



**КЛАССИФИКАЦИЯ ОСЛОЖНЯЮЩИХ ГОРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ
И ТЕХНОГЕННЫХ ФАКТОРОВ И МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ИХ ВЛИЯНИЯ
НА УСТОЙЧИВОСТЬ ГОРНЫХ ВЫРАБОТОК**

Е. А. Разумов¹, В. Г. Венгер¹, Е. Ю. Пудов², С. И. Калинин¹

¹*Научно-исследовательский институт горной геомеханики и маркшейдерского дела –
межотраслевой научный центр ВНИМИ", Сибирский филиал АО "ВНИМИ",*

E-mail: vnimi@inbox.ru, vnimi@inbox.ru, просп. Гагарина 24, г. Прокопьевск 653004, Россия,

²*Кузбасский государственный технический университет им. Т. Ф. Горбачева, Прокопьевский филиал,
E-mail: pudov_evgen@mail.ru, ул. Ноградская 19А, г. Прокопьевск 653033, Россия*

Разработана классификация комплекса осложняющих природных и техногенных факторов, влияющих на формирование геомеханических процессов и устойчивость выработок при интенсивной разработке подземным способом угольных месторождений. Проведена оценка их воздействия на основе вероятностно-статистического метода с использованием формулы полной вероятности гипотез Байеса.

Осложняющие факторы, подземные выработки, оценка, устойчивость, вероятностные методы

**CLASSIFICATION OF COMPLICATING GEOLOGICAL AND TECHNOGENIC FACTORS
AND PROCEDURE FOR ASSESSING THEIR INFLUENCE
ON SUSTAINABILITY OF MINE WORKINGS**

Е. А. Razumov, V. G. Venger, E. Yu. Pudov, and S. I. Kalinin

¹*Siberian branch of JSC Scientific Research Institute of Mining Geomechanics and mine surveying ("VNIMI"),
E-mail: vnimi@inbox.ru, niutk@yandex.ru, pr. Gagarina 24, Prokopyevsk 653033, Russia*

²*Prokopyevsk Branch, Gorbachev Kuzbass State Technical University,*

E-mail: pudov_evgen@mail.ru, ul. Nogradskaya 19A, Prokopyevsk 653033, Russia

The set of complicating natural and technogenic factors affecting the formation of geomechanical processes and sustainability of mine workings during intensive mining of coal deposits by an underground method was classified. An assessment of their influence was carried out on the basis of a probabilistic-statistical method using total probability formula of Bayesian hypotheses.

Complicating factors, underground workings, assessment, sustainability, probabilistic methods

Интенсификация технологических процессов в высокопроизводительных комплексно-механизированных забоях, отрабатывающих пласти в пределах выемочного участка с нагрузкой 10–20 тыс. т в сутки и более, привела к необходимости повышения темпов воспроизводства готовых к выемке запасов угля в шахтном поле по многоштрековым схемам. Однако возможность применения этих схем подготовки выемочных столбов при большом удельном объеме проведения и поддержания выработок с площадью поперечного сечения 20 м² и более ограничена сложными геологическими и горнотехническими условиями, среди которых следует выделить глубину разработки более 500 м, структурные нарушения, природную метаноность более 13 м³/т, высокую вероятность проявления геодинамических явлений в сейсмически активных районах, склонность угольных пластов к самовозгоранию, изменение свойств пород в зонах вечной мерзлоты.

Действующие методики, разработанные в прошлом веке при нагрузке на очистной забой 1–2 тыс. т в сутки и скорости подвигания подготовительных забоев 80–200 м в месяц, не соответствуют требованиям современных инновационных геотехнологий, область применения которых расширяется при освоении новых месторождений угля, в том числе в криолитозонах. Не выявлены закономерности геомеханических процессов при одновременном влиянии комплекса факторов, негативно воздействующих на технологические процессы в подготовительных забоях.

К основным геомеханическим процессам относятся перераспределение напряжений вокруг горной выработки, разрушение и ползучесть в призабойной зоне, расслоение и зависание пород кровли, накопление угольным массивом упругой потенциальной энергии. Проявление горного давления в динамической форме (горные удары, внезапные выбросы угля и газа) обусловлено различными комбинациями, перечисленных процессов и выражается в виде смещений пород, первичных и вторичных осадок кровли, отжима угля от забоя и бортов выработок. В этой связи актуальны исследования, направленные на решение научной задачи развития традиционных и создания новых способов и средств обеспечения устойчивости подземных выработок при интенсивной отработке угольных пластов в сложных условиях умеренного климата и криолитозоне.

В данной статье представлены результаты классификации факторов сложности горно-геологических и техногенных условий при интенсивной подземной разработке угольных месторождений с учетом интеграции комплекса негативных факторов в пределах выемочных панелей и разработки методики прогнозирования влияния их на устойчивость горных выработок.

Следует отметить, что сложность горно-геологических условий изменяется в соответствии с развитием подземной геотехнологии, способов и технических средств проведения и крепления подготовительных выработок, совершенствования систем управления горным давлением, они являются объективными факторами, так как проявляются при сочетании условий залегания угольных пластов и вмещающих пород. Сложные технологические условия возникают при выполнении процессов и операций рабочим персоналом. Вероятность возникновения негативных техногенных ситуаций тесно связана с влиянием природных горно-геологических условий.

На шахтах “Юбилейная”, “Распадская”, “Чертинская-Коксовая” проведены исследования по оценке влияния осложняющих факторов на проходку подготовительных выработок и уровень месячной добычи угля, которые представлены в виде диаграмм на рисунке.

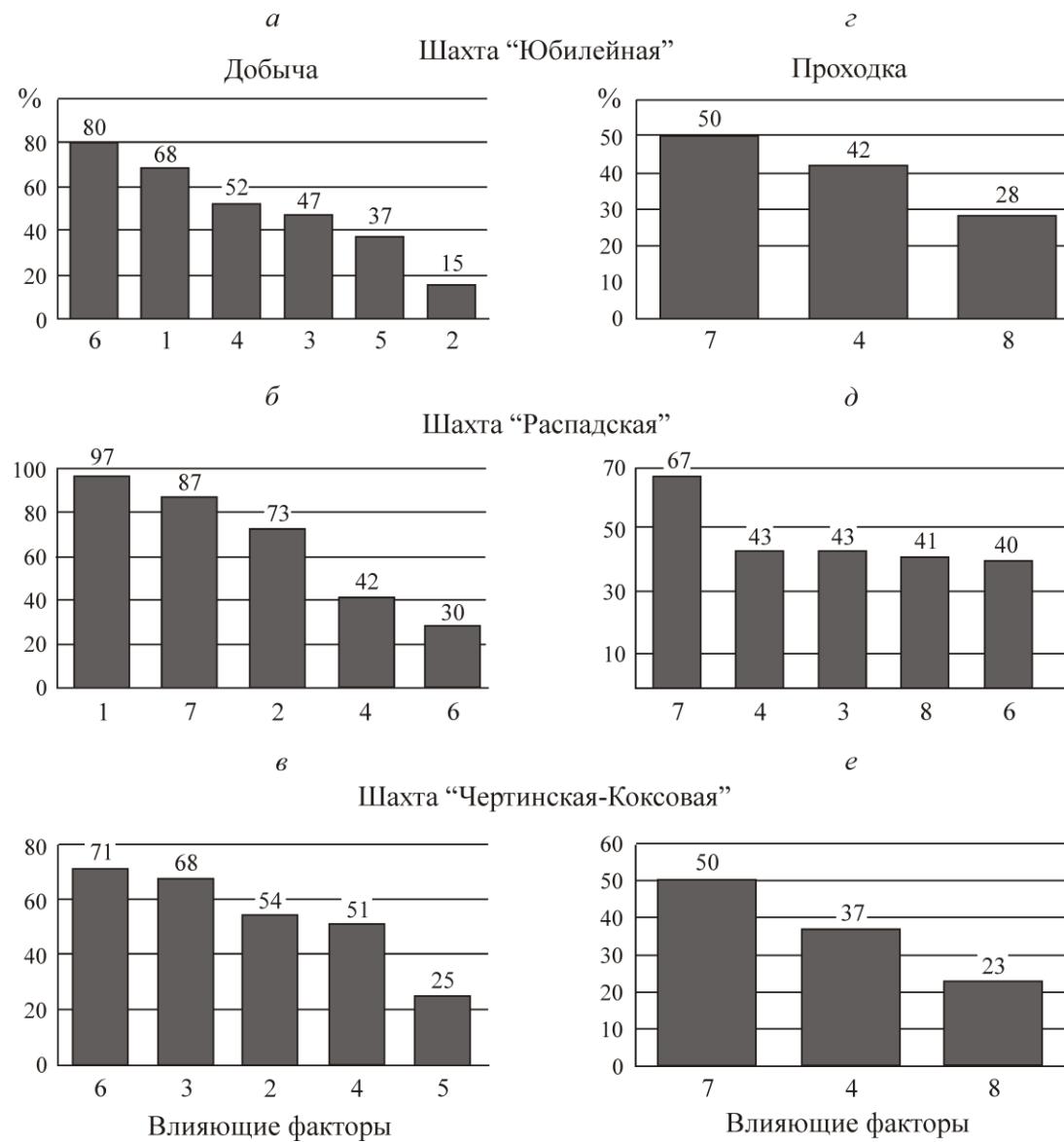
Статистическая обработка результатов наблюдений показала, что на шахте “Юбилейная” наибольшее влияние на спад объемов добычи угля оказали факторы, %: переезд разрезной печи — 80, отход от монтажной камеры — 68, геологические нарушения — 52, повышенная трещиноватость пород — 47; на шахте “Распадская”: отход от монтажной камеры — 97, развитие куполов — 87, повышенное горное давление — 73, геологические нарушения — 42; на шахте “Чертинская-Коксовая”: переезд разрезной печи 71 зона повышенной трещиноватости — 68; зона повышенного горного давления (ПГД) — 54; зона геологического нарушения — 51.

На темпы проведения подготовительных выработок оказали влияние следующие причины, %: на шахте “Юбилейная” зона куполов — 50, зона геологических нарушений — 42, зона повышенного газовыделения — 28; на шахте “Распадская” зона куполения — 67, зона геологических нарушений и повышенной трещиноватости — 43, зона повышенного газовыделения — 41, зона переезда сопряжения — 40; на шахте “Чертинская-Коксовая” зона куполов — 50, зона геологических нарушений — 37, переезд сопряжения — 40; зона повышенного газовыделения — 23.

Степень негативного влияния оценивалась по формуле

$$d = 100 \frac{d_{\max} - d_i}{d_{\max}}, \quad (1)$$

где d , d_i — максимальное и текущее значение показателя в выработке.



Факторы, влияющие на объемы добычи (а, б, в) и темпы проведения подготовительных выработок (г, д, е) по шахтам “Юбилейная” (а, г), “Распадская” (б, д), “Чертинская-Коксовая” (в, е): фактор 1 — отход от монтажной камеры; фактор 2 — зона ПГД; фактор 3 — зона повышенной трещиноватости; фактор 4 — геологическое нарушение; фактор 5 — вывал пород кровли; фактор 6 — переезд разрезной печи; фактор 7 — зона куполения; фактор 8 — загазование (по оси ординат откладывается степень влияния исследуемого фактора, %)

Анализ проведенных исследований показал, что на устойчивость горных выработок оказывает существенное влияние комплекс факторов горно-геологического и техногенного характера, а в криолитозонах дополнительно — температурный режим. Физико-механические свойства пород в зоне вечной мерзлоты значительно отличаются от свойств массива в шахтах с умеренным климатом. Согласно [1, 2] основными компонентами многолетнемерзлых пород, определяющих их свойства в окрестности горных выработок, являются лед, вода, твердые минеральные частицы, пары воды и газа.

Основным недостатком существующих направлений по повышению устойчивости горных выработок в сложных горно-геологических условиях при интенсивной разработке угольных пластов является небольшой диапазон применения полученных результатов [3–6]. Для каждого выемочного столба, панели, блока требуется определенный набор технологических и геомеханических решений.

Перспективные направления исследований по созданию новых способов и средств проведения и поддержания выработок при интенсивной разработке угольных месторождений в сложных условиях обеспечивают решение только локальных задач горного производства, а при совокупности осложняющих факторов не достигаются необходимые показатели подготовительных и очистных забоев.

По результатам выполненных исследований [6, 7] разработана классификация комплекса осложняющих природных и техногенных факторов, влияющих на устойчивость выработок. Классификация учитывает следующие факторы: газоносность пласта; склонность углей к самовозгоранию; геодинамические явления; изменчивость мощности и строения угольных пластов; локальные изменения вещественного состава прочности угля и пород; сложные гидрологические условия; нарушенность угольных пластов и пород; сближенность пластов; зоны повышенного горного давления.

Количественное влияние отдельных из указанных факторов на устойчивость пород в окрестности выработок изучено в объеме, достаточном для принятия решений по предотвращению обрушений кровли и разрушения элементов крепи. Эти мероприятия приведены в действующих нормативных документах (методиках, инструкциях, рекомендациях, указаниях).

Оценить с требуемой надежностью интегральное влияние двух и более факторов на устойчивость выработок по действующим нормативным документам не представляется возможным. Учитывая широкий диапазон изменения и сочетания горно-геологических и техногенных факторов в пределах выемочных столбов, было установлено, что возможность детерминированных методов для прогноза геомеханических параметров в горных выработках является ограниченной. Для оценки комплексного влияния групп факторов целесообразно применять вероятностно-статистические методы, предлагается использовать формулу полной вероятности гипотез Байеса [8], которая имеет вид

$$P(A_i | B) = \frac{P(A_i) P(B | A_i)}{\sum_{i=1}^n P(A_i) P(B | A_i)}, \quad (2)$$

где P — вероятность случайного события; n — количество осложняющих факторов или их групп; $A_1, A_2, A_3, \dots, A_i, \dots, A_n$ — последовательность попарно несовместимых событий, например, одновременно конвергенция боков выработки $A_1 = 100$ и $A_2 = 600$ мм на одном пикете; B — независимые совокупности факторов, влияющих на события A_i , например, форма поперечного сечения подготовительной выработки: прямоугольная, трапециевидная, арочная; $P(A_i)$ — априорная вероятность события A_i , определяется по результатам статистического анализа натурных измерений, например конвергенции кровли и почвы выработки, отжима угля в бортах пластовых выработок и др.; $P(A_i | B)$ — вероятность случайного события A_i при условии, что произошло влияние фактора B .

Сущность метода Байеса заключается в следующем: если из опыта можно сделать n исключающих друг друга предложений (гипотез) H_1, H_2, \dots, H_n и, если событие A может появиться только при одной из этих гипотез, то вероятность события A вычисляется по формуле полной вероятности

$$P_{(A)} = P(H_1) \cdot P(A | H_1) + P(H_2) \cdot P(A | H_2) + \dots + P(H_n) \cdot P(A | H_n), \quad (3)$$

где $P(H_i)$ — вероятность гипотезы H_i ; $P(A | H_i)$ — условная вероятность события A при гипотезе H_i ;

$$P_{(A)} = \sum_{i=1}^n P(H_i) \cdot P(A | H_i). \quad (4)$$

Если после опыта, закончившегося появлением события A , продолжается опыт и возникает событие B , то вероятность этого последнего события будет являться условной и ее вычисление проводится по формуле полной вероятности (2), в которую подставляются не прежние вероятности гипотезы $P(H_1)$, а новые условные вероятности $P(H_i \setminus A)$,

$$P_{(B \setminus A)} = \sum_{i=1}^n P(H_i \setminus A) \cdot P(B \setminus H_i A). \quad (5)$$

Видно, что вероятность совместного наступления событий A и B равна условной вероятности события A , умноженной на безусловную вероятность наступления события B и т. д.

$$P_{(A \setminus B)} = \frac{P(B \setminus A) P(A)}{P(B)}. \quad (6)$$

В соответствии с формулой Байеса влияющие факторы и прогнозируемые геомеханические параметры рассматриваются как случайные величины, распределение которых устанавливается по результатам статистической обработки или экспертной оценки ретроспективной горно-геологической, горнотехнической и технологической информации.

В настоящей работе в соответствии с объектом исследования в качестве случайного события A_i представлен геомеханический параметр: смещение или деформация пород, кровли – почвы или бортов выработки, ширина зоны предразрушения пород на контуре выработки, отношение остаточной прочности пород к исходной, изменения площади поперечного сечения выработки под влиянием горного давления и др.

Величина геомеханического параметра может возникнуть при некотором событии B , в качестве которого рассматривается один или группа осложняющих факторов. Осложняющими факторами могут быть: мощность угольного пласта, угол падения, глубина разработки, ширина предохранительного целика и др. Всего в вероятностную таблицу включено $n = 16$ факторов.

Пусть количество всех j факторов или групп факторов равно n , т. е. $j = 1, \dots, n$. Диапазон каждого j -го фактора или их группы делится на k интервалов, которые принято называть признаками, $k = 1, 2, 3, \dots, s$, где s — общее количество интервалов фактора j . Вероятность возникновения величины геомеханического параметра будет определяться совокупностью признаков-факторов. Для адаптации вероятностно-статистического метода к сложным горно-геологическим, горнотехническим и технологическим условиям интенсивной отработки угольных пластов принята гипотеза, что попадание в каждый интервал геомеханического параметра равновероятно. Это соответствует следующему виду формулы (2):

$$P_j = \frac{\prod_{j=1}^n P_{jki}}{\sum_{i=1}^m \prod_{j=1}^n jki}, \quad (7)$$

где $j = 1, \dots, n$ — характеристика фактора сложности горно-геологических условий (ГГУ); $k = 1, \dots, s$ определяет признаки фактора сложности; $i = 1, 2, \dots, m$ определяет диапазоны вероятности возникновения величины геомеханического параметра; $\sum_{j=1}^n jki$ — произведение кратностей.

Для каждого интервала по формуле (7) с использованием ретроспективной информации находится вероятность численного значения геомеханического параметра. Вероятность появления геомеханического параметра с определяемой величиной устанавливается по максимальному значению вероятности интервала. Для определения численного значения интервала с максимальной вероятностью формируется вероятностно-статистическая таблица.

Макет вероятностно-статистической таблицы для определения интервала геомеханического параметра по максимальной вероятности

Характеристика факторов сложности ГГУ $j = 1, \dots n$	Интервалы фактора сложности ГГУ, $k = 1, \dots s$	Интервалы и вероятности интервалов геомеханических параметров, $i = 1 \text{ м}$								
		Конвергенция кровля – почва, мм								
		< 100 $i = 1$	101–200 $i = 2$	201–300 $i = 3$	301–400 $i = 4$	401–500 $i = 5$	501–600 $i = 6$	601–700 $i = 7$	701–800 $i = 8$	> 800 $i = 9$
Глубина разработки, м $j = 1, s = 6$	0–200, $k = 1$	$P_{111}=0.5$	$P_{112}=0.45$	$P_{113}=0.4$	$P_{114}=0.35$	$P_{115}=0.3$	$P_{116}=0.25$	$P_{117}=0.2$	$P_{118}=0.1$	$P_{119}=0.01$
	201–400, $k = 2$	$P_{121}=0.4$	P_{122}	P_{123}	P_{124}	P_{125}	P_{126}	P_{127}	P_{128}	$P_{129}=0.1$
	401–600, $k = 3$	$P_{131}=0.3$	P_{132}	P_{133}	P_{134}	P_{135}	P_{136}	P_{137}	P_{138}	$P_{139}=0.2$
	601–800, $k = 4$	$P_{141}=0.2$	P_{142}	P_{143}	P_{144}	P_{145}	P_{146}	P_{147}	P_{148}	$P_{149}=0.3$
	801–1000, $k = 5$	$P_{151}=0.1$	P_{152}	P_{153}	P_{154}	P_{155}	P_{156}	P_{157}	P_{158}	$P_{159}=0.4$
	> 1000, $k = 6$	$P_{161}=0.01$	P_{162}	P_{163}	P_{164}	P_{165}	P_{166}	P_{167}	P_{168}	$P_{169}=0.5$
Мощность пласта, м $j = 2, s = 7$	< 0.7, $k = 1$	P_{211}	P_{212}	P_{213}	P_{214}	P_{215}	P_{216}	P_{217}	P_{218}	P_{219}
	0.7–1.3, $k = 2$	P_{221}	P_{222}	P_{223}	P_{224}	P_{225}	P_{226}	P_{227}	P_{228}	P_{229}
	1.31–2, $k = 3$	P_{231}	P_{232}	P_{233}	P_{234}	P_{235}	P_{236}	P_{237}	P_{238}	P_{239}
	2.01–3, $k = 4$	P_{241}	P_{242}	P_{243}	P_{244}	P_{245}	P_{246}	P_{247}	P_{248}	P_{249}
	3.01–5, $k = 5$	P_{251}	P_{252}	P_{253}	P_{254}	P_{255}	P_{256}	P_{257}	P_{258}	P_{259}
	5.01–10, $k = 6$	P_{261}	P_{262}	P_{263}	P_{264}	P_{265}	P_{266}	P_{267}	P_{268}	P_{269}
	> 10, $k = 7$	P_{271}	P_{272}	P_{273}	P_{274}	P_{275}	P_{276}	P_{277}	P_{278}	P_{279}
Угол падения, град. $j = 3, s = 4$	0–18, $k = 1$	P_{311}	P_{312}	P_{313}	P_{314}	P_{315}	P_{316}	P_{317}	P_{318}	P_{319}
	19–35, $k = 2$	P_{321}	P_{322}	P_{323}	P_{324}	P_{325}	P_{326}	P_{327}	P_{328}	P_{329}
	36–55, $k = 3$	P_{331}	P_{332}	P_{333}	P_{334}	P_{335}	P_{336}	P_{337}	P_{338}	P_{339}
	> 55, $k = 4$	P_{341}	P_{342}	P_{343}	P_{344}	P_{345}	P_{346}	P_{347}	P_{348}	P_{349}
Факторы $j = 4 \div (n-1),$ $s = s-1$	$k = 1-s$	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Предел прочности угля, МПа $j = n, s = 7$	< 0.5 $k = 1$	P_{m11}	P_{m12}	P_{m13}	P_{m14}	P_{m15}	P_{m16}	P_{m17}	P_{m18}	P_{m19}
	0.51–0.8, $k = 2$	P_{m21}	P_{m22}	P_{m23}	P_{m24}	P_{m25}	P_{m26}	P_{m27}	P_{m28}	P_{m29}
	0.81–1.0, $k = 3$	P_{m31}	P_{m32}	P_{m33}	P_{m34}	P_{m35}	P_{m36}	P_{m37}	P_{m38}	P_{m39}
	1.01–1.2, $k = 4$	P_{m41}	P_{m42}	P_{m43}	P_{m44}	P_{m45}	P_{m46}	P_{m47}	P_{m48}	P_{m49}
	1.21–1.4, $k = 5$	P_{m51}	P_{m52}	P_{m53}	P_{m54}	P_{m55}	P_{m56}	P_{m57}	P_{m58}	P_{m59}
	1.41–1.6, $k = 6$	P_{m61}	P_{m62}	P_{m63}	P_{m64}	P_{m65}	P_{m66}	P_{m67}	P_{m68}	P_{m69}
	> 1.6, $k = 7$	P_{m71}	P_{m72}	P_{m73}	P_{m74}	P_{m75}	P_{m76}	P_{m77}	P_{m78}	P_{m79}

ВЫВОДЫ

Разработана классификация комплекса осложняющих природных и техногенных факторов, влияющих на устойчивость подземных горных выработок. Она отличается оценкой дифференцированного и интегрального влияния факторов сложности геологических и горнотехнических условий на устойчивость подземных горных выработок на шахтах, расположенных в зонах умеренного климата и криолитозоне. Создана методика прогнозирования геомеханических параметров на основе вероятностно-статистического метода Байеса с использованием комплекса классифицированных природных и техногенных факторов и ранжированных геомеханических событий по степени влияния на устойчивость выработок.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. **Shuvalov E. V. and Galkin A. F.** Theory and practice of optimal control of the thermal regime of underground structures in the permafrost zone, Mining information and analytical bulletin, 2014, pp. 365–370. [Шувалов Е. В., Галкин А. Ф. Теория и практика оптимального управления тепловым режимом подземных сооружений криолитозоны // ГИАБ. — 2014. — С.365–370.]
2. **Galkin A. F.** Increasing the stability of mine workings in the permafrost zone, Journal of Mining Institute, 2014, vol. 207, pp. 99–102. [Галкин А. Ф. Повышение устойчивости горных выработок в криолитозоне // Записки горного института. — 2014. — Т. 207. — С. 99–102.]
3. **Loginov A. K., Korshunov A. K., Shik V. M., and Artemiev V. B.** Geomechanics in coal mines, Moscow, Publishing House of Mining, LLC “Cimmerian Center”, 2011, 388 pp. [Логинов А. К., Коршунов А. К., Шик В. М., Артемьев В. Б. Геомеханика на угольных шахтах. — М.: Изд-во Горное дело, ООО “Киммерийский центр”, —2011. — 388 с.]
4. **Stavrogin A. N. and Protosenya A. G.** Strength of rocks and stability of workings at great depths, Moscow, Nedra, 1985, 271 pp. [Ставрогин А. Н., Протосеня А. Г. [Прочность горных пород и устойчивость выработок на больших глубинах. — М.: Недра, 1985. — 271 с.]
5. **Guidelines for the rational location, protection and maintenance of mine workings in coal mines**, Moscow, Publishing House of Mining, LLC “Cimmerian Center”, 2011, 216 pp. [Указания по рациональному расположению, охране и поддержанию горных выработок на угольных шахтах. — М.: Горное дело ООО “Киммерийский центр”, 2011. — 216 с.]
6. **Razumov E. A.** Assessment of the factors of complexity of mining conditions at modern coal mines, Coal, 2019, no. 10, pp.16–21.] [Разумов Е. А. Оценка факторов сложности условий ведения горных работ на современных угольных шахтах // Уголь. — 2019. — № 10. — С. 16–21.]
7. **Razumov E. A., Sidelnikov A. A., Grechishkin P. V., Pozolotin A. S., and Venger V. G.** Increasing the stability of underground mine workings of coal mines carried out in permafrost rocks, Coal, 2014, no. 1, pp. 4–7. [Разумов Е. А., Сидельников А. А., Гречишキン П. В., Позолотин А. С., Венгер В. Г. Повышение устойчивости подземных горных выработок угольных шахт, проводимых в многолетнемерзлых породах // Уголь. — 2014. — № 1. — С. 4–7.]
8. **Ventsel E. S.** Probability theory, Moscow, Nauka, 1969, 576 pp.]. [Венцель Е. С. Теория вероятностей. — М.: Наука, 1969. — 576 с.]