

АНАЛИЗ ФАКТОРОВ ПОТЕРИ УСТОЙЧИВОСТИ КРЕПИ ВЕРТИКАЛЬНОГО СТВОЛА ПРИ ДЛИТЕЛЬНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ В УСЛОВИЯХ КРАЙНЕГО СЕВЕРА

Д. А. Котиков¹, А. В. Веселова¹, Е. Л. Романова¹, П. А. Деменков¹

¹ Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия

Аннотация: Научная статья направлена на изучение процессов, приводящих к потере устойчивости и разрушению крепи при длительной эксплуатации вертикального ствола в условиях Арктического региона. Знание основных факторов, приводящих к деградации материала крепи стволов, позволит разрабатывать более эффективные методы и технологии для поддержания их устойчивости на протяжении длительного периода эксплуатации. Важными аспектами исследования являются изучение влияния различных факторов среды на физико-механические свойства материалов, использованных для возведения крепи стволов, а также анализ поведения геологических слоев в условиях Крайнего Севера. Проект включает оценку влияния технологических процессов и условий эксплуатации на безопасность функционирования стволов. Основная цель данного исследования заключается в анализе причин потери устойчивости и разрушения крепи вертикального ствола. Разработаны рекомендации по улучшению устойчивости вертикальных стволов, что способствует эффективному развитию в регионе Крайнего Севера ресурсодобывающей отрасли. Исследование включает в себя изучение климатических и гидрогеологических факторов, условий криолитозоны, воздействия процессов замораживания, исторических аспектов строительства объекта, воздействия взрывных работ. Кроме изучения архивных документов, статистической информации, проводились натурные измерения, фотодокументирование и исследования материала сооружения. Результаты исследования могут быть использованы в горнодобывающей отрасли, особенно в контексте разработки месторождений и проектирования подземных сооружений в экстремальных климатических условиях.

Ключевые слова: Крепь горных выработок, устойчивость стволов, разрушение крепи, Арктический регион, физико-механические свойства материалов, криолитозона, геомеханика, горное давление, вывалы.

Для цитирования: Котиков Д. А., Веселова А. В., Романова Е. Л., Деменков П. А. Анализ факторов потери устойчивости крепи вертикального ствола при длительной эксплуатации в условиях Крайнего Севера // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2024. – № 11-1. – С. 57–80. DOI: 10.25018/0236_1493_2024_111_0_57.

Analysis of the factors of loss of stability of vertical shaft lining during long-term operation in the Far North

D. A. Kotikov¹, A. V. Veselova¹, E. L. Romanova¹, P. A. Demenkov¹

¹ Empress Catherine II Saint-Petersburg Mining University, Russia

Abstract: The scientific article is aimed at studying the processes that lead to the loss of stability and support damage during long-term operation of a vertical shaft in the Arctic region. The knowledge of the main factors leading to the degradation of shaft lining material will allow to develop more effective methods and technologies to maintain their stability over a long period of operation. Important aspects of the research are the study of various environmental factors on the physical and mechanical properties of materials used for shaft lining, as well as the analysis of the behavior of geological layers in the Far North. The project includes an assessment of the impact of technological processes and operating conditions on the safety of shafts. The main objective of this study is to analyze the causes of loss of stability and failure of vertical shaft lining. Recommendations for improving the stability of vertical shafts are developed, which contributes to the effective development of the Far North regions, primarily in the resource extraction industry. The research includes the study of climatic factors, hydrogeological factors, cryolithozone conditions, the impact of freezing processes, historical aspects of site construction, and the impact of blasting. In addition to the study of archival documents, statistical information, field measurements, photo-documentation and studies of the construction material were carried out. The results of the study can be used in the mining industry, especially in the context of field development and design of underground structures in extreme climatic conditions.

Key words: Mine support, shaft stability, support damage, Arctic region, physical and mechanical properties of materials, cryolithozone, geomechanics, rock pressure, rock falls.

For citation: Kotikov D. A., Veselova A. V., Romanova E. L., Demenkov P. A. Analysis of the factors of loss of stability of vertical shaft lining during long-term operation in the Far North. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2024;(11–1):57–80. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2024_111_0_57.

Введение

Вертикальные стволы играют ключевую роль в деятельности шахт, рудников и иных объектов подземного пространства, предназначенных для подъема и спуска грузов, оборудования, материалов, а также для обеспечения вентиляции. Прекращение работы вертикальных стволов из-за возникновения опасности или аварийной ситуации приводит к нарушению функционирования всего объекта. Это оказывает отрицательное влияние на производственные процессы и показатели предприятия, создает прямую угрозу безопасности людей [1], а также влечет за собой снижение эффективности и повышение рисков для работников, что отрицательно сказывается на экономическом положении предприятия в целом [2].

Целью данного исследования являлось выявление основных факторов, приводящих к потере работоспособ-

ности несущих конструкций подземных сооружений в условиях Крайнего Севера при долговременной эксплуатации. Анализ факторов, включающий климатические особенности, физические и геологические условия [3], технологические процессы [4, 5] и материаловедческие аспекты [6, 7], позволил определить причины разрушения материалов крепи ствола и разработать рекомендации и решения по повышению устойчивости вертикальных стволов в условиях экстремальных климатических условий [8, 9].

Обеспечение устойчивости горных выработок остается важной задачей, независимо от условий их строительства и эксплуатации [10–12]. Возможность применения разнообразных типов крепи (анкерной [13], тубинговой [14], бетонной [15] и др.) обусловлена сложными горно-геологическими условиями строительства вертикального ствола вследствие пере-

сечения большого количество геологических слоев горных пород [16]. Однако избыточное количество различных видов крепи на протяжении одной горной выработки является малоэффективным и нерациональным. Это ведет к усложнению проектирования [17], организации технологических процессов при строительстве, сложностям эксплуатации и увеличению затрат при дальнейшем обслуживании сооружения.

Таким образом, чаще всего основная часть вертикальных стволов закреплена единым видом крепи, прочность и несущая способность которой определяется расчетами.

Эксплуатация сооружений в условиях пониженных температур и многолетнемерзлых пород налагает дополнительные требования к характеристикам материала крепей [18–20]. Совокупность таких негативных факторов, как пониженные и сверхнизкие температуры; кондиционирование, подогрев воздуха в зимние и летние периоды соответственно [21–23]; промерзание и обледенение крепи [24–26] в процессе эксплуатации и при реверсе воздушной струи, дополнительно наносит разрушающее воздействие на материал крепей. Вышеперечисленные условия необходимо учитывать при выборе крепи вертикальных стволов и расчете ее параметров.

При потере несущей способности крепи или ее разрушении необходимо учитывать все особенности строительства и эксплуатации вертикальных стволов [27–29].

Краткая характеристика горно-геологических условий

Месторождение, вскрытое вертикальным стволом, согласно СП 131.13330.2020. «СНиП 23–01–99* Строительная климатология», отно-

сится к подгруппе IV с прерывистым распространением мерзлой зоны (площадь больше 75%).

Сейсмическая активность региона характеризуется как низкая.

Температура многолетнемерзлых пород варьируется в пределах от $-0,4$ до $-1,6$ °С. Прерывистость мерзлой зоны обеспечивает инфильтрацию атмосферных осадков и поверхностных вод, за счет чего происходит питание водоносных горизонтов. Ниже отметки $-100...-150$ м породы в ненарушенных эксплуатацией условиях не водоносны, в отдельных случаях на объекте отмечаются водопроявления по единичным водопроводящим трещинам. За период строительства и эксплуатации проводилась цементация обводненных песчаников и двух водоносных горизонтов.

Породы, залегающие по трассе ствола, представлены четвертичными и пермскими отложениями. Пермские отложения в интервале глубин $90-990$ м представляют собой типичную угленосную формацию, сложенную аргиллитами, алевролитами, песчаниками и некоторыми смешанными видами пород.

Сравнительный анализ изменчивости четвертичных отложений (суглинков) за 34 года эксплуатации вертикального ствола показал, что грунты на данном участке находятся в талом состоянии. Граница мерзлых грунтов переместилась с отметки $-60,7$ м до -45 м. Модуль деформации грунтов (суглинков) при растеплении существенно изменился — по усредненному значению уменьшился в 27 раз. Такое изменение состояния пород (с мерзлого на талое) значительно снижает прочностные свойства горных пород и предъявляет повышенные требования к несущей способности крепи. Возрастает гидростатическое и боковое давление на крепь ствола.

Анализ научных публикаций [30, 31] позволил установить, что при эксплуатации горных выработок в условиях Севера для обеспечения устойчивости окружающих пород наиболее благоприятным является сохранение породного массива вокруг выработки в многолетнемерзлом естественном состоянии. Лед, как компонент сложной системы, способствует выравниванию неравномерных нагрузок со стороны минерального скелета горных пород и создает условия монотонного формирования напряженного состояния в породном массиве вокруг вертикального ствола [32]. Повышенные радиальные напряжения в массиве связаны с наличием талых пород в приконтурной части и геологических нарушений.

Краткая характеристика горнотехнических условий

Исследуемый вертикальный ствол предназначен для спуска-подъема людей, материалов, оборудования, длинномера и негабарита подъемными установками, а также подачи свежей вентиляционной струи. Вид подъема — грузолюдской и грузовой. Диаметр ствола в свету — 7,5 м, в проходке — 8,5 м, глубина ствола 1000 м. Крепь ствола — монолитная бетонная, толщиной 500 мм, проектная марка М200. На отдельных участках предусмотрена железобетонная крепь. В связи с длительным сроком эксплуатации ствола и значительными местными разрушениями конструкций монолитной бетонной крепи производились отдельные ремонты крепи при помощи набрызг-бетона. В стволе применен жесткий тип армировки с шагом расстрелов 4 м (251 ярус расстрелов). По проекту армировка и крепь эксплуатируются в условиях постоянной положительной температуры выше +5 °С.

Проходка ствола осуществлялась в 80-е гг. буровзрывным способом. Работы велись в отложениях различной трещиноватости и сопровождались водогазовыми выделениями. Мощность наносов при проведении ствола составила порядка 90 м. Сопряжения с горизонтами проходят на отметке -320 м, -780 м. Безопасность вертикального ствола при отработке месторождения, помимо крепления, обеспечивается также охранным целиком. Влияние других горных выработок и очистных работ минимально.

Предположения о возможном влиянии взрывных работ на конструкции крепи ствола не подтвердились. Современные исследования позволили полностью исключить влияние комплекса буровзрывных работ, проводимых в процессе эксплуатации ствола [30].

Методы

Работы по обследованию состояния крепи вертикального ствола включали осмотр ствола, обследование элементов крепи и техническую диагностику крепи.

Анализ фактических условий воздействия на конструкции включал рассмотрение возможности влияния горных работ на устойчивость массива вблизи ствола; степень агрессивности вод, попадающих в ствол, по отношению к металлу армировки и бетону крепи ствола; влияние сейсмичности массива и напряженно-деформированного состояния (далее НДС).

Проверка состояния конструкций:

а) первичный осмотр ствола: общий осмотр, определение мест основных дефектов;

б) обследование элементов крепи: обследование технического состояния крепи на всем протяжении вертикального ствола методами визуального и инструментального измерительного контроля; выявление и фотофиксация

имеющихся нарушений; составление ведомости дефектов и их классификация; установление вероятных причин повреждений. Ввиду отсутствия данных и возможности обследования опорных венцов крепи ствола в состав работ по обследованию опорные венцы не были включены;

в) техническая диагностика крепи: диагностика неразрушающими методами контроля (визуальными, инструментальными) состояния бетонной крепи. Определяемые показатели и методы определения — прочность бетона крепи с использованием базовых зависимостей, а в дальнейшем с учетом комплексных методов [33];

г) анализ среды эксплуатации: рассмотрение результатов химического анализа воды на предмет оценки химической агрессивности в отношении материалов конструкций.

Визуальное обследования состояния конструкций крепи ствола.

Обследование крепи вертикального ствола осуществлялось с крыши грузюлюдских клетей, с них выполнялась фотофиксация всех обнаруженных нарушений.

При обследовании была принята условная система координат, по которой за юг было принято направление, где находится клеть инспекторского подъема (рис. 1).

Для классификации обнаруженных дефектов и повреждений была предложена балльная оценка размера и типа повреждений:

– 1 — единичные эрозии, отдельные небольшие (неглубокие) вывалы/выколы, протечки, некачественно забетонированные швы на стыках заходок бетонной крепи, небольшие трещины, искусственно выполненные при строительстве ствола технологические штробы, участки некачественных ремонтных работ;

– 3 — протяженные горизонтальные/вертикальные трещины и зоны эрозии, зоны эрозии по серии горизонтальных или под небольшим наклоном трещин, зоны расслоения бетона крепи в виде серий параллельных горизонтальных полос (борозд) на поверхности бетона, большие по площади/глубине вывалы/выколы;

– 5 — диаметральное разрушение бетонной крепи, захватывающее более 2/3 сечения ствола.

Анализ данных натурных наблюдений за деформированием крепи вертикального ствола.

Для оценки деформаций крепи в верхней части ствола была выполнена тахеометрическая съемка в горизонтальном сечении через каждые 25 м до отм. -325 м. Съемка производилась определением расстояний по радиально-лучевой схеме по 18 точкам. Местоположение установки тахеометра, а также шаг съемки определялся возможностью съемки в условиях исследуемого ствола. Результаты хорошо согласуются с исследованием [34].

Инструментальное обследование линейной части крепи ствола и сопряжений с горизонтальными выработками.

Прочность бетона при обследовании ствола определялась на участках крепи, не имеющих видимых повреждений в виде отслоений, трещин, каверн и т.п. Испытания проводились при положительной температуре крепи.

Для определения прочности бетона использовался метод упругого отскока — механического воздействия на поверхность крепления исследуемого шахтного ствола в соответствии с требованиями к участкам испытаний. Испытания проводились в соответствии с требованиями ГОСТ 22690–2015 «Бетоны. Определение

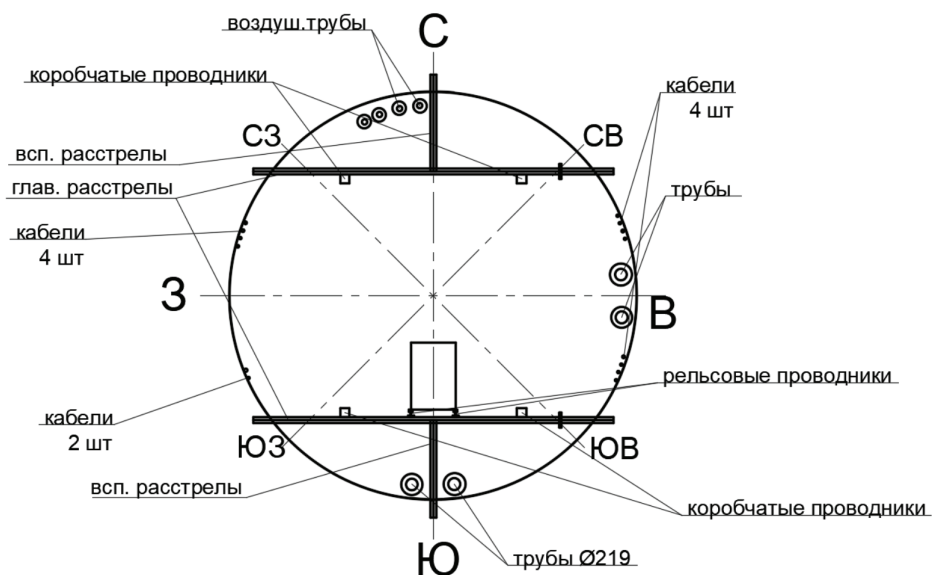


Рис. 1. Схема расположения коммуникаций и элементов армировки в сечении ствола. Ориентация условной системы координат [составлено авторами]
 Fig. 1. Layout of communications and reinforcement elements in the cross-section of the shaft. Orientation of the conditional coordinate system

прочности механическими методами неразрушающего контроля».

Места измерений на поверхности выбирались без попадания в арматуру, а также без участков видимых нарушений. Количество и расположение контролируемых участков при испытании конструкций соответствовали ГОСТ 18105–2018.

Измерения выполнялись в западной части ствола — через каждые 50 метров, в восточной части ствола — через каждые 25 метров. На каждом участке принималось не менее 10 измерений. По возможности также проводились измерения в рамках одной заходки бетонирования в разных частях по высоте. Всего было выполнено более 600 измерений.

Вероятные значения прочности бетона были определены по установленной градуированной зависимости между прочностью бетонных образцов и значением отскока от поверхности

бетона прижатого к ней ударника (косвенной характеристикой прочности) согласно ГОСТ 18105–2018. Классы прочности принимались в соответствии с ГОСТ 26633–2015. При расчете средней величины были исключены чрезмерно высокие и чрезмерно низкие значения (максимальные и минимальные значения).

Оценка технического состояния крепи сопряжений ствола с горизонтальными выработками (на расстоянии 15 м от оси ствола) проводилась в отметках –320 м и –780 м, на которых организованы околоствольные двory.

Прочность бетона при обследовании сопряжений ствола с горизонтальными выработками определялась на участках крепи, не имеющих видимых повреждений в виде отслоений, трещин, каверн и т.п. На отметке –320 м произведено измерение склерометром в четырех точках — А, Б, С, Д, схема показана на рис. 2, а. На отметке –780 м

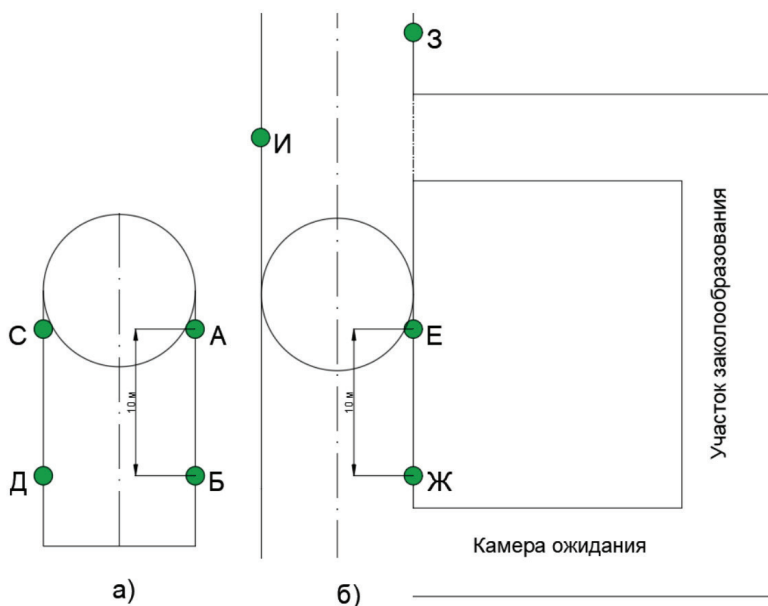


Рис. 2. Точки проведения склерометрических измерений: а — отм. -320 м, б — отм. -780 м [составлено авторами]

Fig. 2. Points of sclerometric measurements: a -320 m, b -780 m

также произведено измерение в четырех точках — Е, Ж, З, И, схема показана на рис. 2, б.

В зумпфовой части склерометрические измерения произведены в южной и северной частях над зеркалом воды.

Оценка температурного режима работы ствола

Растепление многолетнемерзлых пород является одним из факторов, которые способны оказывать воздействие на несущую способность крепи ствола. При увеличении температуры в массиве пород в окрестности ствола ввиду эксплуатационного режима предприятия, а также климатических изменений в регионе, крепь ствола может быть подвержена дополнительному воздействию.

Температурный режим шахтных стволов описывается изменением температуры воздуха в вертикальной выра-

ботке по глубине в разные промежутки времени — от суток до года, а также изменением температуры окружающих крепь ствола горных пород. Тепловое взаимодействие горного массива и крепи ствола с воздухом, пропускаемым через ствол, при наличии разности температур, представляет собой сложный процесс, изменяющийся во времени и зависящий от разных факторов. Температурные изменения в стволах могут быть причинами образования трещин в крепи стволов, нарушения узлов заделки и ухудшения напряженно-деформированного состояния жесткой армировки ствола.

Для оценки возможности растепления многолетнемерзлых пород были обработаны данные метеорологической станции в зоне нахождения ствола по среднемесячной и среднегодовой температурах. Также был выполнен анализ объемов и температуры воздуха,

прогоняемого через вертикальный ствол, для оценки его влияния на окружающий массив.

Расчет фактической несущей способности крепи

На сегодняшний день одной из наиболее актуальных аналитических методик расчета конструкций крепей стволов является методика совместного взаимодействия крепи и массива Н. С. Булычева [35], в которой крепь вертикального ствола рассматривается как многослойное кольцо, состоящее из упругих слоев. В рамках схемы совместного взаимодействия предложено аналитическое решение о формировании нагрузок на крепь горной выработки кругового очертания, расположенной в изотропной линейно-деформируемой среде. Нагрузка передается от внешнего слоя к внутреннему последовательно, а напряжения, возникающие на контакте слоев, учитывают эту нагрузку и коэффициент ее передачи от слоя к слою. Преимуществом методики является ее универсальность, поскольку ее можно применить к крепям из различных материалов.

В данной работе расчет несущей способности крепи был произведен по методике Н. С. Булычева по двум различным условиям: с учетом данных о геологии месторождения на момент строительства ствола и проектной толщины крепи, а также с учетом последних данных о геологии и проектной толщине крепи.

Крепь на протяженной части вертикальной выработки (ствола) круглого сечения рассмотрена как однослойное круговое бетонное кольцо, подкрепляющее отверстие в упругой плоскости (массив). Нагрузки и воздействия, испытываемые системой «крепь–массив», представляются в виде напряжений, прикладываемых к контуру крепи.

Результаты

Результаты анализа фактических условий

По итогам анализ фактических условий строительства и эксплуатации вертикального ствола было определено следующее:

1) горнотехнические факторы несущественно влияют на характер протекания геомеханических процессов вокруг ствола и на состояние крепи в целом;

2) объемы работ, выполненных в стволе за период с 2015 по 2022 г., а также состояние крепи при визуальных наблюдениях свидетельствуют о недостатке времени для проведения работ по ремонту бетонной крепи по сравнению с другими работами, выполненными в этот период;

3) водо-воздушная среда в стволе не агрессивна к бетону при водонепроницаемости бетона W8 и более;

4) значимой сейсмической активности и значимого влияния сейсмических событий на крепь ствола в период 2020–2022 гг. не происходило.

Результаты визуального обследования состояния конструкций крепи ствола.

В результате обследования выявлены и задокументированы дефекты и повреждения крепи вертикального ствола, допущенные в ходе строительства и (или) возникшие в период эксплуатации.

Характерными нарушениями для данного ствола являются трещины, зоны эрозии, вывалы, протечки (рис. 3). Все обнаруженные нарушения были фотодокументированы.

В табл. 1 представлены примеры нарушений, выявленные в результате обследования вертикального ствола, с указанием абсолютной отметки, условного направления (условный север по направлению вспомогательного расстрела) и присвоенной класси-

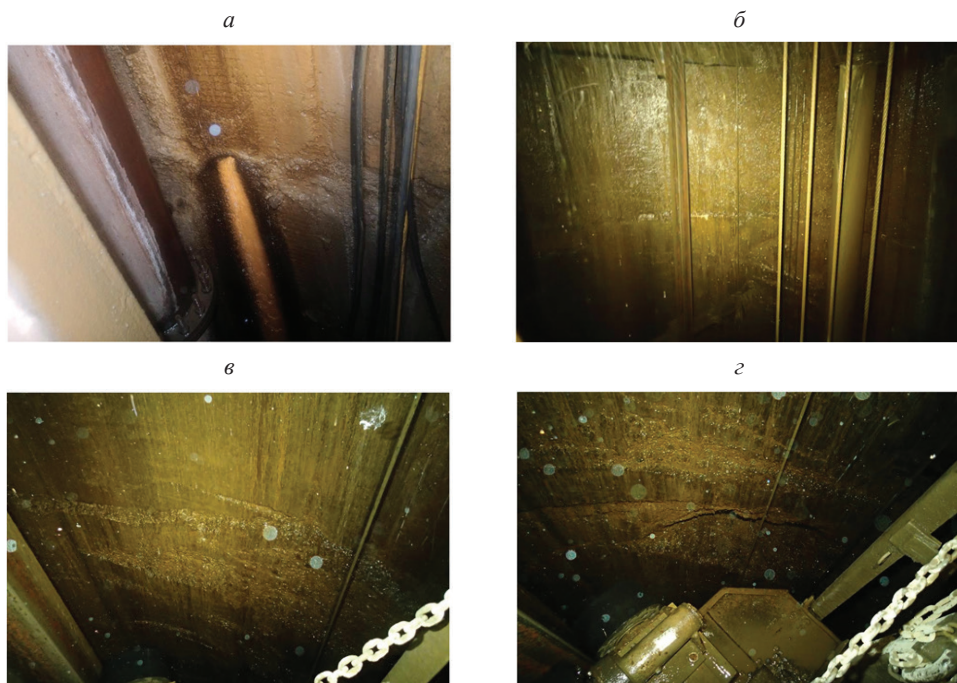


Рис. 3. Примеры нарушения бетонной крепи вертикального ствола: а – протечка, б – трещина, в – эрозия, г – вывал/выкол [составлено авторами]

Fig. 3. Examples of discontinuity of concrete lining of a vertical shaft: a – leakage, b – crack, c – erosion, d – fall/indent

Таблица 1

Дефекты вертикального ствола
Defects of vertical ventilation shaft
[составлено авторами]

№	Отметка глубины ствола, м	Тип нарушения	Классификация	Условное направление
1	-16	Эрозия бетона, следы ремонта	1	ЮЗ
2	-16.5	Протечка воды	1	ВСВ
3	-17	Каверна под узлом соединения расстрелов	1	ЮЮВ
...				
606	-814	Трещины 3 шт.	4	СВ-ЮВ
607	-814.5	Вывалы, вымывание	2	ССВ, ЮВ
608	-815	Эрозия	3	СЗ-ЮЗ
...				
757	-983	Трещина диаметральной	5	Р*

* Р – по всему периметру ствола

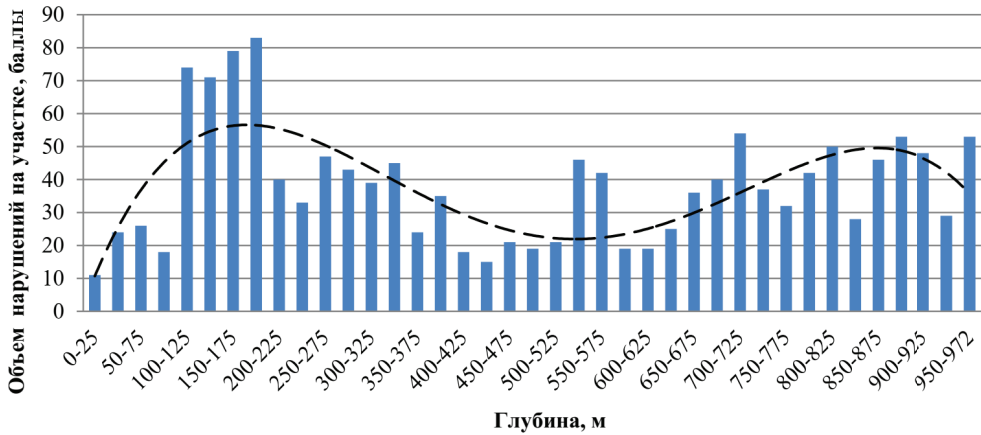


Рис. 4. Интенсивность нарушений по глубине вертикального ствола [составлено авторами]
 Fig. 4. Intensity of disturbances by depth of the vertical shaft

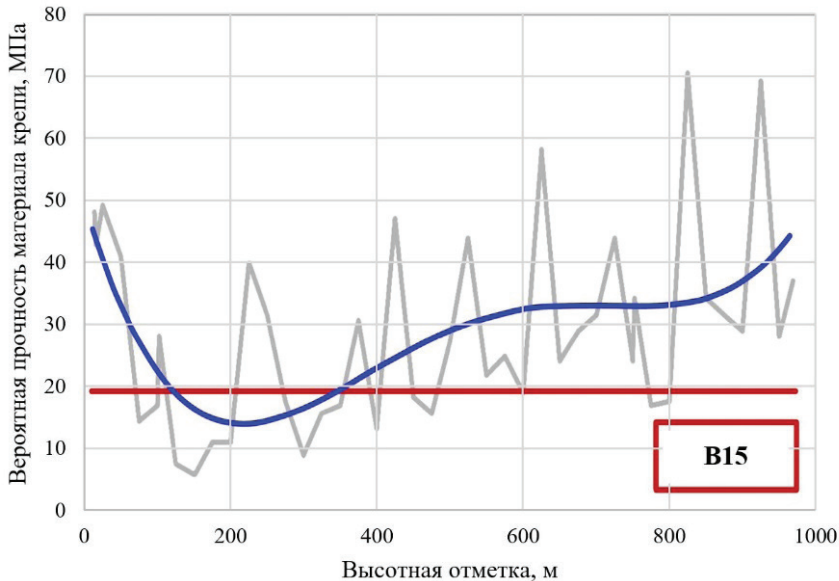


Рис. 5. Распределение вероятных значений прочности бетона склерометрического обследования по относительным отметкам
 Fig. 5. Distribution of probable sclerometric survey concrete strength values by relative grades [составлено авторами]

фикации (баллы 1–5). Баллы присвоено в зависимости от возможной опасности, которую несет то или иное нарушение, где 1 — минимальное значение, а 5 — максимальное.

Для интегральной оценки интенсивности нарушений по глубине и общего состояния ствола был составлен интервальный график суммы баллов по нарушениям в интервалах по 25 метров

Таблица 2

Пример предварительных результатов проведенных измерений
Example of preliminary results of measurements performed
[составлено авторами]

№ измерения	Отметка, м	Показания прибора			Фактическая прочность на одноосное сжатие, МПа	Фактический класс прочности	Зона измерений
		Среднее значение отскока, мм	Разброс, мм	Стандартное отклонение, мм			
1	-16,00	40,00	20,50	6,00	42,97	B30	Ю-ЮЗ
...							
4	-150,00	14,00	8,50	2,60	5,89	B5	Ю-ЮЗ
5	-200,00	19,50	10,50	3,50	11,03	B5	Ю-ЮЗ
6	-250,00	34,00	39,00	15,50	31,59	B20	Ю-ЮЗ
7	-300,00	17,50	16,50	5,30	8,98	B5	Ю-ЮЗ
8	-350,00	24,50	11,50	3,10	16,99	B10	Ю-ЮЗ
9	-400,00	22,50	25,00	6,70	14,46	B10	Ю-ЮЗ
10	-450,00	25,50	12,50	4,10	18,32	B10	Ю-ЮЗ
...							
60	-950,00	49,00	28,50	7,40	63,10	B30	СВ

Таблица 3

Предварительные результаты измерений сопряжений горизонтальных выработок с линейной частью ствола
Preliminary results of measurements of landing of horizontal excavations with the linear part of the shaft
[составлено авторами]

точка	Показания прибора			Прочность на одноосное сжатие, МПа	Класс прочности
	Среднее значение отскока, мм	Разброс, мм	Стандартное отклонение, мм		
А	48,5	33,5	12,7	62,6	B30
Б	39,0	14,0	4,9	40,9	B30
С	42,5	31,5	9	48,2	B30
Д	32,0	20,5	7,0	28,2	B20
Е	29,5	17,5	5,6	24,1	B15
Ж	36,0	17,5	5,7	35,2	B25
З	39,0	21,5	6,5	40,9	B30
И	23	22,5	7,5	15,7	B10
Зумпф (Ю)	47,5	23	7,6	59,4	B30
Зумпф (С)	26,5	17,0	5,6	19,7	B15

(0...25; 25...50; и т.д.) по глубине в отметках от 0 до -972 м по трассе ствола (рис. 4).

Результаты инструментального обследования крепи ствола

По результатам проведения инструментального обследования получено распределение значений прочности бетона склерометрического обследования по относительным отметкам (рис. 5, табл. 2). Значение в зоне каждой относительной отметки было принято как среднеарифметическое от проведенных измерений (не менее 10 измерений в каждой) в зоне данной относительной отметки. Красной линией обозначена прочность на сжатие, соответствующая классу В15 (М200), фигурирующему в паспорте шахтного ствола.

Результаты замеров на сопряжениях и в зумпфовой части ствола приведены в табл. 3. В зоне сопряжений обнаружено пучение почвы и разрушение звеньев крепи, зафиксировано заколообразование, отслоение кровли по южной рассечке, трещинообразование между рассечкой и стволом по юго-западной стороне и разрушение бетона по северо-западной стороне рассечки, что хорошо согласуется с исследованиями [36, 37].

Результаты оценки температурного режима работы ствола

Результаты оценки температурного режима работы ствола на основании проектной документации представлены в табл. 4. Также по результатам анализа и данных метеорологической станции была сформирована обобщенная табл. 5, со среднегодовой температурой по десятилетиям на протяжении всего срока службы ствола:

Результаты расчета несущей способности крепи

Полученные в ходе расчетов (табл. 2, 3) результаты сведены в график (рис. 6)

На графике отражены полученные значения коэффициента запаса по прочности бетона крепи ствола, рассчитанной по методике Булычева, в виде точечной диаграммы. Отмечена граница предела значения коэффициента запаса по прочности согласно СП 20.13330.2016 «СНиП 2.01.07–85* Нагрузки и воздействия».

Данные представлены по двум временным промежуткам — 1980 г. и 2011 г. В целом, превалирующий объем точек диаграммы находится выше отметки $k_z = 1,3$ (СП20.13330.2016), однако есть и отдельные точки, лежащие ниже этой отметки. Отчетливо заметны участки по трассе ствола, в которых значение коэффициента запаса находится ниже, чем минимальное нормативное значение, а именно, отметки 50–100 м и 310–390 м, а также промежутки ниже 500 м и до 1000 м по трассе ствола (характерны для обоих временных промежутков).

Обсуждение результатов Результаты визуального обследования состояния конструкций крепи ствола

Визуальный осмотр состояния крепи показал, что достаточное количество протечек и вывалов обусловлены некачественным стыком заходок. Протечки в основном приурочены, помимо стыка заходок, к местам крепления кабелей, коммуникаций, трубопроводов. Встречались участки ствола, где наблюдались протечки по всему периметру ствола по стыку заходок. В связи с этим стоит отметить недостаточное количество водоулавливающих колец по трассе ствола. По стенкам ствола ниже ~ 100 м течет поток воды, что приводит к вымыванию поверхностных слоев бетона и ослаблению крепи в целом. Также это свидетельствует о просачивании и фильтрации воды сквозь бетонную крепь.

Таблица 4

Среднегодовые значения количества воздуха, м³/мин, и температуры, °СAverage annual values of air quantity, m³/min and temperature, °C

[составлено авторами]

Год	Среднегодовые значения, м ³ /мин	Среднегодовые значения, °С
2014	11803	10
2015	12585	11
2016	15475	10
2017	16289	11
2018	15761	10
2019	15647	11
2020	15028	11
2021	14371	11
2022	13995	11

Таблица 5

Среднегодовые значения температуры, по данным метеостанции, °С

Average annual temperature values according to meteorological station data, °C

[составлено авторами]

Год	Среднегодовая температура
1976	-4,6
1986	-6,6
1996	-4,5
2006	-6,1
2016	-1,9
2022	-2,6

Наиболее нарушенным является участок ствола в интервале отметок по глубине -130...-210 м (см. рис. 4). На нем отмечены протяженные по глубине зоны эрозии, вымывания и разрушения в северной, северо-восточной, восточной сторонах, сопровождающиеся трещинами, вывалами. В том числе на этих глубинах были отмечены диаметральные разрушения. Диаметральное разрушение наблюдается также на глубине -100...-104 м. Для интервалов глубин от 0 до -100 м и от -300 до -500 м характерны единичные дефекты. По трассе ствола отмечены локальные участки ремонтных работ.

Ниже отметки -500 м характер основных нарушений меняется. Уменьшается количество эрозий бетона

и нарушений, связанных с протечками. Увеличивается количество трещин (как вертикальных, так и горизонтальных). Трещины на этом участке могут носить локальный характер или же занимать большую площадь. С увеличением глубины количество нарушений возрастает.

По результатам осмотра рассечки -320 м были выявлены основные нарушения (рис. 7):

- трещины в стенках и кровле бетонной крепи сопряжения;
- деформации бетонной затяжки арочной крепи.

По результатам осмотра рассечки -780 м были выявлены основные нарушения:

- многочисленные трещины в стенках и кровле бетонной крепи прилегающих выработок околоствольного двора;

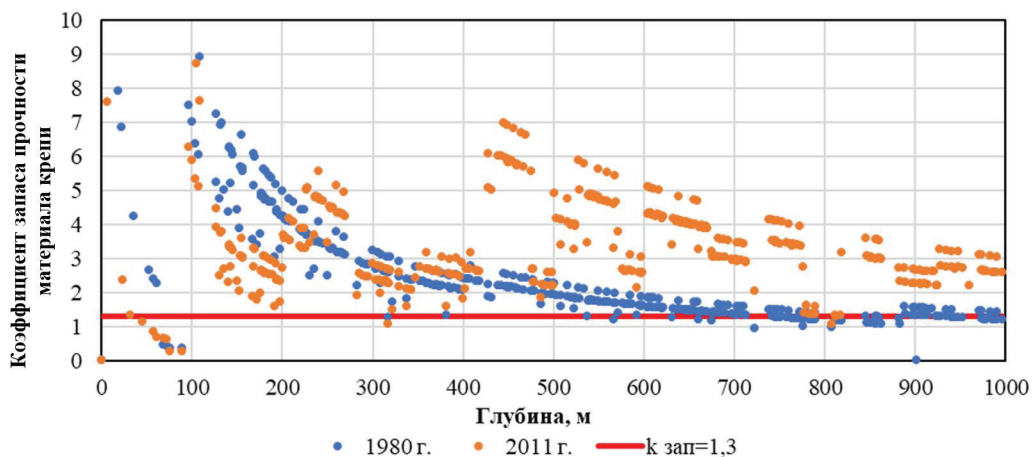


Рис. 6. Результаты расчета крепи вертикального ствола по методике Н. С. Булычева [составлено авторами]

Fig. 6. Results of vertical shaft lining calculation according to the method of N. S. Bulychev

- деформации и разрушения бетонной крепи в кровле сопряжения, в основании сопряжения и зумпфовой части;
- деформации металлических элементов конструкции, вызванные проявлением горного давления.

В зумпфе ствола крепь сильно нарушена, наблюдаются трещины отслоения с раскрытием до десятков сантиметров. Металлоконструкции деформированы от горного давления.

Результаты тахеометрической съемки ствола

Анализ результатов съемок показал, что сечение ствола имеет круглое недеформированное сечение, при этом наблюдается смещение оси ствола на величину ~25 см в южном направлении.

Результаты инструментального обследования крепи ствола.

Согласно результатам неразрушающего контроля методом упругого отскока, в 37% случаев выявлено несоответствие фактического класса прочности бетона заявленному в паспорте шахтного ствола, преимущественно с -75 до -200 м (менее 15 МПа), с -275 до 350 м и с -775 до -800 м (менее

18 МПа), а также с -450 по -475 м (менее 20 МПа) (см. рис. 7). Следует отметить, что полученные значения являются предварительными и для их уточнения необходимо проведение лабораторных исследований.

Как упоминалось выше, по возможности, измерения в рамках одной заходки бетонирования проводились в разных частях по высоте. В половине случаев результаты измерений различались в 1,3–1,5 раза для одной заходки, что говорит о большом разбросе качества бетона крепи. Также это косвенно подтверждает наличие пиковых значений на графике (см. рис. 7).

Оценка влияния температурного режима ствола на его устойчивость.

По данным о среднегодовых значениях температуры в околоствольном дворе (см. табл. 4) можно сказать, что температура в среднем была однородная на протяжении 9 лет наблюдений, варьировалась в пределах 10–11 °С и составила 11 градусов в 2022 году. Эта отметка температуры не изменялась с 2019 года. Таким образом, температурных изменений в околоствольном дворе за последние 4 года по среднего-

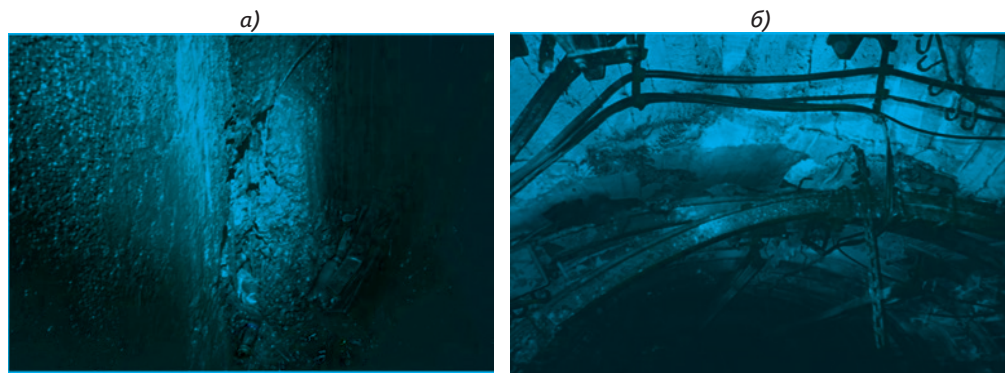


Рис. 7. Нарушения сопряжений: а – глубокая трещина; б – отслоения крепи
 Fig. 7. Disturbances of landings: a – deep crack; b – support delaminations
 [составлено авторами]

довым значениям не наблюдалось. Температура в среднем закономерно меняется от 8 °С (минимальная, по данным наблюдений) в летние месяцы, до 13 °С (максимальная) в зимние месяцы.

Полученные средние значения температурного режима шахты превышают температуру вмещающего массива пород, что, вкупе с глобальным потеплением, в исследуемом регионе неизбежно ведет к постепенному оттаиванию мерзлых грунтов вокруг выработок.

Результаты расчета несущей способности крепи

Проанализировав данные 1980 года (см. рис. 7), можно сказать, что коэффициент запаса по прочности материала проектной крепи превышен до отметки -600 м, после которой постепенно снижается до регламентированного значения, согласно СП 20.13330.2016 «СНиП 2.01.07–85* Нагрузки и воздействия», а на сложных горно-геологических участках даже находится ниже этого значения, что хорошо коррелируется с данными натурного обследования крепи на отметке ниже 600 м.

По результатам расчета прочности крепи ствола с учетом состояния массива по данным на 2021 год, а также с учетом состояния крепи по результатам обследования, можно отметить, что

на некоторых участках коэффициент запаса прочности крепи уменьшился в среднем в 1–2 раза, особенно это заметно на участках в диапазоне от -70 до -100 метров.

На начальных отметках глубины значения коэффициента запаса по прочности, полученного в результате расчетов 1980 года, во много раз превышает значения 2011 года, что подтверждает наблюдение о том, что происходит оттаивание мерзлых грунтов в исследуемом районе строительства (см. табл. 5). Несоответствие проектной и фактической прочности крепи стало причиной превышения значений коэффициента запаса прочности по данным 1980 года над значениями 2011 года на отметках от -70 до -200, где был зафиксирован большой объем нарушений по трассе ствола. Также хорошо коррелируется снижение значения коэффициента запаса по бетону.

Наиболее показательным примером в данном случае является корреляция графиков прочности бетона и нарушений крепи по глубине ствола. Совмещенный график приведен на рис. 8.

Выводы

1. По результатам визуального обследования ствол был условно раз-



Рис. 8. Совмещенный график объема нарушений и прочности крепи [составлено авторами]
 Fig. 8. Combined graph of disturbance volume and strength of concrete lining

делен на 8 участков, каждому участку присвоена категория состояния ствола и даны краткие рекомендации. Выявлено, что по всей трассе ствола необходимо произвести работы по водоуправлению/водоотведению. Данная мера снизит процесс поверхностного вымывания бетона, уменьшит интенсивность разрушения нарушенных участков крепи ствола и продлит срок службы ненарушенной крепи.

2. Результаты тахеометрической съемки крепи ствола позволяют сделать вывод об отсутствии значимых изменений формы ствола, способных повлиять на его несущую способность.

3. Анализ изменения температуры в регионе за время строительства и эксплуатации ствола позволяет заключить, что в районе эксплуатации шахты происходит оттаивание мерзлых грунтов и последующее изменение физико-механических свойств вмещающего массива.

4. Температурный режим работы ствола остается однородным на протя-

жении всего срока функционирования ствола, изменение в объеме проходящего через вертикальный ствол воздуха также незначительно. Однако нельзя отрицать факт влияния температурного режима ствола на окружающий массив, то есть растепление мерзлых грунтов происходит не только по причине увеличения среднегодовых температур в районе эксплуатации вертикальной выработки, но и за счет существующего вентиляционного режима шахты.

5. Результаты расчета фактической несущей способности крепи также подтверждают, что происходит оттаивание мерзлых грунтов. Расчеты, с учетом обновленных данных по геологии, показывают, что на отметке до 100 м коэффициент запаса не только меньше, чем его значения в 1980 году, но и не доходит до требуемого минимального значения на отдельных участках. Недостаточные значения коэффициента запаса по прочности бетона коррелируются с основным объемом нарушений

в крепи, вскрытым при обследовании, на отметках -600 и ниже, что может также быть связано с расхождением в проектной и фактической прочности бетона крепи.

6. Результаты проведения обследования указывают на следующие значимые факторы, способные повлиять на возникновение дефектов и повреждений крепи (в порядке убывания):

- низкая фактическая прочность бетона крепи;

- изменение физико-механических свойств массива;

- выветривание (вымывание) бетона крепи вследствие обильного водопотупления в ствол и течения воды по стенкам крепи;

- долгий срок службы сооружения в сочетании с деформационными характеристиками массива.

7. Для обеспечения работоспособности ствола рекомендуется:

- на срок от 3 до 7 лет:

- а) установить дополнительные водоулавливающие кольца, организовать спуск воды по трубам для снижения воздействия вымывания бетона;

- б) провести частичный ремонт участков крепи с нарушениями. Ремонт возможно выполнить набрызг-бетоном необходимой прочности. Локальные глубокие выколы (вывалы) необходимо забетонировать с применением несъемной опалубки;

- в) произвести тампонаж наиболее водонасыщенных участков (с наибольшим количеством протечек). При необходимости организовать контролируемый выпуск воды из массива (по трубам) для снижения гидростатического давления;

- на срок от 7 до 15 лет:

- 1) установить дополнительные водоулавливающие кольца, организовать спуск воды по трубам для снижения воздействия вымывания бетона

и снижения помех для осуществления частичного ремонта;

- 2) произвести частичный ремонт крепи с удалением наиболее разрушенных элементов бетонной крепи. При ремонте нарушений использовать несъемную опалубку (для локальных нарушений). При больших площадях обнажений: либо усилить бетонную крепь ствола установкой арматурной сетки по анкерам и созданием набрызг-бетонного слоя необходимой толщины и несущей способности (с образованием железобетонной крепи), либо заменить бетонную крепь на новую, большей несущей способности;

- 3) произвести тампонаж наиболее водонасыщенных участков (с наибольшим количеством протечек). В местах больших протечек – организовать контролируемый выпуск воды (по трубам) для снижения гидростатического давления;

- на срок более 15 лет:

- 1) провести удаление разрушенной части крепи до обнажения пород;

- 2) возвести новую крепь достаточной несущей способности;

- 3) провести мероприятия по водопрограждению и водоотведению в соответствии с типом и конструкцией крепи.

В заключение можно отметить, что только применение различных методов исследования и комплексный анализ смог определить причину и факторы разрушения крепи. Исследование является собой комплексный подход к оценке состояния ствола шахты с учетом визуального, инструментального, тахеометрического и температурного анализа; такой комплексный подход может быть эффективно использован для профилактики и управления эксплуатацией шахтных стволов в условиях Крайнего Севера.

Применение своевременного обслуживания, а в идеальном случае –

мониторинга [38] сооружения сможет продлить срок эксплуатации подземных стволов сверх нормативного и позволит в дальнейшем более полно использовать подземное пространство.

Рекомендации по устранению выявленных нарушений и поддержанию ствола в работоспособном состоянии напрямую зависят от планируемого срока службы ствола. Временные и материальные затраты должны быть рассчитаны и рационально обоснованы.

Объем ресурсов, затраченных на ремонтные работы долговременно используемых сооружений, зависят от качества исследования проблемного объекта и уровня проработки полученных результатов. Рациональные методы

проектирования ремонтных работ в зависимости от срока планируемой эксплуатации позволят сэкономить время ввода в строй подземных сооружений после аварии или остановки работы.

Вклад авторов

Котиков Д. А. — литературный обзор, проведение натурных измерений, изучение объекта, сбор исходных данных;

Веселова А. В. — систематизация нарушений, анализ результатов;

Романова Е. Л. — расчеты, анализ результатов;

Деменков П. А. — общее руководство.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Noskov V. A., Tsirel S. V., Korchak P. A.* Investigation of the impact of geodynamic risk on the financial and economic activities of mining enterprises // *Rock Mechanics for Natural Resources and Infrastructure Development — Proceedings of the 14th International Congress on Rock Mechanics and Rock Engineering, ISRM — 2019, 2020, pp. 330–335.*

2. *Вохмин С. А., Урбаев Д. А., Иванов Д. Г., Зайцева Е. В.* Перспективные направления снижения капитальных затрат при строительстве вертикальных стволов // *Современные проблемы науки и образования.* — 2012. — № 6. — С. 100.

3. *Коренной Ю. П., Власенко Д. С., Демехин Д. Н.* К вопросу определения степени нарушенности пород при расчете параметров крепи подземных горных выработок // *Маркшейдерия и недропользование.* — 2019. — № 3(101). — С. 40–41.

4. *Демин В. Ф., Демина Т. В., Батанин Ф. К., Тетерев Н. А.* Формирование прогрессивных технологических схем проведения и крепления горных выработок // *Безопасность технологических процессов и производств: Труды IV Международной научно-практической конференции.* — Екатеринбург, 2022. — С. 5–10.

5. *Масленников С. А., Говоруцкая С. А.* Эффективные параметры возведения комбинированной крепи вертикальных стволов // *Известия Тульского государственного университета. Естественные науки.* — 2010. — № 1. — С. 266–272.

6. *Баландин В. В., Леонов В. Л., Куранов А. Д., Багаутдинов И. И.* Применение обобщенного критерия Хука–Брауна для выбора и проектирования систем шахтной крепи для Октябрьского медно-никелевого месторождения: пример применения // *Горный журнал.* — 2019. — № 11. — С. 14–18.

7. *Дементьева А. В.* Подбор состава пенобетона для элементов податливой крепи на основе численного моделирования // *Актуальные проблемы недропользования: Тезисы докладов XVIII Международного форума-конкурса студентов и молодых ученых.* — 2022. — Т. 2. — С. 14–16.

8. *Morozov K. V.* Creation of rock mass monitoring deformations systems on rock burst hazardous mineral deposits // 14th International Congress on rock mechanics and rock engineering, 2020, pp. 1318–1323.

9. *Синчук Ю. Ю., Синчук Ю. В.* Экономическое развитие российской Арктики // Большая Евразия: развитие, безопасность, сотрудничество. — 2023. — № 6–2. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/ekonomicheskoe-razvitie-rossiyskoj-arktiki> (дата обращения: 05.03.2024).

10. *Протосеня А. Г., Алексеев А. В., Вербило П. Э.* Прогноз напряженно-деформированного состояния и устойчивости лба забоя тоннеля при пересечении нарушенных зон грунтового массива // Записки Горного института. — 2022. — Т. 254. — С. 252–260. DOI: 10.31897/PMI.2022.26.

11. *Марысюк В. П., Шиленко С. Ю., Андреев А. А., Шабаров А. Н.* Методика расчета межскважинных целиков для формирования защищенных зон в условиях удароопасных месторождений Талнаха // Горный журнал. — 2023. — № 1. — С. 106–112. DOI: 10.17580/gzh.2023.01.18.

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

13. *Карасев М. А., Сотников Р. О.* Прогноз напряженного состояния набрызг-бетонной крепи при многократном сейсмическом воздействии // Записки Горного института. — 2021. — Т. 251. — С. 626–638. DOI: 10.31897/PMI.2021.5.2.

14. *Петрушин А. Г., Викулов В. М.* Оценка несущей способности тубинговой крепи вертикальных стволов // Проектирование, строительство и эксплуатация комплексов подземных сооружений. — 2019. — С. 267–270.

15. *Страданченко С. Г., Масленников С. А., Голик В. И., Вернигор В. В.* Оптимизация состава бетонной крепи шахтных стволов // Технологии бетонов. — 2019. — № 5–6 (154–155). — С. 34–37.

16. *Karasev M. A., Protosenya A. G., Katerov A. M., Petrushin V. V.* Analysis of shaft lining stress state in anhydrite-rock salt transition zone // Rudarsko Geolosko Naftni Zbornik. 2022, no. 12, pp. 151–162. DOI: 10.17794/rgn.2022.1.13.

17. *Головнева Е. Е., Борщевский С. В., Глебо В. В.* К вопросу о проектировании сопряжений стволов с учетом увеличения глубины горных работ методом конечных элементов // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: Гірничо-геологічна. — 2014. — № 2(21). — С. 124–130.

18. *Кузина А. В., Ключев Р. В., Валиев Н. Г.* Прогнозирование состояния ледопородного массива при проходке вертикального шахтного ствола с замораживанием // Известия Уральского государственного горного университета. — 2023. — № 3(71). — С. 87–93. DOI: 10.21440/2307-2091-2023-3-87-93.

19. *Прокопов А. Ю., Масленников С. А., Шинкарь Д. И.* О влиянии специфических условий строительства вертикальных стволов на формирование прочностных характеристик бетона // Научное обозрение. — 2013. — № 11. — С. 102–107.

20. *Протосеня А. Г., Вильнер М. А.* Прогноз напряженно-деформированного состояния дисперсно-армированной набрызгбетонной крепи в трещиноватых массивах // Вестник Кузбасского государственного технического университета. — 2021. — № 5(147). — С. 5–14. DOI: 10.26730/1999-4125-2021-5-5-14.

21. *Кормициков Д. С., Кузьминых Е. Г., Семин М. А.* Безопасность реверсирования воздушного потока в вентиляционных стволах шахт в холодное время года при отсутствии подогрева // Безопасность труда в промышленности. — 2022. — № 1. — С. 14–19. DOI: 10.24000/0409–2961–2022–1-14–19.

22. *Семин М. А., Князев Н. А., Кормициков Д. С.* Тепловые процессы в вентиляционном стволе глубокого рудника при реверсировании воздушной струи в холодное время года // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. — 2023. — № 1. — С. 112–123. DOI: 10.15372/FTPRPI20230111.

23. *Зайцев А. В., Семин М. А., Паршаков О. С.* Особенности формирования теплового режима в воздухоподающих стволах в холодный период года // Записки Горного института. — 2021. — Т. 250. — С. 562–568. DOI: 10.31897/PMI.2021.4.9.

24. *Казаков Б. П., Шалимов А. В.* О температуре крепи вентиляционных стволов при реверсировании главных вентиляторных установок // Безопасность труда в промышленности. — 2006. — № 10. — С. 12–14.

25. *Бублик С. А., Семин М. А., Левин Л. Ю.* Исследование прочности монолитной бетонной крепи шахтного ствола в условиях переменных тепловых нагрузок // Вычислительная механика сплошных сред. — 2021. — Т. 14. — № 2. — С. 220–232. DOI: 10.7242/1999–6691/2021.14.2.19.

26. *Колесов Е. В., Казаков Б. П., Семин М. А.* Моделирование теплообмена между крепью шахтного ствола и проходящим по стволу воздухом в условиях смешанной конвекции // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. — 2021. — № 5. — С. 160–171. DOI: 10.15372/FTPRPI20210515.

27. *Сергеев С. В., Воробьев Е. Д., Фролов Н. В.* Обследование ствола шахты, эксплуатируемого в сложных инженерно-геологических условиях // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В. Г. Шухова. — 2017. — № 2. — С. 63–67. DOI: 10.12737/23818.

28. *Поляков А. Л., Лутович Е. А., Северинчик С. А.* Первый опыт комплексного обследования крепи вертикальных стволов на рудниках ОАО «Беларуськалий» // Научные исследования и инновации. — 2011. — Т. 5. — № 2. — С. 144–146.

29. *Дрибан В. А., Хохлов Б. В., Антипенко А. В.* Прогноз долговременной геомеханической устойчивости крепи вертикальных стволов шахты «Глубокая» в обводненном массиве горных пород // Труды РАНМИ. — 2023. — № 23(38). — С. 126–136.

30. *Костин Э. С.* Формирование горного давления на крепь вертикальных горных выработок, проведенных в устойчивых при оттаивании вечномерзлых породах // Проблемы и перспективы развития горного дела на Северо-Востоке СССР. — 1990. — С. 288–292.

31. *Иудин М. М.* О пластическом деформировании мерзлых горных пород // Материалы четвертой конференции геокриологов России: Сборник. — 2011. — Т. 1. — С. 60–65.

32. *Зубков А. В., Сентябов С. В., Бирючев И. В.* Влияние изменяющихся горизонтальных напряжений в массиве на состояние крепи стволов // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г. И. Носова. — 2014. — № 3(47). — С. 11–15.

33. *Ильинов М. Д., Коршунов В. А., Поспехов Г. Б., Шоков А. Н.* Комплексные экспериментальные исследования механических свойств горных пород: проблемы и пути их решения // Горный журнал. — 2023. — № 5. — С. 11–18. DOI: 10.17580/gzh.2023.05.02.

34. Тарасов В. В., Антуков В. Н. Мониторинг деформации бетонной крепи шахтных стволов с помощью лазерного сканирования // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. — 2022. — № 5. — С. 188–195. DOI: 10.15372/FTPRI20220518.

35. Булычев Н. С. Механика подземных сооружений. — М.: Недра, 1982. — 271 с.

36. Корчак П. А., Карасев М. А. Геомеханическое обоснование формирования зон хрупкого разрушения пород в окрестности сопряжений горных выработок рудников АО «Апатит» // Устойчивое развитие горных территорий. — 2023. — Т. 15. — № 1(55). — С. 67–80. DOI: 10.21177/1998-4502-2023-15-1-67-80.

37. Кузнецова М. Г., Диулин Д. А. Особенности эксплуатации, диагностики и прогнозирования состояния крепи вертикальных стволов шахт // Механика. Исследования и инновации. — 2020. — № 13. — С. 68–80.

38. Raskazov M., Tereshkin A., Tsoi D., Konstantinov A., Miroshnikov V., Bagautdinov I., Kozhogulov K. Research of the formation of zones of stress concentration and dynamic manifestations based on seismoacoustic monitoring data in the fields of the Kola Peninsula // E3S Web Conf. 2020, vol. 192, 01009. DOI: 10.1051/e3sconf/202019201009. **PLA3**

REFERENCES

1. Noskov V. A., Tsirel S. V., Korchak P. A. Investigation of the impact of geodynamic risk on the financial and economic activities of mining enterprises. *Rock Mechanics for Natural Resources and Infrastructure Development — Proceedings of the 14th International Congress on Rock Mechanics and Rock Engineering, ISRM 2019*. 2020, pp. 330–335.

2. Voxmin S. A., Urbaev D. A., Ivanov D. G., Zajceva E. V. Upcoming trends of capital outlays decrease in the process of shafts construction. *Modern problems of science and education*. 2012, no. 6, pp. 100. [In Russ].

3. Korennoj Yu. P., Vlasenko D. S., Demexin D. N. Problem of determination of the ground conditions during calculation of parameters of underground mine working support. *Markshejderiya i nedropol'zovanie*. 2019, no. 3(101), pp. 40–41. [In Russ].

4. Demin V. F., Demina T. V., Batanin F. K., Teterov N. A. Formation of progressive technological schemes for conducting and securing mine workings. *Safety of technological processes and production: Proceedings of the IV International Scientific and Practical Conference*, Ekaterinburg, 2022, pp. 5–10. [In Russ].

5. Maslennikov S. A., Govorutskaya S. A. Effective parameters for the construction of combined support for vertical shafts. News of the Tula State University. *Natural Sciences*. 2010, no. 1, pp. 266–272. [In Russ].

6. Balandin V. V., Leonov V. L., Kuranov A. D., Bagautdinov I. I. Application of generalized Hoek-Brown criterion to selection and design of mine support systems for the Oktyabrsky copper-nickel deposit: Case study. *Gornyi Zhurnal*. 2019, no. 11, pp. 14–18. [In Russ].

7. Dementieva A. V. Selection of the composition of foam concrete for elements of pliable support based on numerical modeling. *Current problems of subsoil use: abstracts of the XVIII International Forum-Competition of Students and Young Scientists*. 2022, vol. 2, pp. 14–16. [In Russ].

8. Morozov K. V. Creation of rock mass monitoring deformations systems on rock burst hazardous mineral deposits. *14th international congress on rock mechanics and rock engineering*. 2020, pp. 1318–1323.

9. Sinchuk Yu. Yu., Sinchuk Yu. V. Economic development of the Russian Arctic. *Greater Eurasia: development, security, cooperation*. 2023, no. 6–2. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/ekonomicheskoe-razvitie-rossiyskoy-arktiki> (access date: 03/05/2024). [In Russ].

10. Protosenya A. G., Alekseev A. V., Verbilo P. E. Prediction of the stress-strain state and stability of the front of tunnel face at the intersection of disturbed zones of the soil mass. *Journal of Mining Institute*. 2022, vol. 254, pp. 252–260. [In Russ]. DOI: 10.31897/PMI.2022.26.

11. Marysyuk V. P., Shilenko S. Yu., Andreev A. A., Shabarov A. N. Interwell area design procedure to generate safe zones in rockburst-hazardous conditions of Talnakh deposits. *Gornyi Zhurnal*. 2023, no. 1, pp. 106–112. [In Russ]. DOI: 10.17580/gzh.2023.01.18.

12. Il'inov M. D., Petrov D. N., Karmanskij D. A., Selixov A. A. Aspects of physical modelling of processes of structural changes in rock samples under thermobaric conditions at great depths. *Gornye nauki i tekhnologii*. 2023, vol. 8, no. 4, pp. 290–302. [In Russ]. DOI: 10.17073/2500-0632-2023-09-150.

13. Karasev M. A., Sotnikov R. O. Forecast of the stress state of shotcrete lining under repeated seismic impact. *Journal of Mining Institute*. 2021, vol. 251, pp. 626–638. [In Russ]. DOI: 10.31897/PMI.2021.5.2.

14. Petrushin A. G., Vikulov V. M. Assessment of the bearing capacity of tubing support for vertical shafts. Design, construction and operation of underground structure complexes, 2019, pp. 267–270. [In Russ].

15. Stradanchenko S. G., Maslennikov S. A., Golik V. I., Vernigor V. V. Optimization of the composition of concrete support for mine shafts. *Concrete Technologies*. 2019, no. 5–6(154–155), pp. 34–37. [In Russ].

16. Karasev M. A., Protosenya A. G., Katerov A. M., Petrushin V. V. Analysis of shaft lining stress state in anhydrite-rock salt transition zone. *Rudarsko Geolosko Naftni Zbornik*. 2022, no. 12, pp. 151–162. DOI: 10.17794/rngn.2022.1.13.

17. Golovneva E. E., Borshchevsky S. V., Glebko V. V. On the issue of designing shaft joints taking into account the increase in the depth of mining using the finite element method. *Science of Donetsk National Technical University*. 2014, no. 2(21), pp. 124–130. [In Russ].

18. Kuzina A. V., Klyuev R. V., Valiev N. G. Forecasting the state of the ice rock mass during the sinking of a vertical mine shaft with freezing. *News of the Ural State Mining University*. 2023, no. 3(71), pp. 87–93. [In Russ]. DOI: 10.21440/2307-2091-2023-3-87-93.

19. Prokopov A. Yu., Maslennikov S. A., Shinkar D. I. On the influence of specific conditions for the construction of vertical shafts on the formation of the strength characteristics of concrete. *Scientific Review*. 2013, no. 11, pp. 102–107. [In Russ].

20. Protosenya A. G., Vilner M. A. Forecast of the stress-strain state of dispersed-reinforced shotcrete lining in fractured massifs. *Bulletin of the Kuzbass State Technical University*. 2021, no. 5(147), pp. 5–14. [In Russ]. DOI: 10.26730/1999-4125-2021-5-5-14.

21. Kormshchikov D. S., Kuzminykh E. G., Semin M. A. Safety of air flow reversal in ventilation shafts of mines in the cold season in the absence of heating. *Labor safety in industry*. 2022, no. 1, pp. 14–19. [In Russ]. DOI: 10.24000/0409-2961-2022-1-14-19.

22. Semin M. A., Knyazev N. A., Kormshchikov D. S. Thermal processes in the ventilation shaft of a deep mine when reversing the air stream in the cold season. *Physico-technical problems of mineral development*. 2023, no. 1, pp. 112–123. [In Russ]. DOI: 10.15372/FTPRPI20230111.

23. Zaytsev A. V., Semin M. A., Parshakov O. S. Features of the formation of the thermal regime in air supply shafts in the cold season. *Journal of Mining Institute*. 2021, vol. 250, pp. 562–568. [In Russ]. DOI: 10.31897/PMI.2021.4.9.

24. Kazakov B. P., Shalimov A. V. On the temperature of the support of ventilation shafts when reversing the main fan installations. *Labor safety in industry*. 2006, no. 10, pp. 12–14. [In Russ].
25. Bublik S. A., Semin M. A., Levin L. Yu. Study of the strength of monolithic concrete support for a mine shaft under conditions of variable thermal loads. *Computational continuum mechanics*. 2021, vol. 14(2), pp. 220–232. [In Russ]. DOI: 10.7242/1999–6691/2021.14.2.19.
26. Kolesov E. V., Kazakov B. P., Semin M. A. Modeling of heat exchange between the support of a mine shaft and the air passing through the shaft under conditions of mixed convection. *Physico-technical problems of mineral development*. 2021, no. 5, pp. 160–171. [In Russ]. DOI: 10.15372/FTPRPI20210515.
27. Sergeev S. V., Vorobyov E. D., Frolov N. V. Inspection of a mine shaft operated in difficult engineering-geological conditions. *Bulletin of the Belgorod State Technological University of V. G. Shukhov*. 2017, no. 2, pp. 63–67. [In Russ]. DOI: 10.12737/23818.
28. Polyakov A. L., Lutovich E. A., Severinichik S. A. The first experience of a comprehensive inspection of the support of vertical shafts at the mines of OJSC “Belaruskali”. *Scientific Research and Innovation*. 2011, vol. 5(2), pp. 144–146. [In Russ].
29. Driban V. A., Khokhlov B. V., Antipenko A. V. Forecast of long-term geomechanical stability of support for vertical shafts of the Glubokaya mine in a watered rock mass. *Proceedings of RANIMI*. 2023, no. 23(38), pp. 126–136. [In Russ].
30. Kostin E. S. Formation of rock pressure on the support of vertical mine workings carried out in permafrost rocks that are stable during thawing. *Problems and prospects for the development of mining in the North-East of the USSR*, 1990, pp. 288–292. [In Russ].
31. Iudin M. M. On plastic deformation of frozen rocks. *Proceedings of the fourth conference of geocryologists*. 2011, vol. 1, pp. 60–65. [In Russ].
32. Zubkov A. V., Sentyabov S. V., Biryuchev I. V. The influence of changing horizontal stresses in the massif on the condition of the shaft support. *Bulletin of the Magnitogorsk State Technical University of G. I. Nosov*. 2014, no. 3(47), pp. 11–15. [In Russ].
33. Ilyinov M. D., Korshunov V. A., Pospehov G. B., Shokov A. N. Complex experimental studies of the mechanical properties of rocks: problems and ways to solve them. *Mining Journal*. 2023, no. 5, pp. 11–18. [In Russ]. DOI: 10.17580/gzh.2023.05.02.
34. Tarasov V. V., Aptukov V. N. Monitoring the deformation of concrete lining of mine shafts using laser scanning. *Physico-technical problems of mineral development*. 2022, no. 5, pp. 188–195. [In Russ]. DOI: 10.15372/FTPRPI20220518.
35. Bulychev N. S. Mechanics of underground structures. Moscow, Nedra, 1982, p. 271. [In Russ].
36. Korchak P. A., Karasev M. A. Geomechanical justification for the formation of zones of brittle fracture of rocks in the vicinity of the junctions of mine workings of the mines of JSC “Apatit”. *Sustainable development of mountain territories*. 2023, vol. 15, no. 1(55), pp. 67–80. [In Russ]. DOI: 10.21177/1998–4502–2023–15–1-67–80.
37. Kuznetsova M. G., Diulin D. A. Peculiarities of operation, diagnostics and forecasting of the condition of support in vertical mine shafts. *Mechanics. Research and innovation*. 2020, no. 13, pp. 68–80. [In Russ].
38. Raskazov M., Tereshkin A., Tsoi D., Konstantinov A., Miroshnikov V., Bagautdinov I., Kozhogulov K. Research of the formation of zones of stress concentration and dynamic manifestations based on seismoacoustic monitoring data in the fields of the Kola Peninsula. *E3S Web Conf*. 2020, vol. 192, 01009. DOI: 10.1051/e3sconf/202019201009.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

*Котиков Дмитрий Александрович*¹ — канд. техн. наук, зав. лабораторией, <https://orcid.org/0009-0006-8445-2689>, e-mail: hromokot@list.ru;

*Веселова Анастасия Владимировна*¹ — аспирант, <https://orcid.org/0009-0004-6450-183X>, e-mail: s225061@stud.spmi.ru;

*Романова Екатерина Леонидовна*¹ — аспирант, <https://orcid.org/0000-0002-4448-4292>, e-mail: ekaterina.romanova.1997@mail.ru;

*Деменков Петр Алексеевич*¹ — докт. техн. наук, профессор, декан Строительного факультета, <https://orcid.org/0000-0003-1599-8080>, e-mail: demenkov_pa@pers.spmi.ru;

¹ Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, 199106, Санкт-Петербург, линия 21-ая В. О., дом 2

Для контактов: *Веселова Анастасия Владимировна*, e-mail: s225061@stud.spmi.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

*Kotikov D. A.*¹, Cand. Sci. (Eng.), head of laboratory, <https://orcid.org/0009-0006-8445-2689>, e-mail: hromokot@list.ru;

*Veselova A. V.*¹, post-graduate student, <https://orcid.org/0009-0004-6450-183X>, e-mail: s225061@stud.spmi.ru;

*Romanova E. L.*¹, post-graduate student, <https://orcid.org/0000-0002-4448-4292>, e-mail: ekaterina.romanova.1997@mail.ru;

*Demenkov P. A.*¹, Dr. Sci. (Eng.), professor, dean of the Faculty of Construction, <https://orcid.org/0000-0003-1599-8080>, e-mail: demenkov_pa@pers.spmi.ru;

¹ Empress Catherine II Saint-Petersburg Mining University, 199106, St. Petersburg, St. Petersburg, line 21-aya V. O., dom 2.

For contacts: *Veselova A. V.*, e-mail: s225061@stud.spmi.ru.

Получена редакцией 17.06.2024; получена после рецензии 23.09.2024; принята к печати 10.10.2024.

Received by the editors 17.06.2024; received after the review 23.09.2024; accepted for printing 10.10.2024.

