

УДК 550.31:622.4:622.019

DOI: [10.46698/VNC.2021.17.27.012](https://doi.org/10.46698/VNC.2021.17.27.012)

Оригинальная статья

Влияние ветрового режима и давления атмосферного воздуха на надежность вентиляции рудников и организм человека

И. Д. Алборов , В. Б. Заалишвили 

Геофизический институт – филиал ФГБУН ФНЦ «Владикавказский научный центр Российской академии наук», Россия, РСО-Алания, 362002, г. Владикавказ, ул. Маркова, 93а, e-mail: datos.ru@yandex.ru

Статья поступила: 03.08.2021, доработана: 06.09.2021, принята к публикации: 14.09.2021

Резюме: Актуальность работы. Статья посвящена обоснованию учета естественной тяги на эффективность и надежность проветривания рудников со сложной вентиляционной сетью при многостольном вскрытии месторождений полезных ископаемых. **Цель работы.** Показан уровень на легкие горнорабочих в условиях пониженного атмосферного давления. В статье приведены результаты исследований по влиянию метеорологических и геофизических факторов на надежность проветривания вентиляционных систем в условиях высокогорья. Показана динамика влияния ветровых потоков при штольневом вскрытии месторождений на устойчивость воздухообмена горных выработок и шахт в целом. **Методы работы.** Даются теоретические формулы по расчету естественной тяги при различных направлениях вектора скорости воздушных потоков на дневной поверхности. Приведен метод учета естественной тяги в различных уровнях барометрического давления. **Результаты работы.** Показан учет барометрического коэффициента при различных уровнях расположения горной выработки над уровнем моря. Показано, что без учета геофизических факторов метеоусловий местности обеспечение надежного проветривания рабочих мест рудника невозможно. Отмечено, что снижение парциального давления кислорода в альвеолах легких приводит к нарушению нормального ритма дыхательной функции организма человека. Это способствует к развитию дисфункции и ослаблению резистентности человека и к иным заболеваниям, что снижает потенциальную работоспособность и профессиональные качества трудящегося. Вводятся соответствующие корректирующие коэффициенты по нормируемой запыленности и по системе вентиляции для обеспечения надежной работы при всех отклонениях. Даются рекомендации по учету барометрического давления при нормировании вредных выделений в рудничную атмосферу. Предлагаемое решение учета давления атмосферного воздуха рекомендовано Госгортехнадзору и Государственным учреждениям санитарно-гигиенического нормирования внести в коррективы по нормированию вредных веществ в воздухе рабочей зоны с учетом барометрического коэффициента, что позволит снизить нагрузку на легкие работающих и уровень профзаболевания горняков.

Ключевые слова: депрессия естественной тяги, скорость воздуха, направление потока, барометрический коэффициент, нагорные рудники, ветровой напор.

Для цитирования: Алборов И.Д., Заалишвили В.Б. Влияние ветрового режима и давления атмосферного воздуха на надежность вентиляции рудников и организм человека. *Геология и геофизика Юга России*. 2021. 11 (3): 148 – 159. DOI: [10.46698/VNC.2021.17.27.012](https://doi.org/10.46698/VNC.2021.17.27.012).

[DOI: 10.46698/VNC.2021.17.27.012](https://doi.org/10.46698/VNC.2021.17.27.012)

Original paper

Influence of wind conditions and pressure the influence of atmospheric air on the reliability of mine ventilation and the human body

I. D. Alborov , V. B. Zaalishvili 

Geophysical Institute of the Vladikavkaz Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences,
93a Markova Str., Vladikavkaz 362002, Russian Federation, e-mail: datos.ru@yandex.ru

Received: 03.08.2021, revised: 06.09.2021, accepted: 14.09.2021

Abstract: Relevance. The paper is devoted to substantiation of consideration of natural draught on efficiency and reliability of ventilation of mines with complex ventilation network in multi-wall opening of mineral deposits. The level on lungs of miners in conditions of reduced atmospheric pressure is shown. **Aim.** The article presents the results of studies on the influence of meteorological and geophysical factors on the reliability of ventilation systems in high mountain conditions. It shows the dynamics of the influence of wind flows during adit opening of deposits on the stability of air supply of mine workings and mines as a whole. The theoretical formulas for calculating the natural draught at different directions of the velocity vector of air flows on the day surface are given. **Methods.** The method of taking into account the natural draught in different levels of barometric pressure is given. Consideration of the barometric coefficient at different levels of the location of the mine above sea level is shown. **Results.** It is shown that without taking into account geophysical factors of meteorological conditions of the area to ensure reliable ventilation of working places of the mine. It is noted that the decrease of the partial pressure of oxygen in the lung alveoli leads to disturbance of the normal rhythm of the respiratory function of the human body. This contributes to the development of dysfunction and weakening of human resistance and other diseases, which reduces the potential work capacity and professional qualities of the worker. Appropriate correction factors for normalized dustiness and ventilation system are introduced to ensure reliable operation under all deviations. Recommendations are given for taking into account barometric pressure when rationing harmful emissions into the mine atmosphere. The proposed solution for taking into account atmospheric air pressure is recommended to Gosgortekhnadzor and State institutions of hygienic rationing to make adjustments for rationing harmful substances in working area air with regard to the barometric factor, which will reduce the burden on workers' lungs and the level of occupational diseases of miners.

Keywords: depression of natural thrust, air velocity, flow direction, barometric coefficient, upland mines, wind pressure.

For citation: Alborov I.D., Zaalishvili V.B. Influence of wind conditions and pressure the influence of atmospheric air on the reliability of mine ventilation and the human body. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2021. 11 (3): 148–159. DOI: 10.46698/VNC.2021.17.27.012.

Введение

Вентиляция рудников со штольневым вскрытием рудного тела является сложной аэродинамической научно-практической задачей. В связи с этим при проектировании вентиляции таких рудников прибегают к аэродинамическому моделированию вентиляционных систем [Bernardo, da Gama, 1997; Sarac, Sensogut, 2000; Krach, 2011; Suvar et al., 2012, 2013; Castilla-Gomez et al., 2015; Dziurzynski et al., 2015, 2017; Nyaaba et al., 2015; Rezaei et al., 2019; Jha, 2017; Morar et al., 2017; Li et al., 2018; Maleki et al., 2018; Gangrade et al., 2019; Wu et al., 2019; Kobylkin, Kharisov,

2020; Liu et al., 2020]. Однако на практике вентиляционные службы рудников и шахт часто сталкиваются с вентиляционными системами, трудно поддающиеся реальному моделированию, что обуславливает проведение депрессионных съемок отдельных участков, вентиляционных ветвей или шахты в целом. Обеспеченность горных выработок и забоев потребным объемом свежего воздуха зависит от адекватного учета факторов, влияющих на его распределение по пути движения потока к месту доставки. На практике встречается множество причин, препятствующих обеспечению эффективного проветривания, как отдельных горных выработок или отдельного забоя, так и групп забоев, что может приводить к превышению санитарных норм по пылегазовому загрязнению воздуха рабочей зоны. Это обстоятельство при систематическом нарушении вентиляции может привести к развитию у работающих профессионального заболевания – силикоза или других отклонений в организме горнорабочих [Романченко, 2019; Колесов, 2019; Roghanch, Kocsis, 2017; Tariq, Bekir, 2017; Carriere et al., 2017]. Особенно сложно приходится в вентиляционных сетях в случае рассредоточенных утечек (подсосов). В таких сетях (в квадратичной зависимости) идет уменьшение (увеличение) сопротивления вентиляционной системы, что непременно сказывается на надежности вентиляции, как участка, так и рудника в целом. Немаловажное значение имеет и ориентация вскрывающихся рудное тело штолен относительно розы ветров, так совпадение направления вектора скорости ветра с осью горной выработки способствует или противостоит депрессии, развиваемой вентилятором в этой ветви. Другой составляющей, влияющей на состояние человека в условиях высокогорья, является барометрическое давление, являющегося главным в определении плотности, и, следовательно, объемного веса воздуха, от величины которого напрямую зависит частота дыхания – фактора, определяющего нагрузку на легкие человека.

Уточнение решения поставленной задачи по расчету вентиляции высокогорных рудников позволит обеспечить более высокую надежность доставки свежего воздуха на рабочие места и снизит уровень риска развития заболеваний у горнорабочих.

Целью работы является установление взаимосвязи между уровнем атмосферного давления и напряженностью труда горнорабочих, а также влиянием ветрового напора на дневной поверхности на надежность вентиляции рудников со штольневом вскрытием.

Методы исследований

Для решения поставленной задачи были использованы классические законы аэродинамики и экспериментальные инструментальные замеры естественной тяги и связанных с ними физических параметров атмосферного и рудничного потоков воздуха [Архангельский, 2017; Гончаренко, Коростелев, 2018; Калугов, Юков, 2020; Крымская, 2017; Экология, 2016].

При добыче руд в недрах горных территорий (рудники Кавказа, Алтая, Казахстана, Кольского полуострова и др.) месторождения имеют штольневое вскрытие. Вскрывающие штольни используются в системе вентиляции рудников. В то же время, на практике встречаются многочисленные геодинамические явления [Иванов и др., 2020; Черкашин, Газалиев, 2019; Svalova et al., 2019], разрушающие целостность массивов горных пород, и приводящие к возникновению аэродинамических связей потоков воздуха через возникающие трещины и обрушения с другими ветвями вентиляционной системы или с дневной поверхностью. Такие аэроди-

намические связи ослабляют надежность подачи потребного объема свежего воздуха на рабочие места рудника. Метеорологические параметры на дневной поверхности, вскрывающих месторождения штолен в горах Северного Кавказа, обусловлены близким расположением вечных снегов и ледников. Особенность ветрового режима района определяется орографическими условиями, в соответствии с которыми преобладают местные горно-долинные ветры. В дневное время ветер дует снизу вверх – долинный ветер, ночью – в темное время суток в обратном направлении – горный ветер. В районе бывшего горного поселения вблизи зоны горного отвода рудника «Молибден» наблюдаются боковые ветры со стороны Главного Кавказского хребта, спускающееся в ущелье по долине. Ветры носят характер горных фёнов. Число дней с ветром (15 м/с и более) в зоне горного отвода составляет 25 в году, достигая максимума – 50. В числе бурных ветров бывают ураганы со скоростью 80 м/с и более. Усиленные ветры дуют с юго-запада и юга. Они имеют особенные черты фёнов и сопровождаются повышением температуры и понижением относительной влажности воздуха. По данным Института ГИПРОНИКЕЛЬ фёны, как правило, продолжаются около 10-12 часов, периодами удерживаясь до нескольких суток.

В процессе выполнения исследований учитывались такие факторы, как: геодезическая высота расположения штолен, участвующих в системе проветривания рудника и наличие аэродинамических связей вентиляционных выработок с дневной поверхностью.

Для учета влияния скорости ветра была использована статистика движения воздуха на дневной поверхности и роза ветров на уровнях вскрывающих штолен из отчета многолетних исследований Института ГИПРОНИКЕЛЬ.

Для нормирования запыленности воздуха на рабочих местах в меняющихся барометрических условиях высокогорья необходимо иметь правовую основу учета такого норматива. При нормальных барометрических условиях (геодезическая высота – $Z = 0$, давление воздуха – $p = 760$ мм рт. ст., наличие кислорода в атмосфере составляет 20,96%). При таких условиях частота дыхания человека составляет в среднем 12 раз в минуту, а уровень освоения кислорода красными кровными тельцами в легких достигает 6-7%, т.е. переработанный в организме воздух имеет содержание кислорода около 14%.

Главной характеристикой горных ландшафтов остается вертикальная зональность с температурным градиентом, не свойственным остальной территории планеты Земля [Алексеенко, 1998; Медведев и др., 1984; Израэль, 1984]. В связи с этим горными территориями считаются местности, где среда обитания: высота рельеф и климат – создает особые условия, влияющие на повседневную человеческую деятельность [Закон РСО-Алания, 1998]. В соответствии с принятым законом горные территории подразделяются на:

- низкогорье – до 1000 метров над уровнем моря;
- среднегорье – от 1001 до 2000 метров над уровнем моря;
- высокогорье – свыше 2001 метра над уровнем моря.

Результаты исследований

Влияние депрессии естественной тяги на эффективность проветривания

В проветривании нагорных рудников наряду с принудительной вентиляцией (вентиляторы) объективно участвует тепловая депрессия (ТД), проявление которой называют естественной тягой (h_c). Возникновение ее обусловлено рядом следую-

щих факторов: различная плотность воздуха в подающих и выдающих выработках (при наличии различных высотных отметок), а для тоннелей – разность высот порталов, температуры наружного воздуха и воздуха тоннеля, различная плотность воздуха по обе стороны горы, обусловленная разностью температур воздуха и барометрического давления и, наконец, капез (движение) воды в подающей или выдающей выработках. Основными факторами, обуславливающими изменение плотности воздуха в выработках вентиляционной сети нагорных рудников, являются барометрическое давление и температура. Заметное влияние на величину депрессии естественной тяги при многоэтажном штольневом вскрытии нагорных месторождений оказывает ветровое давление атмосферного воздуха, которое в зависимости от направления ветра относительно оси штольни, увеличивает или уменьшает величину тепловой депрессии [Воропаев, 1966].

Величина ветрового давления (напора) определяется по формуле:

$$h_{\text{ветер}} = \frac{V_{\text{в}}^2 \cdot \gamma}{2} \cdot \cos^2 \cdot \alpha, \quad (1)$$

где:

$V_{\text{в}}$ – скорость ветра, м/с;

γ – плотность воздуха на выходе в штольню, кг/м³;

α – угол между направлением ветра и осью штольни, град.

Для расчета гидростатических и термодинамических характеристик естественной тяги авторами проанализированы несколько методов. В ряде случаев h_e определяют как разность статических давлений воздуха в воздухоподающих и воздуховыдающих выработках:

$$h_e = H \cdot (\gamma_{\text{ср.п}} - \gamma_{\text{ср.в}}) \cdot g \quad (2)$$

где:

H – длина проекции вентиляционной выработки на вертикальную плоскость, м;

g – ускорение свободного падения, м/с²;

$\gamma_{\text{ср.п}}$, $\gamma_{\text{ср.в}}$ – плотность воздуха в воздухоподающих и воздуховыдающих выработках, кг/м³.

Применение метода связано с выполнением вычислений по определению средней плотности воздуха:

$$\gamma_{\text{ср.}} = 0,465/n \left(P_1/T_2 + P_2/T_2 + \dots + P_n/T_n \right), \text{ кг/м}^3 \quad (3)$$

где: n – число опытов;

P_1, P_2, \dots, P_n и T_1, T_2, \dots, T_n , барометрические давления, мм. рт. ст. и термодинамическая температура воздуха, соответственно.

Метод не учитывает влияние влаги и химического состава воздуха. Согласно работе [Комаров, Килькеев, 1969]:

$$h_e = P_0 \cdot H / 100 (\alpha_1 - \alpha_2) \cdot g, \text{ Па} \quad (4)$$

где:

P_0 – барометрическое давление, мм. рт. ст.;

α – барометрический коэффициент.

$$\alpha_1 = 13,6 \times 100 (RT_1)^{-1}; \alpha_2 = 13,6 \times (RT_2)^{-1}. \quad (5)$$

Величины α_1, α_2 для различных температур выбирают из таблицы 1.

Таблица 1 / Table 1

Значение барометрического коэффициента /

Value of the barometric coefficient

$t_{cp.}$	-30	-25	-20	-15	-10	-5	0	5	10	15	20
α	0,191	0,187	0,184	0,189	0,177	0,174	0,170	0,167	0,161	0,163	0,159

При $H > 100$ м значения h_e умножают на коэффициент $K = 1 + H \times 10^{-4}$.

Термодинамические методы основаны на представлении депрессии тепловой тяги h_e как работа, совершаемая единицей объема воздуха при его движении по вентиляционной сети. Для ее вычисления определяют температуру воздуха в пунктах, геодезическая высота которых известна [Воропаев, 1950] по формуле:

$$h_e = \gamma_{cp} \times S_k \times T_2^{-1} \times g, \text{ Па}, \quad (6)$$

где: γ_{cp} – средняя плотность воздуха, кг/м^3 ;

S_k – площадь многоугольника в координатах, полученная отложением по оси ординат геодезических высот замерных точек по длине вентиляционной струи, а по оси абсцисс – температура воздуха в этих точках;

T_2 – средняя термодинамическая температура, соответствующая центру тяжести $T_{ц}$ площади многоугольника;

g – ускорение свободного падения, м/с^2 .

Температура центра тяжести площади определяется.

$$T_{ц} = 1/2 (T_{min.} + T_{max.}), \quad (7)$$

где: $T_{min.}$, $T_{max.}$ – минимальная и максимальная температура в контуре многоугольника, $^{\circ}\text{К}$.

Плотность воздуха γ_{cp} увязана с барометрическим давлением для равнинных рудников [Воропаев, 1950; Алборов, 1986], принимается равной $1,25 \text{ кг/м}^3$, для условий нагорных рудников она достигает 1 кг/м^3 .

Достоинство описанной группы методов – возможность определения не только величины общей депрессии естественной тяги, но и ее значения для отдельных контуров вентиляционной сети, например, для нагорных рудников, составляющими которых являются горизонтальные штольни.

Корректировка запыленности рудничного воздуха в условиях высокогорья

В условиях, соответствующих стандартным (нормальным) предельное содержание вредных веществ устанавливается санитарными нормами с ГН 2.2.5.3532.18. В частности, предельно допустимое содержание в воздухе токсичной (силикозоопасной) пыли составляет 1 мг/м^3 , а при работе в условиях менее силикозоопасной пыли в атмосфере (содержание свободного кремнезема колеблется в пределах от 10 до 70%) предельно допустимая концентрация не должна превышать 2 мг/м^3 .

При пониженном барометрическом давлении (в высокогорных условиях) плотность воздуха падает пропорционально уровню атмосферного давления, определяемого формулой:

$$\rho = \rho_0 \cdot \frac{p}{p_0} \cdot \frac{T_0}{T}, \text{ кг/м}^3 \quad (8)$$

p – барометрическое давление на местности, мм. рт. ст.;

p_0 – нормальное барометрическое давление, $p_0 = 760$ мм. рт. ст.;

T_0 – абсолютная температура в градусах Кельвина 273^0 К;

T – температура воздуха на местности, $T = T_0 + t$, где t – температура в градусах Цельсия.

Таким образом, при одинаковых запыленностях в единице объема атмосферного воздуха j :

$$k_{\hat{a}} = \frac{p}{p_0}, \quad (9)$$

где p и p_0 – то же, что и в предыдущей формуле.

Таким образом, изменение ПДК в высокогорных условиях происходит по формуле:

$$g_{i.\hat{a}} = g_0 \cdot k_{\hat{a}} \quad (10)$$

где: g_0 – ПДК загрязняющего вещества в соответствии с ГН 2.2.5.3532.18, мг/м^3 (для условий ТВМК и Садонского СЦК $g_0 = 2 \text{ мг/м}^3$);

$g_{o.\hat{a}}$ – ПДК загрязняющего вещества в высокогорных условиях, мг/м^3 ;

$k_{\hat{a}}$ – коэффициент высокогорья [Алборов, 1986; Алборов, Хадзарагов, 1978] или поправочный коэффициент, характеризующий уровень разреженности атмосферы местности, определяющийся по таблице 2.

Таблица 2 / Table 2

Значение поправочного коэффициента давления /

Value of the pressure correction coefficient

1	2	3	4	5	6	7	8	9
Барометрическое давление, мм рт. ст. / Barometric pressure, millimeter mercury column	700	660	620	580	540	500	460	420
Коэффициент, $K_{\hat{a}}$ / Coefficient, $K_{\hat{a}}$	0,92	0,86	0,81	0,76	0,71	0,66	0,6	0,55

Графически эта картина показана на рисунке 1.

Выводы

Устойчивость вентиляции рудников при многоштольневом вскрытии месторождений зависит от ветрового напора на устье штольни, величина которого определяется косинусом угла между вектором скорости движения воздуха и осью вскрывающей штольни.

Потребность организмом человека атмосферного кислорода с повышением геодезической высоты над уровнем моря компенсируется повышением частоты дыхания соразмерного коэффициенту высокогорья.

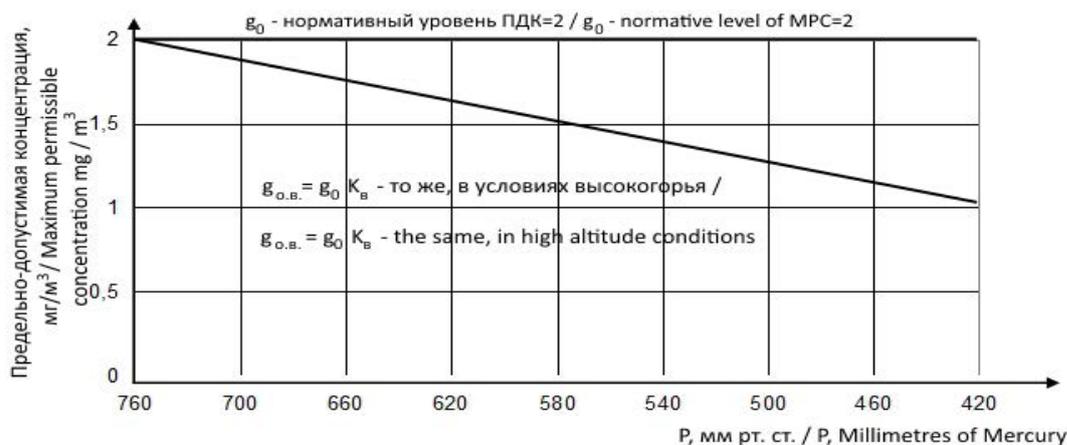


Рис. 1. Изменение ПДК пыли в воздухе рабочей зоны в условиях пониженного барометрического давления (высокогорные условия) /
 Fig. 1. Variation of dust MPC in the air of the workspace under the conditions of low barometric pressure (high-altitude conditions)

Учащенное дыхание человека в условиях пониженного барометрического давления приводит к снижению резистентности организма, и, следовательно, к снижению его работоспособности.

Создаваемый в штольнях напор за счет скорости ветра на поверхности зависит от угла между вектором ветрового потока и осью вскрывающей горной выработки.

Величина барометрического коэффициента пропорционально геодезической высоте расположения штольни от уровня моря и температуры наружного воздуха.

Нормируемая концентрация пыли в атмосферном воздухе зависит от барометрического давления атмосферы и находится в прямой зависимости от геодезической высоты над уровнем моря.

Учреждениям санитарно-эпидемиологического надзора России рекомендовать внести коррективы при нормировании вредных веществ в рабочей среде и в селитебных зонах с учетом фактора барометрического давления.

Литература

1. Алборов И. Д. Влияние естественной тяги на надежность проветривания рудника «Молибден». // Колыма. – 1986. – № 5. – С. 11-13.
2. Алборов И. Д., Хадзарагов А. П. К вопросу о пылевой нагрузке на легкие человека в условиях высокогорья. // Колыма. – 1978. – № 1. – С. 12-15.
3. Алексеенко В. А. Эколого-геохимический анализ регионального распределения тяжелых металлов в различных ярусах ландшафтов Северного Кавказа. / В. А. Алексеенко, В. В. Дьяченко, А. И. Нарезный, А. В. Суворинов. // Экологическая геофизика и геохимия: труды международной конференции. – Дубна, 1998. – С. 23-29.
4. Архангельский, В. И. Гигиена и экология человека: Учебник. / В. И. Архангельский, В. Ф. Кириллов. – М.: ГЭОТАР-Медиа, 2017. – 176 с.
5. Воропаев А. Ф. Тепловая депрессия шахтной вентиляции. – Л.: Изд. АН СССР, 1950. – 565 с.
6. Воропаев А. Ф. Теория теплообмена рудничного воздуха и горных пород в глубоких шахтах. – М.: Недра, 1966. – 250 с.
7. Гончаренко С. Н., Коростелев Д. Б. Системный анализ и прогноз показателей и индикаторов эффективной деятельности в сфере охраны окружающей среды и природопользования. // ГИАБ. – 2018. – № 9. – С. 104-110.

8. Закон Республики Северная Осетия-Алания от 30.12.1998 N 30-РЗ «О горных территориях в Республике Северная Осетия-Алания».
9. Иванов А. В., Стриженко А. В., Супрун И. К. Вопросы оценки эффективности внедряемых пылезащитных экранов на этапе проектирования. // *Геология и геофизика Юга России*. – 2020. – Т. 10. №3. – С. 139-151. DOI: 10.46698/VNC.2020.37.81.009
10. Израэль Ю. А. Экология и контроль состояния природной среды. – М.: Гидрометеоздат, 1984. – 560 с.
11. Калугов Д. Р., Юков В. А. О принципах перехода горнорудных предприятий к устойчивому экологическому сбалансированному развитию. // *ГИАБ*. – 2020. – №3. – С. 74-86.
12. Колесов Е. В. Разработка методики расчета количества воздуха, требуемого для проветривания тупиковых проходческих выработок после взрывных работ. // *Горный журнал*. – 2019. – №3. – С. 80-84.
13. Комаров В. Б., Килькеев Ш. Х. Рудничная вентиляция. – М.: Metallurgizdat, 1969. – С. 8.
14. Крымская, И. Г. Гигиена и экология человека: Учебное пособие. / И. Г. Крымская. – Рн/Д: Феникс, 2017. – 351 с.
15. Медведев Б. И., Гушин А. М., Лобов В. Л. Естественная тяга глубоких шахт. – М.: Недра, 1985. – 77 с.
16. Романченко С. Б. Управление аэропылединамическими процессами при подземной угледобыче. // *Горный журнал*. – 2014. – №5. – С. 298-333.
17. Черкашин В. И., Газалиев И. М. Перспективы освоения рудных месторождений Дагестана (экологические аспекты). // *Геология и геофизика Юга России*. – 2016. – №1. – С. 132-140.
18. Экология. / Под ред. проф. В. В. Денисова. – Рн/Д.: ИКЦ «MapT», 2016. – 768 с.
19. Bernardo P. M., da Gama C. D. A methodology for design and simulation of mine ventilation networks. // *Proceedings of the 6th international mine ventilation congress. 6th International Mine Ventilation Congress (IMVC), Pittsburgh, Pa, May 17-22 1997.*
20. Carriere R., McGuire C., McLaren E., Witow D. Studying operational improvements in blast gas clearing using ventilation control. // *Proceedings of the 16th North American Mine Ventilation Symposium*. – 2017. – pp. 19.7-19.16.
21. Castilla-Gomez J., Herrera-Herbert J., Campillos-Prieto A. Sgem Modelling and optimization of a ventilation network in underground mines. *International Multidisciplinary Scientific GeoConference-SGEM. // Science and technologies in geology, exploration and mining, sgem 2015, vol iii. 15th International Multidisciplinary Scientific Geoconference (SGEM), Albena, Bulgaria, 2015, Jun 18-24.*
22. Dziurzynski W., Krach A., Palka T. A reliable method of completing and compensating the results of measurements of flow parameters in a network of headings. // *Archives of Mining Sciences*. – 2015. – Vol. 60 (1). – pp. 3-24. <https://doi.org/10.1515/amsc-2015-0001>
23. Dziurzynski W., Krach A., Palka T. Airflow Sensitivity Assessment Based on Underground Mine Ventilation Systems Modeling. // *Energies*. – 2017. – Vol. 10 (10). Article 1451. <https://doi.org/10.3390/en10101451>
24. Gangrade V., Schatzel S. J., Harteis S. P., Addis, J. D. Investigating the Impact of Caving on Longwall Mine Ventilation Using Scaled Physical Modeling. // *Mining Metallurgy & Exploration*. – 2019. – Vol. 36 (4). – pp. 729-740. <https://doi.org/10.1007/s42461-019-0065-7>
25. Jha A. K. Ventilation Network Analysis. In *Selection of Main Mechanical Ventilators for Underground Coal Mines: a Case Study*. – 2017. – pp. 7-15. https://doi.org/10.1007/978-3-319-56859-1_2
26. Kobylkin S. S., Kharisov A. R. Design features of coal mines ventilation using a room-and-pillar development system. // *Journal of Mining Institute*. – 2020. – Vol. 245. – pp. 531-538. <https://doi.org/10.31897/pmi.2020.5.4>
27. Krach A. Node method for solving the mine ventilation networks. // *Archives of Mining Sciences*. – 2011. – Vol. 56 (4). – pp. 601-620.

28. Li B. R., Masahiro I., Shen S. B. Mine Ventilation Network Optimization Based on Airflow Asymptotic Calculation Method. // *Journal of Mining Science*. – 2018. – Vol. 54 (1). – pp. 99-110. <https://doi.org/10.1134/s1062739118013413>
29. Liu H., Mao S.J., Li M., Lyu P.Y. A GIS Based Unsteady Network Model and System Applications for Intelligent Mine Ventilation. // *Discrete Dynamics in Nature and Society*. – 2020. – Article 1041927. <https://doi.org/10.1155/2020/1041927>
30. Maleki S., Sotoudeh F., Sereshki F. Application of VENTSIM 3D and mathematical programming to optimize underground mine ventilation network: A case study. // *Journal of Mining and Environment*. – 2018. – Vol. 9 (3). – pp. 741-752. <https://doi.org/10.22044/jme.2018.6793.1503>
31. Morar M.S., Radu S.M., Cioclea D., Gherghe I. Use of IT equipment and specialized programs for solving ventilation networks. // *Quality-Access to Success*. – 2017. – Vol. 18. – pp. 121-126.
32. Nyaaba W., Frimpong S., El-Nagdy K.A. Optimisation of mine ventilation networks using the Lagrangian algorithm for equality constraints. // *International Journal of Mining Reclamation and Environment*. – 2015. – Vol. 29 (3). – pp. 201-212. <https://doi.org/10.1080/17480930.2014.942449>
33. Rezaei Z., Ataee-pour M., Madani H. Application of cut set method to reliability evaluation of mine ventilation networks. *Journal of Mining and Environment*. – 2015. – Vol. 10 (4). – pp. 947 – +. <https://doi.org/10.22044/jme.2019.8440.1722>
34. Roghanch P., Kocsis K.C. Improving the climatic conditions in development and production workings of hot underground mines by redesigning the auxiliary ventilation system: a case study. // *International Journal of Mining and Mineral Engineering*. – 2017. – Vol. 8. No. 4. – pp. 280-293.
35. Sarac S., Sensogut C. A combined method for the analysis of mine ventilation networks. // *Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy*. – 2000. – Vol. 100 (6). – pp. 371-373.
36. Suvar M., Cioclea D., Gherghe I., Pasculescu V.M. Advanced software for mine ventilation networks solving. // *Environmental Engineering and Management Journal*. – 2012. – Vol. 11 (7). – pp. 1235-1239. <https://doi.org/10.30638/eemj.2012.149>
37. Suvar M.C., Arad V., Lupu C., Cioclea D., Ghicioi E., Vlasin N.I., Sgem. (2013, Jun 16-22). Prospective virtual simulation of ventilation networks. // *International Multidisciplinary Scientific GeoConference-SGEM [Geoconference on science and technologies in geology, exploration and mining, sgem 2013, vol i]. 13th International Multidisciplinary Scientific Geoconference, SGEM 2013, Albena, BULGARIA*.
38. Svalova V.B., Zaalishvili V.B., Ganapathy G. P., Nikolaev A. V., Ginzburg A. A. Complex Environmental Monitoring in Russia and India. // *Geology of the South of Russia*. – 2019. – Vol. 9. No. 4. – pp. 87-101.
39. Tariq F., Bekir G. Evaluation of line brattice length in an empty heading to improve air flow rate at the face using CFD. // *International Journal of Mining Science and Technology*. – 2017. – Vol. 27. No. 2. – pp. 253-259.
40. Wu F.I., Luo Y., Chang X.T. Coupling simulation model between mine ventilation network and gob flow field. // *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*. – 2019. – Vol. 119 (10). – pp. 783-792. <https://doi.org/10.17159/2411-9717/102/2019>

References

1. Alborov I. D. Influence of natural draft on the ventilation reliability of the “Molybdenum” mine. *Kolyma*, 1986. No. 5. pp. 11-13. (In Russ.)
2. Alborov I. D., Khadzaragov A. P. On the issue of dust load on human lungs in high altitude conditions. *Kolyma*, 1978. No. 1. pp. 12-15. (In Russ.)
3. Alekseenko V.A. Ecological and geochemical analysis of the regional distribution of heavy metals in various layers of the landscapes in the North Caucasus. In: *Environmental Geophysics*

and Geochemistry: Proceedings of the International Conference. Dubna, 1998. pp. 23-29. (In Russ.)

4. Arkhangel'skii V.I., Kirillov V.F. Hygiene and human ecology: Textbook. Moscow. GEOTAR-Media, 2017. 176 p. (In Russ.)

5. Voropaev A.F. Thermal depression of mine ventilation. Leningrad. Ed. Academy of Sciences of the USSR, 1950. 565 p. (In Russ.)

6. Voropaev A.F. The theory of heat exchange of mine air and rocks in deep mines. Moscow. Nedra, 1966. 250 p. (In Russ.)

7. Goncharenko S.N., Korostelev D.B. System analysis and forecast of measures and indicators of effective activities in the field of environmental protection and nature management. GIAB, 2018. No. 9. pp. 104-110. (In Russ.)

8. Law of the Republic of North Ossetia-Alania from 30.12.1998 N 30-RZ "On mountain territories in the Republic of North Ossetia-Alania". (In Russ.)

9. Ivanov A.V., Strizhenok A.V., Suprun I.K. Issues of evaluating the effectiveness of the introduced dust screens at the design stage. *Geology and Geophysics of Russian South*, 2020. Vol. 10. No. 3. pp. 139-151. DOI: 10.46698/VNC.2020.37.81.009 (In Russ.)

10. Izrael Yu.A. Ecology and control of the state of the natural environment. Moscow. Gidrometeoizdat, 1984. 560 p. (In Russ.)

11. Kalugov D.R., Yukov V.A. On the principles of the transition of mining enterprises to sustainable ecological balanced development. *GIAB*, 2020. No. 3. pp. 74-86. (In Russ.)

12. Kolesov E.V. Development of a methodology for calculating the amount of air required for ventilation of dead-end tunneling workings after blasting operations. *Mining journal*, 2019. No. 3. pp. 80-84. (In Russ.)

13. Komarov V.B., Kilkeev Sh.Kh. Mine ventilation. Moscow. Metallurgizdat, 1969. p. 8. (In Russ.)

14. Krymskaya I.G. Hygiene and human ecology. Textbook. Phenix, 2017. 351 p. (In Russ.)

15. Medvedev B.I., Gushchin A.M., Lobov V.L. Natural draft of deep mines. Moscow. Nedra, 1985. 77 p. (In Russ.)

16. Romanchenko S.B. Control of aerial-dynamic processes in underground coal mining. *Mining journal*, 2014. No. 5. pp. 298-333. (In Russ.)

17. Cherkashin V.I., Gazaliev I.M. Prospects for the development of ore deposits in Dagestan (environmental aspects). *Geology and Geophysics of Russian South*, 2016. No. 1. pp. 132-140. (In Russ.)

18. Ecology. Ed. prof. V.V. Denisov. Rn/D. IKC "MarT", 2016. 768 p. (In Russ.)

19. Bernardo, P. M., & daGama, C.D. A methodology for design and simulation of mine ventilation networks. Proceedings of the 6th international mine ventilation congress. 6th International Mine Ventilation Congress (IMVC), Pittsburgh, Pa, May 17-22 1997.

20. Carriere R., McGuire C., McLaren E., Witow D. Studying operational improvements in blast gas clearing using ventilation control. In: Proceedings of the 16th North American Mine Ventilation Symposium, 2017. pp. 19.7-19.16.

21. Castilla-Gomez J., Herrera-Herbert J., Campillos-Prieto A. Sgem Modelling and optimization of a ventilation network in underground mines. International Multidisciplinary Scientific GeoConference-SGEM. Science and technologies in geology, exploration and mining, sgem 2015, vol iii. 15th International Multidisciplinary Scientific Geoconference (SGEM), Albena, Bulgaria, 2015, Jun 18-24.

22. Dziurzynski W., Krach A., Palka T. A reliable method of completing and compensating the results of measurements of flow parameters in a network of headings. *Archives of Mining Sciences*, 2015. Vol. 60 (1). pp. 3-24. <https://doi.org/10.1515/amsc-2015-0001>

23. Dziurzynski W., Krach A., Palka T. Airflow Sensitivity Assessment Based on Underground Mine Ventilation Systems Modeling. *Energies*, 2017. Vol. 10 (10). Article 1451. <https://doi.org/10.3390/en10101451>

24. Gangrade V., Schatzel S.J., Harteis S.P., Addis, J.D. Investigating the Impact of Caving on Longwall Mine Ventilation Using Scaled Physical Modeling. *Mining Metallurgy & Exploration*, 2019. Vol. 36 (4). pp. 729-740. <https://doi.org/10.1007/s42461-019-0065-7>

25. Jha A.K. Ventilation Network Analysis. In Selection of Main Mechanical Ventilators for Underground Coal Mines: a Case Study, 2017. pp. 7-15. https://doi.org/10.1007/978-3-319-56859-1_2
26. Kobylkin S.S., Kharisov A.R. Design features of coal mines ventilation using a room-and-pillar development system. Journal of Mining Institute, 2020. Vol. 245. pp. 531-538. <https://doi.org/10.31897/pmi.2020.5.4>
27. Krach A. Node method for solving the mine ventilation networks. Archives of Mining Sciences, 2011. Vol. 56 (4). pp. 601-620.
28. Li B.R., Masahiro I., Shen S.B. Mine Ventilation Network Optimization Based on Airflow Asymptotic Calculation Method. Journal of Mining Science, 2018. Vol. 54 (1). pp. 99-110. <https://doi.org/10.1134/s1062739118013413>
29. Liu H., Mao S.J., Li M., Lyu P.Y. A GIS Based Unsteady Network Model and System Applications for Intelligent Mine Ventilation. Discrete Dynamics in Nature and Society. 2020. Article 1041927. <https://doi.org/10.1155/2020/1041927>
30. Maleki S., Sotoudeh F., Sereshki F. Application of VENTSIM 3D and mathematical programming to optimize underground mine ventilation network: A case study. Journal of Mining and Environment. 2018. Vol. 9 (3). pp. 741-752. <https://doi.org/10.22044/jme.2018.6793.1503>
31. Morar M.S., Radu S.M., Cioclea D., Gherghe I. Use of IT equipment and specialized programs for solving ventilation networks. Quality-Access to Success. 2017. Vol. 18. pp. 121-126.
32. Nyaaba W., Frimpong S., El-Nagdy K.A. Optimisation of mine ventilation networks using the Lagrangian algorithm for equality constraints. International Journal of Mining Reclamation and Environment. 2015. Vol. 29 (3). pp. 201-212. <https://doi.org/10.1080/17480930.2014.942449>
33. Rezaei Z., Ataee-pour M., Madani H. Application of cut set method to reliability evaluation of mine ventilation networks. Journal of Mining and Environment, 2015. Vol. 10 (4). pp. 947-+. <https://doi.org/10.22044/jme.2019.8440.1722>
34. Roghanch P., Kocsis K.C. Improving the climatic conditions in development and production workings of hot underground mines by redesigning the auxiliary ventilation system: a case study. International Journal of Mining and Mineral Engineering, 2017. Vol. 8. No. 4. pp. 280-293.
35. Sarac S., Sensogut C. A combined method for the analysis of mine ventilation networks. Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy, 2000. Vol. 100 (6). pp. 371-373.
36. Suvar M., Cioclea D., Gherghe I., Pasculescu V.M. Advanced software for mine ventilation networks solving. Environmental Engineering and Management Journal, 2012. Vol. 11 (7). pp. 1235-1239. <https://doi.org/10.30638/eemj.2012.149>
37. Suvar M.C., Arad V., Lupu C., Cioclea D., Ghicioi E., Vlasin N.I., Sgem. (2013, Jun 16-22). Prospective virtual simulation of ventilation networks. International Multidisciplinary Scientific GeoConference-SGEM [Geoconference on science and technologies in geology, exploration and mining, sgem 2013, vol i]. 13th International Multidisciplinary Scientific Geoconference, SGEM 2013, Albena, BULGARIA.
38. Svalova V.B., Zaalishvili V.B., Ganapathy G.P., Nikolaev A.V., Ginzburg A.A. Complex Environmental Monitoring in Russia and India. Geology of the South of Russia, 2019. Vol. 9. No. 4. pp. 87-101.
39. Tariq F., Bekir G. Evaluation of line brattice length in an empty heading to improve air flow rate at the face using CFD. International Journal of Mining Science and Technology, 2017. Vol. 27. No. 2. pp. 253-259.
40. Wu F.I., Luo Y., Chang X.T. Coupling simulation model between mine ventilation network and gob flow field. Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy, 2019. Vol. 119 (10). pp. 783-792. <https://doi.org/10.17159/2411-9717/102/2019>