьского и Талнахского месторождений.

Измерения проводились методом гидроразрыва и частичной разгрузки центральной скважины парами реперов по принципу прямоугольной тензометрической розетки в районе стволов ВС-7 на глубине 1700 м и ВС-10 на глубине 1850 м.

Исходное напряженное состояние массива оказывает существенное влияние на распределение напряжений при ведении горных работ. От него в значительной мере зависят выбор и обоснование технологии разработки, порядок и последовательность ведения работ, параметры горных конструкций.

При наличии в массиве больших и тектонических (горизонтальных) напряжений они оказывают наибольшее влияние на глубоких горизонтах на начальной стадии выемки, в период подготовки и разрезки шахтного поля. Они, как правило, действуют перпендикулярно крупным тектоническим нарушениям, а направление очистных и подготовительных выработок предпочтительно должно соответствовать наибольшей горизонтальной составляющей исходного поля напряжений.

На весьма глубоких и сверхглубоких горизонтах следует ожидать равномерного (гидростатического) распределения напряжений и в соответствии с этим определять порядок и последовательность развития работ в шахтном поле.

С тектонической нарушенностью связано, в первую очередь, блочное строение массива. Возле нарушений отмечается зона повышенной трещиноватости пород, что вызывает особые сложности при ведении очистных и подготовительных работ. Сами тектонические нарушения заполнены, как правило, ослабляющими минералами типа талька, серпентинита и др., поэтому ведение работ в этих зонах наиболее опасно.

Ширина зоны повышенной трещиноватости и пониженной прочности пород, связанных с мелкими дизъюнктивными нарушениями (амплитуда смещения не превышает 10 м), определяется формулами:

$$b_{\text{тр}} = 10N / \sin V;$$

$$b_{\text{кр}} = N / \sin V,$$

где $b_{\text{тр}}$ и $b_{\text{кр}}$ — соответственно ширина зоны повышенной трещиноватости и пониженной прочности пород; N — нормальная амплитуда смещения; V — двугранный угол между плоскостью сместителя и напластованием.

Зона трещиноватости вокруг нарушений в значительной степени зависит от мощности разломов. Так, на рудниках ПАО «Апатит» тектонические нарушения по мощности разделяются на пять групп — от 2 до 10 м. При этом зона влияния разлома, выраженная в повышенной трещиноватости пород, соответствует в основном мощности тектонического нарушения.

Внешние признаки удароопасности в выработках проявляются на расстояниях от разлома, в 5–10 раз превышающих их мощность, при условии, что руды и породы способны накапливать потенциальную энергию упругого сжатия, характеризующую способность массива к динамическим проявлениям горного давления.

Таким образом, особенности тектонического строения массива требуют проведения оценки степени его нарушенности с выделением опасных зон по вероятности проявления горного давления и удароопасных участков, что влечет за собой необходимость проектного изменения конструкций и параметров систем разработки, вида и способов крепления горных выработок, применения специальных методов управления горным давлением.

В настоящее время широкое распространение получила оценка нарушенно-

сти массивов горных пород на основе рейтинговых показателей, которая широко применяется на зарубежных подземных рудниках, что позволяет классифицировать породные массивы по прочности (GSI Хоек, RMI Палмстрем, RQD Дир) и устойчивости выработок (системы Бартона, Бенявского, Лобшера) [5–7].

Данные классификации широко используются как при проектировании, так и производстве горных работ. Например, проектирование крепи выработок осуществляется в основном по системе Бартона, когда определяется индекс Q , характеризующий устойчивость трещиноватого массива вокруг выработки. Значение индекса Q рассчитывается на основе 6 параметров по формуле:

$$Q = \frac{RQD}{J_n} \cdot \frac{J_r}{J_a} \cdot \frac{J_w}{SRF}$$

где RQD — характеризует структурную нарушенность массива; J_n — количество систем трещин; J_r — шероховатость поверхности трещин; J_a — выветренность трещин; J_w — обводненность массива и трещин; SRF — напряженное состояние массива.

При этом высокие значения индекса Q соответствуют хорошей устойчивости пород, а низкие — неустойчивым породам.

Выполненная оценка устойчивости массива для условий глубоких рудников Норильского района показала, что значение индекса Q меняется от 2,5 до 67. Нижние пределы относятся к высокой категории нарушенности, а верхний — к слабой нарушенности массива.

В рамках принятой системы разработки индекс Q определяет вид и необходимый объем крепления выработок, что влияет на ее сравнительную технико-экономическую оценку.

Большую опасность представляет обводненность породных массивов, особенно наличие подземных водоносных го-

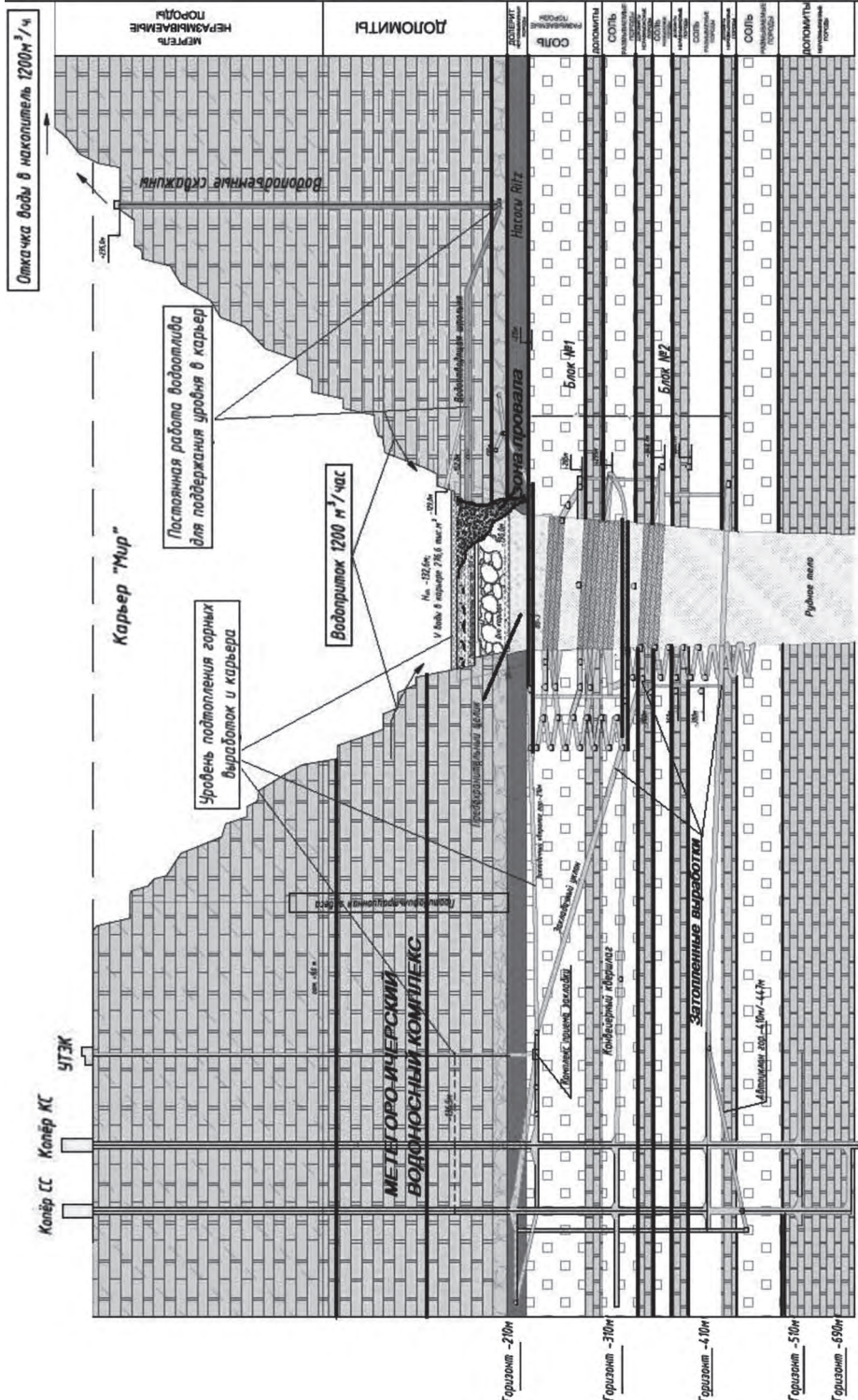
ризонтов, требующих производства горных работ, исключая возможность прорыва вод в выработанное пространство, а также осознания защиты выработанных пространств от проникновения высоконапорных вод путем организации дренажа и других технических решений по их отведению и утилизации.

Катастрофические явления, вызванные затоплением рудников предприятий Уралкалия, Солелецка, соляных шахт в Германии, Канаде и др., связаны с проникновением подземных водонапорных вод в выработанное пространство при развитии неконтролируемых разрушений налегающей толщи пород. Как правило, они происходят с достижением критических деформаций в налегающей толще, с чем связано образование и развитие водопроводящих трещин разрыва.

Особую опасность представляют разработки месторождений в районе Курской магнитной аномалии, где в массиве на глубинах до 400 м расположено 7 водоносных комплексов, в связи с чем работа открытых карьеров на глубинах 300–500 м ведется с постоянным дренажем подземных вод, объем которых в паводковый период достигает 8 тыс. м³/ч.

На подземных рудниках для обеспечения сохранности водонапорной толщи выемка ведется с соблюдением требований по исключению деформирования налегающей толщи пород путем оставления в выработанном пространстве рудных целиков (рудник им. Губкина) и полного заполнения отработанных массивов твердеющей закладкой, обеспечивающей плавное деформирование пород (Яковлевский рудник).

Наиболее крупное разрушение массива горных пород, вызвавшее затопление капитальных, подготовительных и очистных выработок, произошло на руднике «Мир» АК «АЛРОСА» в 2017 г. Работы на подземном руднике велись под отрабо-



Объем воды, поступившей из карьера в рудник – 250 тыс. м³ Объем пород, поступивших в выработку рудника – 60 тыс. м³

Рис. 2. Состояние горных работ после аварии на руднике «МИР», АК «АЛРОСА». Затопление рудника

Fig. 2. State of mining after the accident at the mine «MIR», PJSC «ALROSA». Mine flooding

таннным карьером глубиной 525 м, заполненным породами сухой консервации на высоту 50 м от его дна и агрессивными водами Метегеро-Ичерского горизонта. Между подземными работами и дном карьера был образован 35-метровый целик (рис. 2).

В результате мгновенного разрушения борта карьера в придонной его части образовался провал горных пород, через который в рудник поступило 60 тыс. т породной массы из дренажного слоя подсыпки и 250 тыс. т воды, затопив в том числе и действующие стволы [8]. Работы в руднике были остановлены.

Гидрогеологическое состояние разрабатываемых массивов оказывает наибольшее влияние на безопасность ведения горных работ на глубоких горизонтах. Однако для весьма глубоких и сверхглубоких горизонтов при предварительно обоснованных проектных проработках можно ожидать снижения риска проявления соответствующих факторов.

Большое влияние на выбор технологии разработки залежей оказывает газоносность массивов горных пород.

Характер газопроявлений и возникающих опасностей при освоении месторождений определяется типом и уровнем газоносности вскрываемых геологических нарушений, коллекторов, карстовых полостей.

В составе горючих газов, выделяющихся на рудных месторождениях, преобладает метан и его гомологи, водород, сероводород и др. Например, для подземных рудников Якутии при добыче алмазосодержащего сырья опасность определяется газоотдачей вод, нефти и пород. В составе выделяющихся газов преобладает сероводород в рассолах подмерзлотного Метегеро-Ичерского горизонта и метан в газонефтеносных коллекторах глубоких горизонтов.

На рудниках Норильского района в массивах преобладает наличие метана,

обусловленное расположением в непосредственной близости от разрабатываемых залежей руд углесодержащих пластов, а также нефтепроявлений на глубоких рудниках.

Газобезопасность эксплуатации таких месторождений регламентируется «Специальными мероприятиями газового режима горных пород», разрабатываемыми для каждого рудника.

Таким образом, оценка природных опасностей представляет собой комбинацию факторов, которые могут быть ранжированы по важности влияния на выбор систем и технологии разработки в зависимости от глубины ведения горных работ, которые могут быть определены статистическим анализом и соответствующим образом выражены суммированием критериев опасностей в следующей последовательности: глубина разработки, исходное напряженное состояние массива, тектоническая нарушенность и трещиноватость пород, удароопасность массива, обводненность пород — наличие водоупорных горизонтов, газоносность.

Такой риск-ориентированный подход при сравнительной оценке вариантов систем разработки и выборе параметров геотехнологий на стадии проектирования месторождений должен минимизировать влияние природных опасностей в части риска возникновения аварийных ситуаций при эксплуатации месторождений.

Образование в массиве горных пород выработанных пространств связано с изменением состояния разрабатываемого массива под влиянием горных работ, что обуславливает выбор систем разработки и способа управления горным давлением. Оно включает в себя зоны сдвижений и возможных обрушений горных пород, зоны повышенного опорного давления, целики различного назначения, в т.ч. при переходе от открытых к подземным работам при комбини-

рованной разработке месторождений, незатомпонируемые скважины, зоны подземных водоносных комплексов и др.

Выемка полезного ископаемого сопровождается перераспределением горного давления с образованием разгруженных зон в подработанном массиве и зоны опорного давления впереди фронта горных работ при применении систем разработки с обрушением и закладкой выработанного пространства, которые являются основными на глубоких горизонтах [4, 8–10].

Величина и характер распределения напряжений в зоне опорного давления определяет параметры опасной зоны вокруг очистных работ, где вероятность разрушения массива наивысшая. Зона максимальных концентраций напряжений располагается, по данным различных исследователей, в 10–15 м впереди фронта работ, а повышение напряжения в массиве распространяется на 50–70 м.

Максимум опорного давления при работе с закладкой находится ближе к забою, чем при работе с обрушением.

Разрушения массива наблюдаются в основном в подготовительных выработках, пройденных впереди фронта горных работ, и они могут быть обнаружены по внешним признакам проявления горного давления. Это деформации и обрушения бортов и кровли выработок, разрушение крепи горных выработок, динамические формы разрушения в виде шелушения, стреляния пород, заколообразования и, наконец, в виде горных ударов — наивысшей формы разрушения массива.

В настоящее время отнесение месторождения к удароопасным производится по наличию пород и руд с высокими упругими свойствами, способных к хрупкому разрушению под нагрузкой, а также в случаях проявления динамических разрушений в аналогичных условиях —

на соседних рудниках или на отдельных участках в пределах того же рудного тела. Категория удароопасности оценивается по местоположению и величине максимума опорного давления относительно контура очистной или подготовительной выработки. При этом в качестве базового принят метод дискования керна при бурении скважин перпендикулярно действию максимальных напряжений [13].

В рассмотренных условиях проявляются чаще всего микроудары, толчки в массиве, горные удары на локальных участках разрабатываемого массива. Основным условием возникновения горного удара является наличие в конструктивных элементах систем разработки зон повышенных напряжений, превышающих предельные значения прочности массива на сжатие. Причем шелушение, стреляние пород и интенсивное заколообразование могут проходить при значениях напряжений, составляющих 0,5–0,7 от разрушающих. Для горных ударов основное соотношение между действующими напряжениями и прочностью массива оценивается выражением.

$$\sigma/\sigma_{сж} > 0,8 \div 1,0$$

где σ — максимальные напряжения, действие в массиве горных пород, МПа; $[\sigma_{сж}]$ — прочность образцов руд и пород на одноосное сжатие, МПа.

В связи с этим опасные зоны по проявлениям горного давления в зависимости от степени опасности могут быть классифицированы на выработки:

- низкой опасности — расположенные в зоне опорного давления, где уровень напряжений в массиве не превышает 0,5 $[\sigma_{сж}]$;
- средней опасности — характеризующиеся динамическими формами проявления горного давления, уровень напряжений в массиве составляет 0,5–0,7 $[\sigma_{сж}]$;
- высокой опасности — с отмечающимися случаями горных ударов, выз-

ванных развитием в массивах напряжений, равных или превышающих предел прочности образцов руд и пород на сжатие $\sigma \geq 0,8 \div 1,0 [\sigma_{сж}]$.

Очевидно, что наибольшие сложности при ведении горных работ представляют зоны средней и высокой опасности, где требуется применение специальных способов управления горным давлением и устойчивостью массива горных пород вокруг выработок, которые в настоящее время регламентируются «Федеральными нормами и правилами в области промышленной безопасности» («Положение по безопасному ведению горных работ на месторождениях, склонных и опасных по горным ударам») [13].

В то же время, впервые на подземных рудниках России горные работы будут осуществляться на сверхглубоких горизонтах (рудник «Скалистый» ЗФ ПАО ГМК «Норильский никель»), где завершено строительство ствола ВС-10 на глубину 2056 м и заканчивается строительство ствола СКС на ту же глубину.

На этих горизонтах действующие напряжения в массиве до начала работ по проходке выработок составляют 50–60 МПа. При данном уровне напряжений на глубинах 1000–1200 м (рудники «Октябрьский», «Таймырский») отмечались динамические формы проявления горного давления в подготовительных и очистных выработках. В связи с этим уже на первой стадии развития подготовительных и очистных работ потребуются применение комплекса мероприятий по разгрузке массива от повышенных концентраций напряжений и способов укрепления массива, снижающих риск возникновения опасных динамических разрушений пород.

Как показывает практика ведения горных работ, на глубоких рудниках наибольшее число динамических разрушений массива отмечается в рудных целиках, окружающих горные выработки.

На рис. 3 представлены характерные виды разрушений в целиках и вокруг подготовительных выработок на руднике Страткона (Канада) на глубине 2250 м, где особая роль отводится наличию тектонических нарушений.

В связи с этим основное направление развития горных работ на весьма глубоких и сверхглубоких горизонтах связано с применением сплошных систем разработки с закладкой выработанного пространства, а в случае необходимости — с образованием временных целиков, кроме того, в местах повышенных концентраций напряжений рекомендуется применять искусственные меры воздействия на массив в виде локальных способов разгрузки (разгрузочные скважины, камуфлетное взрывание и др.) и проводить кардинальные мероприятия путем размещения в несущих конструкциях слоя закладки с заданными компрессионными свойствами. Данные технологии разработаны ИПКОН РАН для условий весьма глубоких рудников Норильского района. Технология разработки с целиками на податливом основании предусматривает предварительную проходку и закладку выработок в основании целиков, а выемка клинообразным фронтом по восстанию залежи слоями в восходящем порядке с закладкой с оставлением временного панельного целика производится с разгрузкой массива целика скважинами перед его отработкой, а также при обнаружении мест повышенной концентрации напряжений.

Под влиянием горных работ происходит оседание налегающей толщи пород и земной поверхности, которое может вызвать разрушение сплошности массива, повреждение горных конструкций и поверхностных объектов, увеличение водо- и газопроницаемости пород над выработанным пространством, изменение гидрогеологического режима, образование провалов горных пород [9, 11].

Часть массива, подвергаясь деформациям и смещениям горных пород, образует область сдвижения, параметры которой зависят от горно-геологических условий разработки и выбранной геотехнологии выемки.

В пределах зоны влияния подземных разработок выделяют зону потенциально опасного влияния, определяемую углами сдвижения пород.

Ни рис. 4 представлены расчетные параметры опасной зоны для условий разработки кимберлитовой трубки «Интернациональная», где работы осуществляются на глубинах подземным способом с закладкой выработанного пространства, в направлении снизу вверх на отработанный карьер, глубина которого достигает 300 м. Показано, что размер опасной зоны под дном отработанного

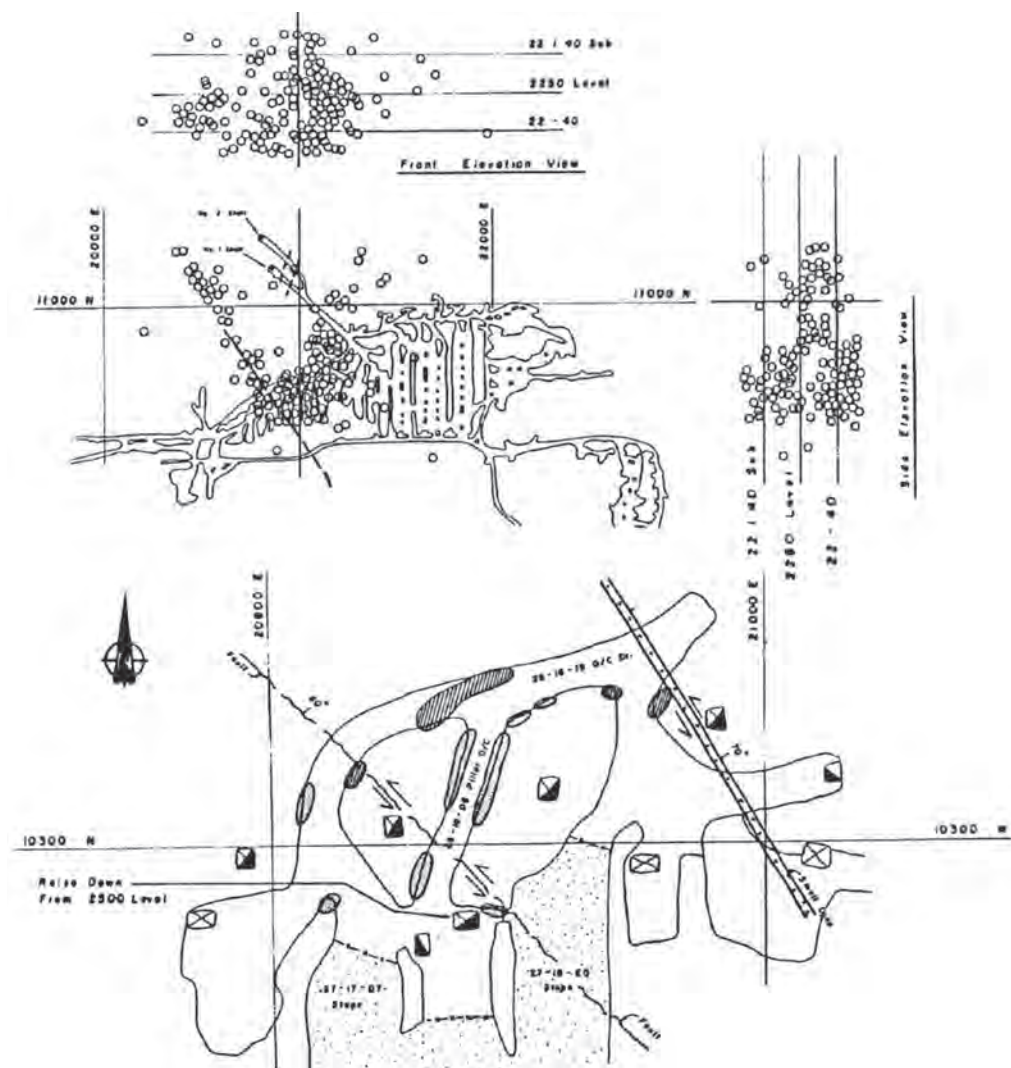
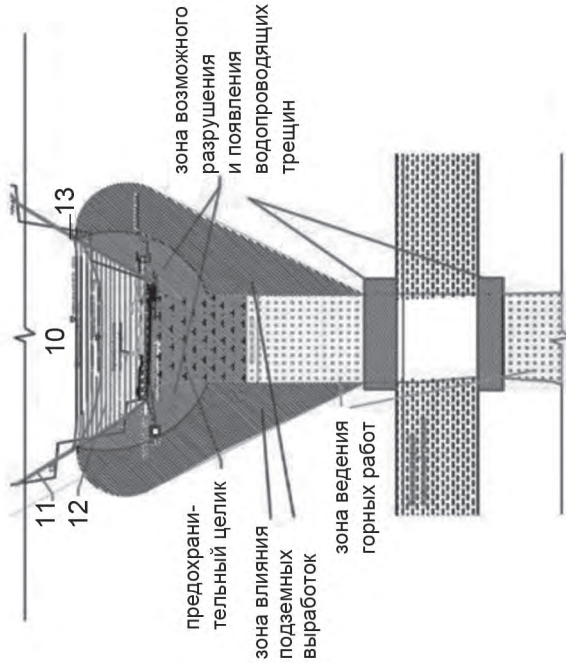
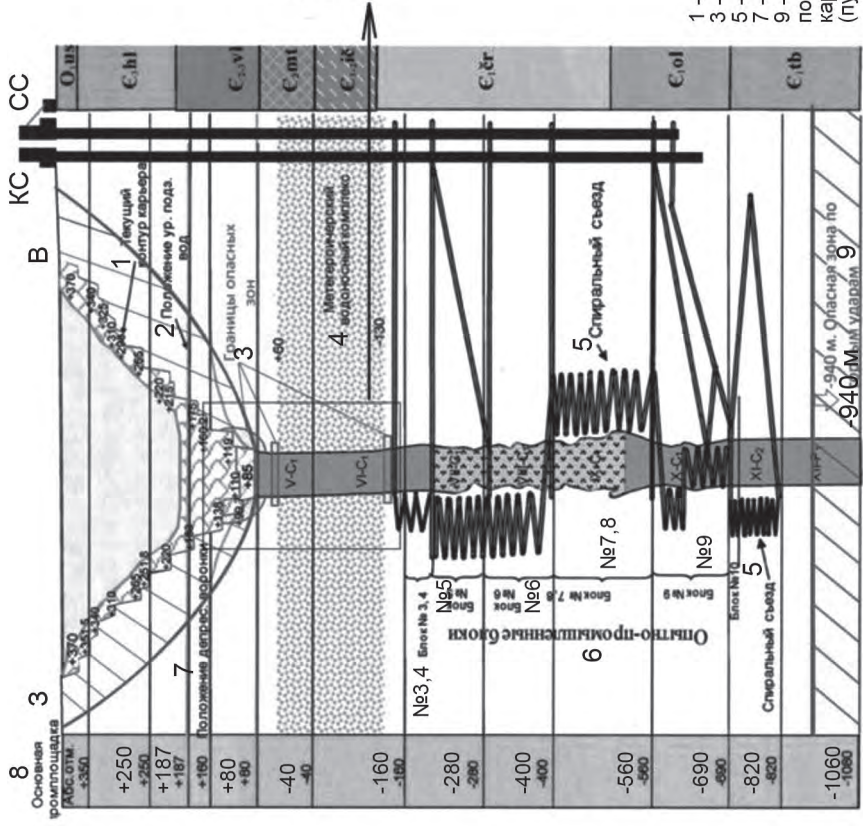


Рис. 3. Характерные виды горных ударов в целиках в районе геологического нарушения на руднике «Страткона» (план гор. 2250 м с выделением наиболее сейсмоопасных участков)

Fig. 3. Types of rock bursts in the solid rock mass in the area of geological disturbance at the mine «Strathcona» (plan horizon 2250 m with the allocation of the most seismic areas)



$$H_6 = 0,23 \frac{m_{эф}}{\epsilon_{кр}} + 0,2y$$

- 1 - текущий контур карьера; 2 - положение ур. подз. вод;
- 3 - границы опасных зон; 4 - метатеоричерский водоносный комплекс;
- 5 - спиральный съезд; 6 - опытно-промышленные блоки;
- 7 - положение депрес. воронок; 8 - основная промплощадка;
- 9 - опасная зона по горным ударам; 10 - уровень воды по состоянию на 01.09.2015г. H=124,2 м; 11 - положение бортов карьера; 12 - обводненные песчано-глинистые осыпи на дне карьера (пуляпа); 13 - 122 м. Абс. отметка высоты опасной зоны

Рис. 4. Выделение границ опасных зон от водного объекта в карьере и МИВК на руднике «Интернациональный», где: $\epsilon_{кр}$ — величина относительной деформации растяжения, при которой породы, подстилающие водный объект, теряют сплошность (критическая деформация); y — высота столба воды в карьере; m — средняя эффективная мощность рудной залежи, обрабатываемой с закладкой. (Расчет параметров опасной зоны выполнены проф. А.Т.Н. М.А. Иофисом и ведущим инженером Е.В. Красюковой)

Fig. 4. The selection of the boundaries of hazardous areas from the water body in the mine and MIWC at the mine «Internacionalny»; $\epsilon_{кр}$ — the relative tensile strain at which the rocks underlying the water body lose continuity (critical deformation); y — height of water in the mine; $m_{эф}$ — average effective thickness of the ore deposit worked out with a backfill

карьера составляет 35 м, а сама зона влияния распространяется на подкарьерный массив и вмещающие породы в борту карьера.

В целом, предельно повышенные концентрации напряжений в горных массивах вокруг очистных и подготовительных выработок, а также предельные значения сдвижения и деформации горных пород, образуют зоны, где велика вероятность разрушения массива, в том числе с катастрофическими последствиями. В то же время сама вероятность возникновения таких зон и масштабы последствий характеризуют геомеханический риск, который требует количественной оценки в каждом конкретном случае.

При этом геомеханический риск, в отличие от принятого значения, определяемого вероятностью возникновения опасного явления и, соответственно, тяжестью последствий аварии для жизни и здоровья, имущества и окружающей среды, должен учитывать достоверность оценок напряженно-деформированного состояния массива и сопровождаться детерминированными расчетами на различных стадиях проектирования и эксплуатации объекта. В связи с этим разрабатываются компенсирующие мероприятия по предотвращению опасности проявления горного давления, включающие геомеханические исследования, такие как мониторинг напряженно-деформированного состояния массива, наблюдения за процессами сдвижения горных пород, сейсмическое зондирование и др.

Для проектирования разработки месторождений на весьма глубоких и сверхглубоких горизонтах выделение возможных опасных зон и количественное определение геомеханического риска становятся одним из главных факторов выбора и обоснования геотехнологий освоения месторождений. Сдвижения и деформации горных пород могут вызвать увеличение водо- и газопроницаемости

пород над выработанным пространством, изменение гидрогеологического режима поверхностных и грунтовых вод и т.д. [9–11]. Поэтому при проектировании разработки месторождений на глубоких горизонтах необходимо выделять опасные зоны от возможного прорыва вод и определять гидрогеомеханический риск, поскольку прорывы воды в горные выработки возможны только при превышении критических деформаций и сдвижений налегающей толщи пород.

Здесь необходимо проводить весь комплекс геомеханического прогнозирования, рассмотренный выше, а также учитывать особенности гидродинамических явлений. Это относится к условиям разработки месторождений комбинированным способом в случае необходимости подтопления карьеров, наличия вмещающих массивов водоносных, в том числе водоупорных горизонтов и др.

Особенно это важно для отработки месторождений солей, где отмечаются наиболее опасные случаи водопроявления и затопление рудников. В таких условиях необходим прогноз и постоянный контроль за рассолопроявлениями в горных выработках, их химический анализ и своевременное обнаружение вероятной связи поступающих в выработку рассолов с надсолевыми водами.

При проектировании геотехнологических вариантов и их реализации необходим также учет газодинамического риска. Это относится, в первую очередь, к месторождениям, отнесенным к I категории опасности по газовому фактору, когда проходка вскрывающих (стволы, квершлагги) и подготовительных выработок, а также бурение дренажных и дегазационных скважин, должно осуществляться с соблюдением мероприятий, обусловленных газовым режимом.

Таким образом, совокупность технологических факторов, способствующих образованию опасных ситуаций при подзем-

ной разработке месторождений на больших глубинах, ранжируют: геомеханические, которые отмечаются на любых глубоких горизонтах, гидрогеологические, действующие на глубоких горизонтах, газодинамические, а также геотермальные. Они в целом определяют условия безопасной отработки месторождений и выбор на этой основе геотехнологии выемки.

При современных подходах к оценке безопасности горных пород требуется количественная оценка риска возникновения опасных явлений, приводящих к аварийным ситуациям, и с учетом данного фактора необходимо производить проектирование и эксплуатацию месторождений полезных ископаемых.

В этом направлении ведется комплекс исследований ИПКОН РАН, позволяющий прогнозировать развитие геотехнологий разработки на перспективу.

Выводы

Обоснование выбора геотехнологий подземной разработки месторождений

на больших глубинах связано с развитием риск-ориентированных подходов к созданию и внедрению безопасных и эффективных методов ведения горных работ, позволяющих учесть формирование опасных зон природного и техногенного характера и обеспечить рациональное комплексное использование георесурсов.

Такой подход к выбору систем разработки рудных месторождений на больших глубинах в сочетании с экономической оценкой внедрения данных геотехнологий позволит обеспечить на всех стадиях освоения месторождений безопасную отработку запасов и выбирать наиболее прогрессивные технологические процессы добычи руды, включая контроль напряженно-деформированного состояния горного массива, гидрогеологического режима, а также рудничной атмосферы, что предопределяет автоматизацию и роботизацию оборудования, компьютеризированное управление модульными системами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Каплунов Д. Р. Теоретические основы проектирования освоения недр: становление и развитие // Горный журнал. — 2014. — № 7. — С. 49–51.
2. Федеральный закон «О промышленной безопасности опасных производственных объектов» (в редакции, действующей с 25 марта 2017 г.). — М.: ЗАО НТЦ ПБ, 2017.
3. Айнбиндер И. И., Галченко Ю. П., Овчаренко О. В., Пацкевич П. Г. Основные направления развития геотехнологий подземной разработки рудных месторождений на больших глубинах // Горный журнал. — 2017. — № 11. — С. 65–71.
4. Замесов Н. Ф., Айнбиндер И. И., Бурцев Л. И., Родионов Ю. И., Овчаренко О. В., Аршавский В. В. Развитие интенсивных методов добычи руд на больших глубинах. — М.: Изд-во ИПКОН РАН, 1990.
5. Louchnikov V. N., Eremenko V. A., Sandy M. P. Ground support liners for underground mines: energy absorption capacities and costs // Eurasian Mining. 2014. No 1. Pp. 54–62.
6. Paul A., Murthy V. M.S.R., Prakash A. K. Estimation of rock load in development workings of underground coal mines. A modified RMR approach // Current Science. 2018. Vol. 114(10). Pp. 2167–2174.
7. Laubscher D. H., Jakubec J. The IRMR/MRMR rock mass classification for jointed rock masses, SME 2000.
8. Айнбиндер И. И., Пацкевич П. Г. Основные положения стратегии возобновления добычи руды на руднике «Мир». Опыт и практические шаги по восстановлению горнодобывающего предприятия после аварии. — М.: изд-во МГТУ им. Баумана, 2018.
9. Казикаев Д. М., Козырев А. А., Каспарьян Э. В., Иофис М. А. Управление геомеханическими процессами при разработке месторождений полезных ископаемых: Учебное пособие. — М.: Изд-во «Горная книга», 2016.

10. Атрушкевич А. В., Бочкарева Т. Н., Забурдяев В. С., Захаров В. Н., Иофис М. А. и др. Горное дело: Терминологический словарь / Под научной редакцией акад. РАН К.Н. Трубецкого, чл.-корр. РАН Д.Р. Каплунова. 5-е изд. — Изд-во «Горная книга», 2016.

11. Galchenko Yu. P., Eremenko V. A., Myaskov A. V., Kosureva M. A. Solution of geological problems in underground mining of deep iron ore deposits // *Eurasian Mining*. 2018. No 1. Pp. 35–40. DOI: 10.17580/cm.2018.01.08.

12. Jalbout A., Simser B. Rock mechanics tools for mining in high stress ground conditions at Nickel Rim South Mine. *Newsletter (Australian Centre for Geomechanics)*, vol. 46, December 2017.

13. Федеральные нормы и правила «Положение по безопасному ведению горных работ на месторождениях, склонных и опасных по горным ударам». — М.: ЗАО НТЦ ПБ, 2014. **ГИАБ**

REFERENCES

1. Kaplunov D. R. Development of a theoretical basis of mining enterprises design. *Gornyy zhurnal*. 2014, no 7, pp. 49–51. [In Russ].

2. *Federal'nyy zakon «O promyshlennoy bezopasnosti opasnykh proizvodstvennykh ob"ektakh»* (v redaktsii, deystvuyushchey s 25 marta 2017 g.) [The Federal Law «On industrial safety of dangerous production facilities» (as in force on March 25, 2017)], Moscow, ZAO NTTS PB, 2017. [In Russ].

3. Aynbinder I. I., Galchenko Yu. P., Ovcharenko O. V., Patskevich P. G. Basic trends of advance in geotechnologies for deep-level ore mining. *Gornyy zhurnal*. 2017, no 11, pp. 65–71. [In Russ].

4. Zamesov N. F., Aynbinder I. I., Burtsev L. I., Rodionov Yu. I., Ovcharenko O. V., Arshavskiy V. V. *Razvitie intensivnykh metodov dobychi rud na bol'shikh glubinakh* [The development of intensive methods of ore mining at great depths], Moscow, Izd-vo IPKON RAN, 1990.

5. Louchnikov V. N., Eremenko V. A., Sandy M. P. Ground support liners for underground mines: energy absorption capacities and costs. *Eurasian Mining*. 2014. No 1. Pp. 54–62.

6. Paul A., Murthy V. M. S. R., Prakash A. K. Estimation of rock load in development workings of underground coal mines. A modified RMR approach. *Current Science*. 2018. Vol. 114(10). Pp. 2167–2174.

7. Laubscher D. H., Jakubec J. *The IRMR/MRMR rock mass classification for jointed rock masses*, SME 2000.

8. Aynbinder I. I., Patskevich P. G. *Osnovnye polozheniya strategii vozobnovleniya dobychi rudy na rudnike «Mir». Opyt i prakticheskie shagi po vosstanovleniyu gornodobyvayushchego predpriyatiya posle avarii* [Key points of the ore mining recovery strategy at the «Mir» mine. Experience and practical steps to restore the mining enterprise after the accident], Moscow, izd-vo MGTU im. Bauman, 2018.

9. Kazikaev D. M., Kozyrev A. A., Kaspar'yan E. V., Iofis M. A. *Upravlenie geomekhanicheskimi protsessami pri razrabotke mestorozhdeniy poleznykh iskopaemykh: Uchebnoe posobie* [Management of geomechanical processes in the development of mineral deposits. Educational aid], Moscow, Izd-vo «Gornaya kniga», 2016.

10. Атрушкевич А. В., Боцкарева Т. Н., Забурдяев В. С., Захаров В. Н., Иофис М. А., etc. *Gornoe delo: Terminologicheskii slovar'*. Pod red. K. N. Trubetskogo, D. R. Kaplunova. 5-e izd. [Mining: Dictionary of Terms Trubetskoy K. N., Kaplunov D. R. (Eds.), 5th edition], Izd-vo «Gornaya kniga», 2016.

11. Galchenko Yu. P., Eremenko V. A., Myaskov A. V., Kosureva M. A. Solution of geological problems in underground mining of deep iron ore deposits. *Eurasian Mining*. 2018. No 1. Pp. 35–40. DOI: 10.17580/cm.2018.01.08.

12. Jalbout A., Simser B. Rock mechanics tools for mining in high stress ground conditions at Nickel Rim South Mine. *Newsletter (Australian Centre for Geomechanics)*, vol. 46, December 2017.

13. *Federal'nye normy i pravila «Polozhenie po bezopasnomu vedeniyu gornykh rabot na mestorozhdeniyakh, sklonnykh i opasnykh po gornym udaram»* [Federal norms and regulations «Provision on secure mining on the deposit of inclined and dangerous of mountain bump»], Moscow, ZAO NTTS PB, 2014. [In Russ].

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Айнбиндер Игорь Израилевич¹ — доктор технических наук, профессор, зав. отдела, e-mail: geoexpert@yandex.ru,
Каплунов Давид Родионович¹ — член-корр. РАН, главный научный сотрудник,
¹ ИПКОН РАН.

Для контактов: Айнбиндер И.И., e-mail: geoexpert@yandex.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

I. I. Aynbinder¹, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of Department, e-mail: geoexpert@yandex.ru,
D. R. Kaplunov¹, Corresponding Member of Russian Academy of Sciences, Chief Researcher,
¹ Institute of Problems of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources of Russian Academy of Sciences, 111020, Moscow, Russia.
Corresponding author: I. I. Aynbinder, e-mail: geoexpert@yandex.ru.



ОТДЕЛЬНЫЕ СТАТЬИ ГОРНОГО ИНФОРМАЦИОННО-АНАЛИТИЧЕСКОГО БЮЛЛЕТЕНЯ (СПЕЦИАЛЬНЫЙ ВЫПУСК)

ПОДЗЕМНАЯ УГЛЕДОБЫЧА XXI ВЕК-1 (2018, № 11, СВ 48, 464 с.)

В сборник вошли статьи по проблемам, связанными с функционированием объектов и технологических процессов угледобывающего предприятия, разрабатывающего месторождения подземным способом. Большое внимание уделено вопросам стратегического развития технологий ведения подземных горных работ, подготовительным и добычным, создания и разработки новых инновационных технологий, промышленной безопасности, нормативной базе, подготовке кадров и эффективному управлению производством. Представлено развитие решений задач оперативного управления комплексно механизированным забоем, контроля и учета динамического влияния массива горных пород на техногенное преобразования массива, наблюдений за деформационными процессами под землей и на поверхности, планирования, подготовки и проведения монтажно-демонтажных работ. Значительный интерес вызвала тематика рационального использования горного оборудования, машин и механизмов, их подготовки и обслуживание. Затронута направление, связанное с внедрением в экономику и в управление предприятием цифры: организация и обеспечение работы информационных систем контроля и управления технологическими процессами в шахте, многофункциональных систем безопасности. Уделено достаточно внимание эффективному использованию электроэнергии для обеспечения основных и вспомогательных технологических процессов угледобывающего предприятия.

UNDERGROUND COAL MINING OF THE XXI CENTURY-1

The collection includes articles on the problems associated with the operation of facilities and processes of the coal mining enterprise that develops deposits by underground method. Much attention is paid to the strategic development of underground mining technologies, preparatory and mining, the creation and development of new innovative technologies, industrial safety, regulatory framework, training and effective production management. The paper presents the development of solutions to the problems of operational management of complex mechanized face, control and accounting for the dynamic influence of rock mass on man-made transformation of the array, observations of deformation processes under the ground and on the surface, planning, preparation and conduct of installation and dismantling works. The subject of rational use of mining equipment, machines and mechanisms, their preparation and maintenance aroused considerable interest. The direction connected with the introduction of figures into the economy and enterprise management is touched upon: organization and maintenance of information systems for control and management of technological processes in the mine, multifunctional security systems. Sufficient attention is paid to the efficient use of electricity to ensure the basic and auxiliary processes of the coal mining enterprise.