

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования «Национальный исследовательский  
технологический университет «МИСИС»

*На правах рукописи*

**Машин Алексей Николаевич**

**ОБОСНОВАНИЕ МЕТОДИКИ ОЦЕНКИ ТЕХНИЧЕСКОГО  
СОСТОЯНИЯ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СХЕМ РЕКОНСТРУКЦИИ  
ГЛУБОКИХ ВЕРТИКАЛЬНЫХ СТВОЛОВ**

Специальность 2.8.8 – «Геотехнология, горные машины»

Диссертация на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель,  
доктор технических наук,  
профессор

Панкратенко Александр  
Никитович

Москва, 2023

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
1 АНАЛИЗ ТЕОРЕТИЧЕСКИХ ОСНОВ И ПРАКТИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ В ОБЛАСТИ ОЦЕНКИ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ШАХТНЫХ СТВОЛОВ И РАЗРАБОТКИ РЕШЕНИЙ ПО ИХ РЕМОНТУ И РЕКОНСТРУКЦИИ.....	10
1.1 Основные тенденции и закономерности эксплуатации шахтных стволов и подходы к оценке их технического состояния .....	10
1.2 Современные подходы к оценке технического состояния стволов и перспективны их дальнейшего развития .....	17
1.3 Геомеханические аспекты выбора технических и технологических решений при ремонте и реконструкции вертикальных стволов .....	23
1.4 Выводы. Цель и задачи исследования .....	27
2 РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ОЦЕНКИ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ШАХТНЫХ СТВОЛОВ.....	28
2.1 Основные положения.....	28
2.2 Определение интегральных критериев технического состояния ствола .....	31
2.3 Оценка устойчивости околоствольных пород стволов с большим сроком эксплуатации .....	33
2.4 Выбор управляющих воздействий .....	37
2.5 Выводы по главе 2 .....	38
3 АПРОБАЦИЯ МЕТОДИКИ ОЦЕНКИ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ВЕРТИКАЛЬНЫХ СТВОЛОВ.....	40
3.1 Основные положения .....	40
3.2 Визуальное обследование ствола.....	42
3.3 Инструментальное изучение структуры и прочности бетонной крепи .....	43
3.3.1 Исследование внутренней структуры крепи и закрепного пространства методами ультразвуковой томографии .....	43
3.3.2 Оценка фактической прочности бетона крепи.....	46
3.3.3 Неразрушающий контроль прочности бетона крепи .....	48
3.4 Георадиолокационное и сейсмоакустическое обследование ствола .....	49
3.4.1 Сейсмоакустика .....	49
3.4.2 Георадиолокация .....	55
3.5 Глубинные исследования околоствольного массива методом радиоволнового просвечивания.....	60
3.6 Примеры реализации методики оценки технического состояния шахтных стволов с большим сроком эксплуатации .....	64
3.6.1 Общие сведения .....	64
3.6.2 Результаты обследовательских работ первого (поверхностного) уровня .....	65
3.6.3 Результаты обследовательских работ второго (приконтурного) уровня.....	70

3.6.4 Результаты обследовательских работ третьего (глубинного) уровня.....	79
3.6.5 Результаты определения остаточного запаса несущей способности крепи и общей оценки технического состояния стволов.....	88
3.7 Выводы по главе 3.....	89
<b>4 ОБОСНОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СХЕМ РЕКОНСТРУКЦИИ ВЕРТИКАЛЬНЫХ СТВОЛОВ.....</b>	<b>91</b>
4.1 ОСНОВНЫЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПОЛОЖЕНИЯ.....	91
4.2 ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНЫХ МОДЕЛЕЙ.....	93
4.2.1 Выбор упругопластической модели для дезинтегрированных скальных пород.....	93
4.2.2 Определение начального поля напряжений в породном массиве.....	97
4.2.3 Алгоритм разработки математической модели.....	98
4.2.4 Верификация модели.....	101
4.2.5 Параметры материалов крепи.....	103
4.3 ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ СХЕМЫ РЕКОНСТРУКЦИИ ГЛУБОКИХ ВЕРТИКАЛЬНЫХ СТВОЛОВ.....	104
4.3.1 Обоснование элементов строительных геотехнологий.....	104
4.3.2 Оценка эффективности предложенных решений.....	116
4.4 Выводы по главе 4.....	116
<b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....</b>	<b>118</b>
<b>БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....</b>	<b>121</b>
<b>Приложение А. Акт внедрения.....</b>	<b>132</b>

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность и степень разработанности темы исследования.** Сегодня в России продолжают функционировать десятки вертикальных стволов шахт и рудников, построенных в 50-80-годы прошлого века. Многие из них эксплуатируются в сложных горно- и гидрогеологических условиях, характеризующихся большой глубиной, высокими значениями напряжений в массиве, динамическими проявлениями горного давления, интенсивными водопритоками, интенсивной нарушенностью окрествольных пород и др.

Эти воздействия оказывают негативное влияние на общее техническое состояние крепи и армировки стволов и приводят к значительному росту затрат на их текущее содержание и капитальный ремонт. В глубоких стволах шахт и рудников стоимость таких работ многократно возрастает. Особую актуальность при этом приобретают вопросы качественной оценки остаточного ресурса конструкций крепи и армировки, а также выбор и обоснование оптимальных ремонтно-восстановительных мероприятий. Неправильно принятые решения в ряде случаев приводили к возникновению серьезных инцидентов и большим экономическим потерям.

Для митигации указанных рисков, а также продления срока службы вертикальных стволов на следующий эксплуатационный период требуется реализация комплексных проектов по их реконструкции, направленных на доведение фактических параметров крепи и армировки стволов до требований современных нормативных документов.

Первым этапом реализации проекта реконструкции стволов с большим сроком эксплуатации является оценка их технического состояния, в процессе которой решаются вопросы, связанные с определением фактической прочности, несущей способности и долговечности конструкций исследуемых подземных сооружений, а также с изучением устойчивости окрествольного массива пород на различных глубинах. Необходимо отметить, что существующие сегодня нормативные методики по оценке технического состояния шахтных стволов существенно устарели и они требуют актуализации с уче-

том новейших достижений науки, техники, накопленного опыта и знаний. Сама система оценки зависит от принятой в нормативных документах парадигмы, более того, от уровня квалификации специалистов, применяющих существующие методики в своей работе. Поэтому системный подход к организации обследования стволов шахт и рудников должен включать не только всестороннюю оценку технического состояния конструкций, но и предусматривать совершенствование этой оценки, которое должно потом находить отражение в новых нормативных документах.

Вопросам оценки технического состояния подземных сооружений, исследованию породных массивов в окрестности горных выработок, определению параметров напряженно-деформированного состояния системы «крепь – массив» посвящено большое количество работ отечественных и зарубежных ученых и специалистов.

Большой вклад в решение геомеханических проблем по обеспечению устойчивости горных выработок, ее оценки и прогнозированию внесли И.В. Баклашов, Н.С. Булычев, Ю.З. Заславский, Б.А. Картозия, А.М. Козел, А.А. Козырев, Г.Г. Литвинский, А.Б. Макаров, А.Г. Протосеня, К.В. Руппелайт, С.В. Сергеев, О.Н. Шашенко и многие другие ученые. В тоже время вопросы, связанные с разработкой интегральных критериев оценки технического состояния шахтных стволов с большим сроком эксплуатации, остались не рассмотренными.

В работах Амусина Б.З., Баклашова И.В., Боликова Е.В., Булычева Н.С., Компанца В.Ф., Картозии Б.А., Левита В.В., Панкратенко А.Н., Пестриковой В.С., Плешко М.С., Протосени А.Г., Харисова Т.Ф., Ягодкина Ф.И. и др. разработаны эффективные технические и технологические решения по проходке и креплению стволов в обычных и сложных горно-геологических условиях, ремонту и восстановлению крепи и армировки. В то же время строительные геотехнологии, применяющиеся для реконструкции и восстановления глубоких вертикальных стволов с большим сроком службы, должны комплексно учитывать реальное состояние существующей крепи, около-

ствольного массива и протекающие процессы их взаимодействия, не характерные для нового строительства. Изучению этих вопросов и посвящена настоящая диссертационная работа.

**Цель работы:** обоснование методики оценки технического состояния и технологических схем реконструкции глубоких вертикальных стволов, позволяющих повысить технико-экономические показатели и обеспечить комплексную безопасность горнопроходческих работ.

**Идея работы** заключается в том, что на основе применения трехэтапной многоуровневой методики оценки технического состояния шахтных стволов выбираются и обосновываются наиболее адекватные технологические схемы их ремонта и реконструкции, позволяющие минимизировать строительные и геотехнологические риски на всех этапах работ.

**Задачи исследования:**

- анализ теоретических основ и практических исследований в области оценки технического состояния шахтных стволов и разработки решений по их ремонту и реконструкции;
- теоретическое обоснование и разработка методики оценки технического состояния глубоких вертикальных стволов с большим сроком эксплуатации;
- экспериментальная апробация методики в реальных шахтных условиях для оценки технического состояния глубоких вертикальных стволов;
- разработка эффективных технологических схем реконструкции глубоких вертикальных стволов и их внедрение на практике.

**Научные положения, выносимые на защиту:**

1. Значение интегрального критерия технического состояния глубокого вертикального ствола  $K$  определяется с учетом суммарного количества ранжированных дефектов, характеризующих плотность и критичность поверхностных и внутренних повреждений крепи, качество контакта «крепь – массив», фактическую прочность и толщину крепи, интенсивность водопр-

явлений, а также величину отклонений оси и сечения ствола от проектного положения. При значениях  $K > 14$  и переходе крепи в запредельную стадию работы, состояние ствола следует оценивать как неработоспособное.

2. Оценка устойчивости околоствольных пород по пяти категориям с учетом показателей относительной прочности, качества керна, контакта «крепь – массив», обводненности и срока службы ствола обеспечивает ранжированный выбор необходимых управляющих воздействий. В стволах в неработоспособном техническом состоянии, основная протяжённость которых относится IV и V категориям устойчивости, требуется реконструкция с изменением проектных параметров.

3. Параметры технологии реконструкции шахтных стволов должны определяться с учетом закономерностей взаимодействия системы «новая крепь – существующая крепь – дезинтегрированный породный массив». Снижение напряжений на 20-30% в контактных слоях достигается при применении анкерных опорных систем с их заглублением в устойчивую зону массива на глубину не менее  $1/3$  размера нарушенной зоны. В искривленных стволах следует дополнительно учитывать вероятность возникновения концентраций напряжений в крепи, в 1,3 - 1,4 раза превышающих средний уровень, а для их минимизации применять компенсационные элементы.

**Достоверность научных положений, выводов и рекомендаций** подтверждается представительным объемом экспериментальных исследований, выполненных в глубоких вертикальных стволах Норильского промышленного района, применением специализированных геотехнических программных комплексов, повсеместно используемых для решения подобного класса задач, высокоточного геофизического оборудования и поверенных приборов неразрушающего контроля конструкций, использованием апробированных методов механики подземных сооружений, теории вероятности, внедрением разработанной методики и технологических решений на практике.

### **Научная новизна работы:**

1. Разработана новая методика оценки технического состояния эксплуатационных стволов, учитывающая плотность поверхностных и внутренних повреждений в бетоне крепи, качества контакта «крепь – массив», размеры зон дезинтеграции околоствольных пород, интенсивность водопритоков и величины отклонений оси и сечения ствола от проектного положения.

2. Усовершенствована методика оценки устойчивости околоствольных пород с выделением пяти категорий, в отличие от известных ранее позволяющая производить ранжированный выбор необходимых управляющих воздействий по восстановлению работоспособности стволов с большим сроком эксплуатации.

3. Установлены новые закономерности взаимодействия компонентов системы «новая крепь – существующая крепь – дезинтегрированный породный массив», формируемой в процессе реконструкции ствола и определены параметры анкерных опорных систем и компенсирующих элементов для тубинговой крепи, обеспечивающие уменьшение в ней концентраций напряжений.

**Практическая значимость.** В области практической значимости можно обозначить разработку методики оценки технического состояния глубоких вертикальных стволов и технологических схем их реконструкции, обеспечивающих снижение геотехнических рисков и повышение безопасности горно-проходческих работ.

В ходе выполнения данной работы применялись следующие **методы исследований**: натурные экспериментальные геомеханические и геофизические исследования состояния крепи шахтных стволов и околоствольного массива пород, технико-экономический анализ способов и схем реконструкции стволов, математическое моделирование совместной работы системы «новая крепь – существующая крепь – дезинтегрированный породный массив» в трёхмерной постановке задачи; комплексный подход к решению научно-методических, теоретических и экспериментальных задач.

**Личный вклад автора.** Автором выполнены теоретические исследования по разработке методики оценки технического состояния шахтных стволов, проведены экспериментальные исследования в натуральных условиях свойств крепи и приконтурного массива, выполнено математическое моделирование методом конечных элементов в пространственной постановке задачи взаимодействия системы «новая крепь – существующая крепь – дезинтегрированный породный массив», а также разработаны технические и технологические решения по реконструкции глубоких вертикальных стволов.

#### **Реализация результатов работы.**

Научные результаты работы использованы АО «Управление строительства № 30» при разработке проектных решений и производстве работ по реконструкции ствола ВС-5 рудника «Таймырский» ПАО «ГМК «Норильский никель».

**Апробация работы.** Основные положения и результаты работы были доложены на международных научно-технических симпозиумах «Неделя горняка» (Москва, НИТУ «МИСИС» 2021-2023 гг.); 18-й Международной конференции по проблемам горной промышленности, строительства и энергетики (Тула – Минск – Донецк, 2 - 3 ноября 2022 г.).

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 4 работы, из которых 4 - в изданиях, рекомендованных ВАК при Минобрнауки России.

**Объем и структура работы.** Диссертационная работа представлена на 133 страницах текста, состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованной литературы из 101 наименования, включает 58 рисунков, 19 таблиц, одно приложение.

# **1 АНАЛИЗ ТЕОРЕТИЧЕСКИХ ОСНОВ И ПРАКТИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ В ОБЛАСТИ ОЦЕНКИ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ШАХТНЫХ СТВОЛОВ И РАЗРАБОТКИ РЕШЕНИЙ ПО ИХ РЕМОНТУ И РЕКОНСТРУКЦИИ**

## **1.1 ОСНОВНЫЕ ТЕНДЕНЦИИ И ЗАКОНОМЕРНОСТИ ЭКСПЛУАТАЦИИ ШАХТНЫХ СТВОЛОВ И ПОДХОДЫ К ОЦЕНКЕ ИХ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ**

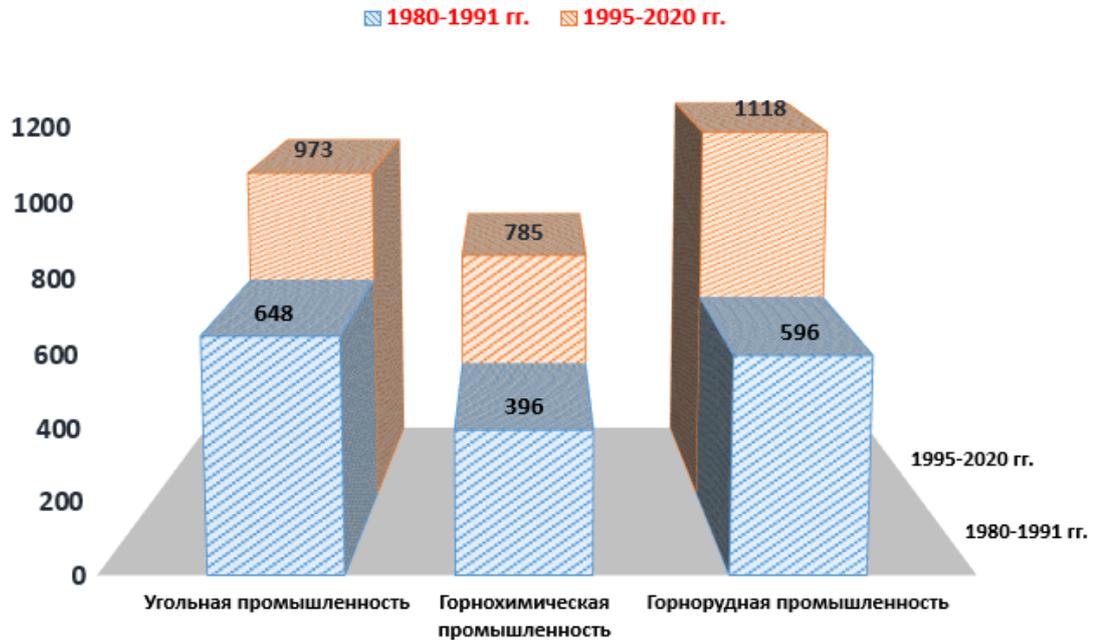
Вертикальные стволы шахт и рудников относятся к наиболее сложным и ответственным объектам горных предприятий. Многие из этих выработок эксплуатируются в сложных горно- и гидрогеологических условиях, характеризующихся большой глубиной, высокими значениями напряжений в массиве, динамическими проявлениями горного давления, интенсивными водопритоками, значительной нарушенностью околоствольного породного массива и др. [1].

Это оказывает негативное влияние на техническое состояние крепи и армировки стволов и приводит к существенному росту затрат на их текущее содержание и капитальный ремонт. Неправильно принятые решения в ряде случаев приводили к возникновению серьезных инцидентов, сопровождавшихся большими экономическими потерями.

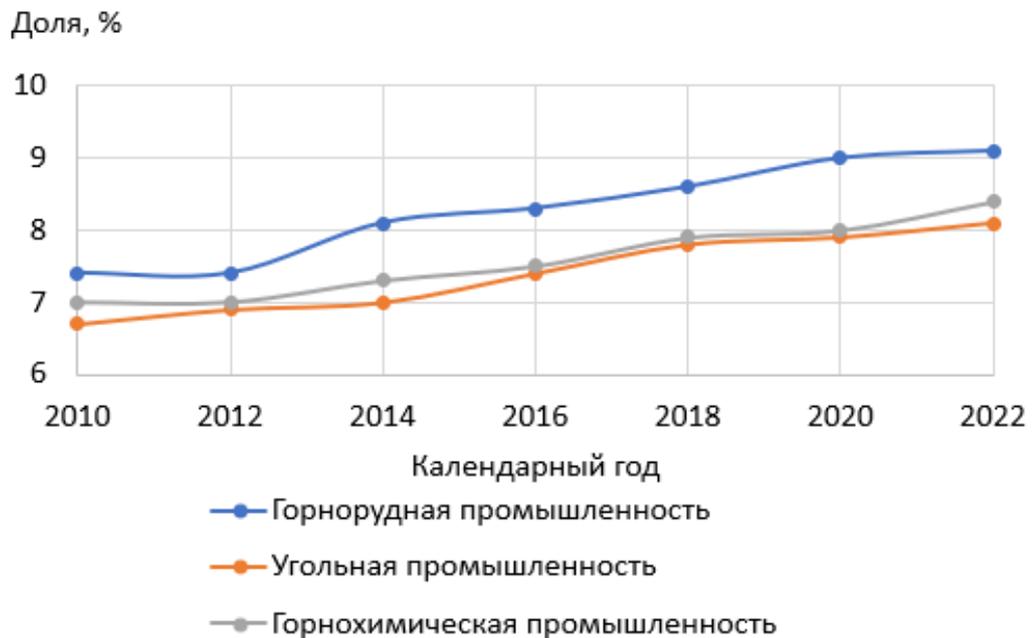
На рис. 1.1.1 представлены два статистических графика, обобщающих данную негативную тенденцию. Первый график иллюстрирует рост средних глубин стволов в Российской Федерации в сравнении с Советским периодом [2]. Пропорционально увеличиваются затраты на поддержание работоспособности выработок глубокого залегания, что наглядно подтверждает второй график зависимости изменения удельной доли затрат на поддержание и ремонт капитальных горных выработок в общей номенклатуре приведенных затрат при добыче полезных ископаемых в различных отраслях горной промышленности.

Удельные затраты на поддержание капитальных выработок резко возрастают в случае наступления аварийных ситуаций в вертикальных стволах, приводящих к их длительной остановке, при этом частота наступления таких

событий возрастает с ростом глубины стволов и сроком их безремонтной эксплуатации [3].



а)



б)

Рисунок 1.1.1 – Графики изменения:

а) средней глубины стволов, м; б) удельной доли затрат на поддержание и ремонт капитальных горных выработок, %

В этой связи особую актуальность приобретают вопросы качественной оценки остаточного ресурса конструкций крепи и армировки глубоких вертикальных стволов, а также выбор и обоснование оптимальных управляющих воздействий по восстановлению работоспособности стволов в увязке с эксплуатационной деятельностью горного предприятия.

В нашей стране комплексное изучение данных вопросов в последние 20 лет практически не приводилось.

Так можно упомянуть монографию [3], в которой рассмотрены основные практические вопросы, связанные с выбором технических и технологических решений по текущему, капитальному ремонту и реконструкции стволов в зависимости от их технического состояния.

Подробный анализ причин нарушений крепи и деформаций армировки шахтных стволов приведен в работе [4]. На его основе предложена классификация возможных технологических решений по реконструкции стволов (рис. 1.1.2), наглядно отражающая многовариантность применения возможных технических и технологических решений. Не смотря на это, в работе отмечена целесообразность дальнейшего совершенствования способов и технологических схем реконструкции вертикальных стволов, а также необходимость внедрения новых конструкций крепи и жесткой ремонтнопригодной армировки.

В развитие этого вывода Ягодкиным Ф.И. и Прокоповым А.Ю. также предложены технические решения по ликвидации закрепных пустот в стволах. Отмечено, что применение технологий с высоким давлением нагнетания приводит к тому, что существующая крепь испытывает многократно повторяющиеся растягивающие и сжимающие усилия [5].

Подобная проблема привела к возникновению крупной аварии в стволе ВСС на руднике «Октябрьский» Заполярного филиала ПАО ГМК «Норильский Никель». Разрушение крепи и прорыв воды в процессе ремонтных работ привел к его остановке и последующей ликвидации.

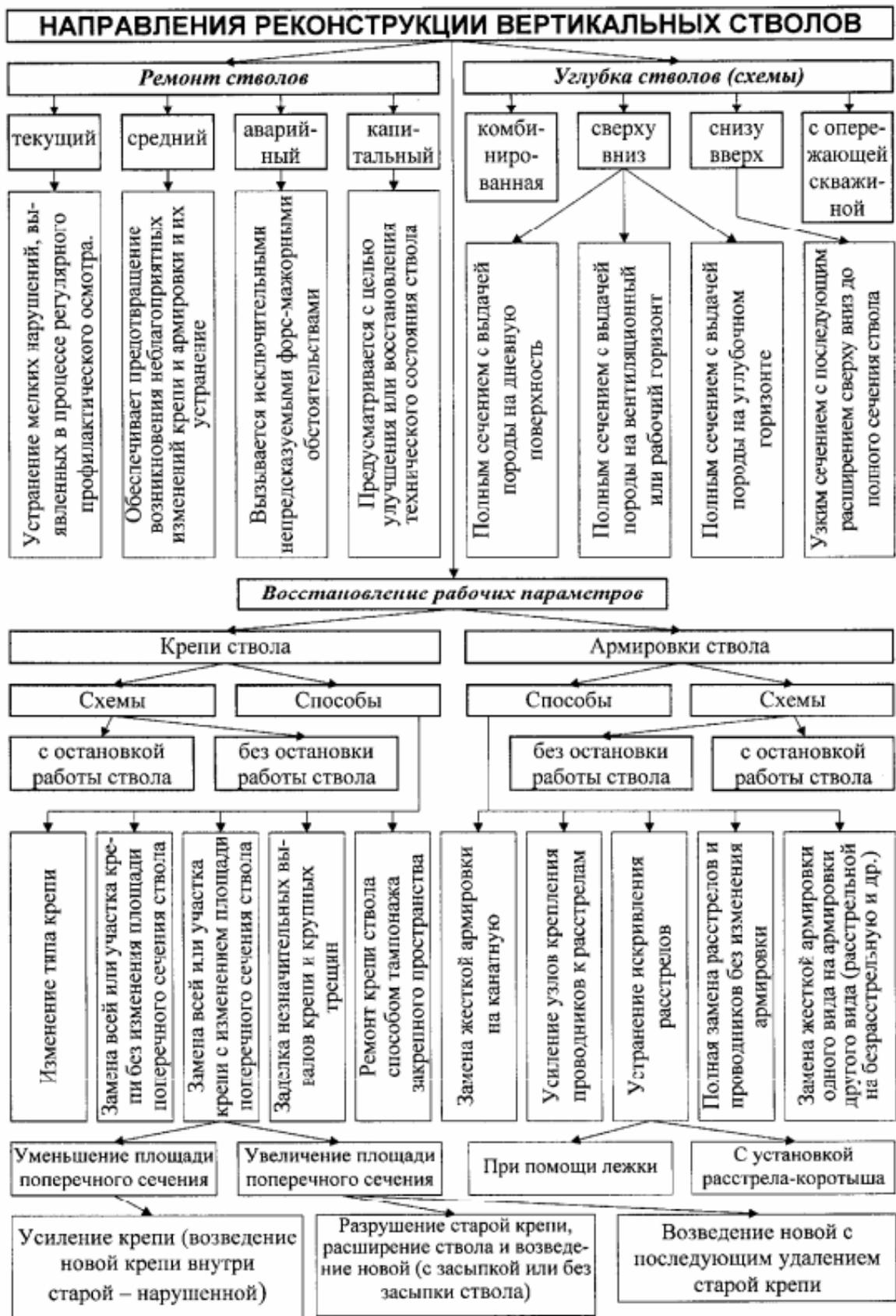


Рисунок 1.1.2 – Классификация схем и способов реконструкции  
ШАХТНЫХ СТВОЛОВ

Многие учёные и специалисты подчеркивают крайне негативное влияние процесса искривления ствола от проектной вертикальной оси [3,6,7]. Он происходит в результате сдвижений околоствольных пород вследствие влияния горных работ, геологических нарушений, тектонических и сейсмических процессов и др. Искривление ствола приводит к развитию критических дефектов в крепи и армировке, нарушениям работоспособности стволового подъема, а возможно и полному переходу ствола в аварийное состояние.

Прочие дефекты крепи и армировки могут быть обусловлены проектными ошибками, нарушениями технологии работ, различными проявлениями горного давления [8-9], коррозионными процессами и природно-климатическими факторами [10] и др. Систематизация основных причин потери работоспособности стволов выполнена в работе [4] и приведена в виде блок-схемы на рис. 1.1.3.

В целом, разработка и обоснование технических решений по ремонту крепи и армировки стволов базируется на ранее выполненных обследованиях выработок и оценки их технического состояния. Основным нормативным документом, регулирующим производство данных работ, является нормативный документ РД 03-422-01 [11]. Теоретические и практические рекомендации руководящего документа основаны на методологических предпосылках метода экспертных оценок и предполагают применение минимального набора инструментальных исследований крепи и армировки. Выделяется пять категорий технического состояния ствола по степени критичности дефектов, при этом искривленные стволы выделяются в отдельную V-ю группу.

В более современных методиках данный подход считается устаревшим, при этом подчеркивается целесообразность использования линейных и нелинейных моделей прогноза остаточного ресурса конструкций, а также современного математического аппарата теории надежности [12].



Рисунок 1.1.3 – Классификация факторов, снижающих работоспособность стволов, эксплуатирующихся в различных условиях

Теоретические аспекты применения математического аппарата теории надежности для оценки технического состояния стволов кратко рассмотрены

в работе [13]. В частности, обоснован интегральный показатель надежности строительства ствола, определяемый уровнем готовности его отдельных структурных элементов и обоснован оптимальный интервал его варьирования. В тоже время практическая реализация предложенного метода осталась не рассмотренной.

Примеры реализации современных геотехнологий в области ремонта крепи и армировки вертикальных стволов описаны в работе [14]. В качестве эффективных решений выделены применение узлов жесткой армировки с креплением анкерами, использование сборных железобетонным клиновидных блоков для перекрепления ствола.

В статье [15] представлены результаты численного моделирования крепи шахтных стволов с учетом конструктивных дефектов его структуры с различными геометрическими параметрами. Результаты расчетов, представленные в виде распределений главных напряжений и коэффициента прочности, позволили определить характерные участки в сечении крепи, которые имеют наименьший запас прочности. Также проанализировано влияние ширины и глубины дефектов на динамику возникновения растягивающих напряжений и даны рекомендации по повышению коэффициента прочности крепи.

Точность оценки технического состояния подземного сооружения с большим сроком эксплуатации значительно возрастает при проведении многолетних периодических натуральных инструментальных наблюдений за изменениями напряженно-деформированного состояния (НДС) крепи и породного массива [17,18]. Например, зная закономерности снижения экстремальных значений напряжений в тубинговой крепи шахтных стволов, обусловленных взаимными перемещениями структурных блоков окружающего скального массива в условиях его запредельного деформирования, можно обосновать эффективные методы управления горным давлением при строительстве выработок в высоконапряженных скальных породных массивах [19,20]. Не менее, если не более важным, понимание этого механизма необ-

ходимо для разработки технических и технологических решений по ремонту крепи и армировки.

На помощь здесь также приходят геофизические методы исследований. Наиболее широко для обследования шахтных стволов применяются георадиолокационные и акустические методы. Так в результате георадиолокационных исследований удастся выявить дефекты и аномалии в крепи и закрепном пространстве, позволяющие сделать вывод о фактической несущей способности конструкций [21]. На основании обработки акустических исследований состояния и свойств околоствольного пространства шахтного ствола калийного рудника определяется положение зон повышенной циркуляции пластовых вод в околоствольном массиве, что для предприятий калийной промышленности имеет первостепенную важность [22].

В целом, совершенствование существующих методов оценки технического состояния стволов является весьма актуальным и требует применения эффективных подходов, включая современный аппарат геомеханики и строительной геотехнологии, теории вероятности и математической статистики. Анализ основных аспектов их реализации применительно к объекту диссертационного исследования приводится далее. При этом основное внимание уделяется вопросам проектирования и расчета крепи стволов с учетом их технического состояния. Как одного из главных факторов эффективности дальнейшего применения геотехнологий с целью восстановления работоспособности вертикальных стволов.

## 1.2 СОВРЕМЕННЫЕ ПОДХОДЫ К ОЦЕНКЕ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ СТВОЛОВ И ПЕРСПЕКТИВНЫ ИХ ДАЛЬНЕЙШЕГО РАЗВИТИЯ

Как уже отмечено ранее, в настоящее время основным нормативным документом в части оценки технического состояния эксплуатационных вертикальных стволов является руководящий документ Ростехнадзора [11]. При более широком взгляде на проблематику оценки состояния зданий и соору-

жений в Российской Федерации, можно отметить большое многообразие применяемых методов и разработанных методик разного уровня [12-30].

Обобщая эти нормативные документы, можно отметить, что в них содержатся рекомендации по определению следующих показателей объекта обследования:

1. Ранжированная оценка технического состояния.
2. Величина остаточного ресурса.
3. Остаточная несущая способность.
4. Прогнозный срок эксплуатации.
5. Уровень риска наступления аварийного события.

Для получения указанных показателей в ряде случаев применяется апробированный математический аппарат теории надежности и теории рисков с использованием стандартных положений теории вероятностей и математической статистики. Наиболее комплексно современные методы оценки технического состояния проработаны для поверхностных зданий и сооружений, не требующих глубокого анализа сопутствующих сред: окружающего, структурно неоднородного породного массива, зон геологических нарушений примыкающих и близко расположенных выработок и др.

Для глубоких вертикальных стволов рассмотрение сопутствующих сред при обследовании является обязательным, так как по своей протяженности они пересекают различные слои горных пород и подвергаются воздействию меняющихся в широком диапазоне нагрузок. Таким образом задача по оценке технического состояния стволов разделяется на две основные составляющие:

1. Исследование фактических параметров конструкций ствола.
2. Исследование околоствольного массива пород с уточнением параметров фактических нагрузок и воздействий на крепь.

В РД 03-422-01 [11] по сути выполняется анализ только первой составляющей, а о второй судят в основном по косвенным признакам: реализованным деформациям крепи, вывалам, степени искривления ствола и др.

Для уточненной оценки дополнительно выполняются проверочные расчёты крепи и оценки устойчивости массива.

Вопросам оценки технического состояния подземных сооружений, исследованию породных массивов в окрестности горных выработок, определению параметров напряженно-деформированного состояния системы «крепь–массив» посвящено большое количество работ отечественных и зарубежных ученых и специалистов.

Здесь также нужно отметить что, существующие методы расчета крепи стволов и оценки их устойчивости разработаны преимущественно для объектов нового строительства. Их комплексный анализ выполнен в работе [31]. Отмечено, что действующие сегодня в Российской Федерации нормативные документы значительно устарели, при этом широкие перспективы открываются при применении расчетно-экспериментальных методов расчетов крепи и оценки устойчивости выработок.

К таким, например, относятся зарубежные методы оценки устойчивости горизонтальных и наклонных горных выработок, в основу которых заложены такие параметры, как показатель качества массива  $RQD$ , индекс геологической прочности  $GSI$ , рейтинговые классификации массива  $RMR$  Бенявского З. и Лобшера Д. и др. [32-35]. Теоретические предпосылки применения указанных методов хорошо известны и здесь отдельно не приводятся. На их базе в настоящее время разработаны, апробированы и успешно внедрены инструкции и методики для оценки устойчивости горизонтальных и наклонных выработок, выбора и расчета крепи для всех крупнейших горных предприятий Норильского никеля, АК «Алроса», ФосАгро, УГМК и др. Пример графика определения типа крепи в зависимости от балльной величины категории устойчивости приведен на рис. 1.2.1 [36].

Представляет интерес адаптация этого подхода и для оценки устойчивости эксплуатационных вертикальных стволов с большим сроком службы, так как действующая в настоящее время методика определения категорий

устойчивости стволов адекватно может применяться только для строящихся вертикальных горных выработок [37,38].

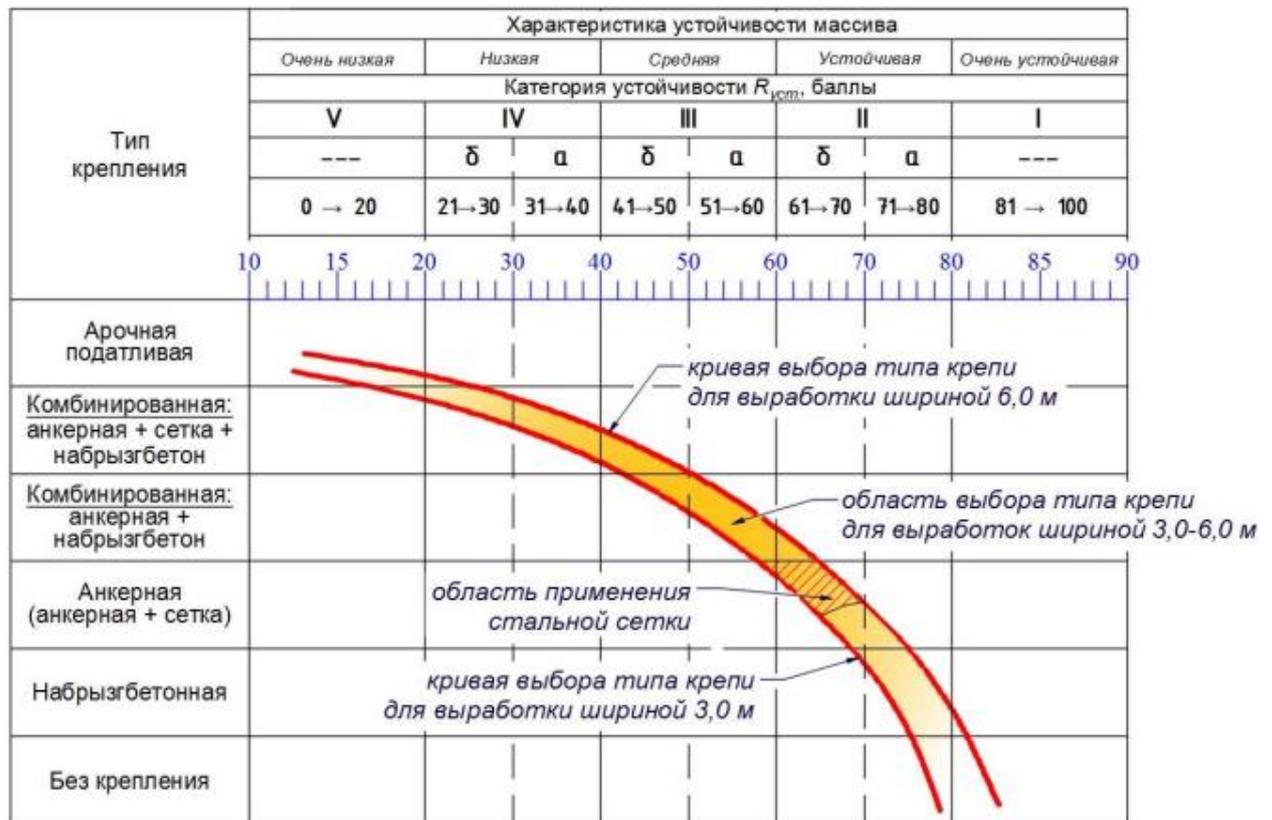


Рисунок 1.2.1 – Пример графика определения типа крепи выработок [36]

Отмеченный ранее недостаток РД 03-422-01 [11] в части достаточно тривиального и не всегда достоверного определения категории технического состояния может быть устранен при переходе на интегральные критерии оценки технического состояния с весовым ранжированием дефектов и нарушений конструкций. На этом методе основана в частности методика оценки технического состояния автодорожных тоннелей [25], в последствии также адаптированная для железнодорожных тоннелей с большим сроком эксплуатации [39]. В общем виде величина интегрального критерия может быть представлена в виде выражения:

$$D_{\Sigma} = F(\sum_{i=1}^n W_n \cdot D_n), \quad (1.2.1)$$

где  $W_n$  – весовой коэффициент влияющего параметра;

$D_n$  – количественное значение параметра [40];

В работе Войнова И.В. [39] также рассмотрены вопросы определения индекса надежности обделки на основе вероятностного подхода с применением метода Монте-Карло и реализацией стратегии уменьшения модуля упругости. Пример полученного результата для различных шагов итерации приведён на рис. 1.2.1.

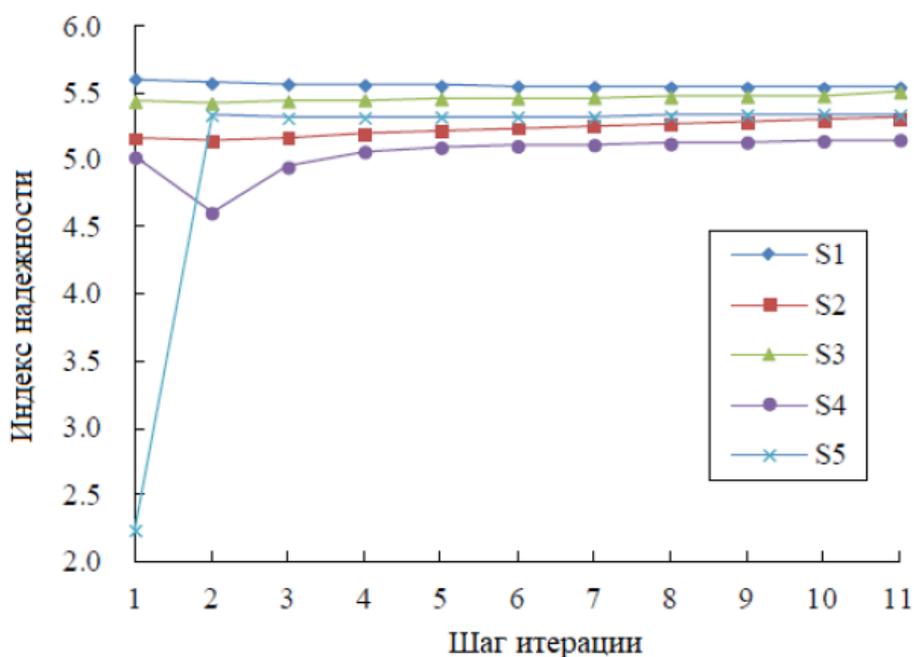


Рисунок 1.2.2 – Графики изменения индекса надежности тоннельной обделки на различных шагах итерации [39]:

S1 – S5 – различные участки сечения обделки

Не подвергая сомнению правомочность применения вероятностного подхода в части оценки технического состояния стволов с большим сроком эксплуатации отметим, что сложность его эффективного применения обуславливается большим числом влияющих факторов.

Тоже самое можно сказать и о применении методик, основанных на теории рисков. Известно, что при их выборе следует отдавать предпочтение повторяемым и проверяемым методам, позволяющим определить формы реализации опасностей и пути снижения риска [39,41].

Уровень риска наступления аварийного состояния в столе может быть выражен в виде:

$$R = Prob(F) \cdot C, \quad (1.2.2)$$

где  $Prob(F)$  – вероятность наступления аварийной ситуации в стволе;

$C$  – тяжесть события (стоимость ремонтно-восстановительных работ в стволе).

Расчетное значение  $Prob(F)$  позволяет далее выполнить ранжирование уровня рисков, например по простейшей четырехуровневой шкале (рис. 1.2.3).

Вероятность повреждений	Серьезность повреждений		
	Легкие	Умеренные	Сильные
Очень маловероятно	Очень низкий риск	Очень низкий риск	Высокий риск
Маловероятно	Очень низкий риск	Средний риск	Очень высокий риск
Вероятно	Низкий риск	Высокий риск	Очень высокий риск
Очень вероятно	Низкий риск	Очень высокий риск	Очень высокий риск

Рисунок 1.2.3 – Пример таблицы ранжирования рисков

При необходимости и наличии необходимых исходных данных далее реализуется алгоритм управления риском и разработка мер по его митигации (рис. 1.2.4).

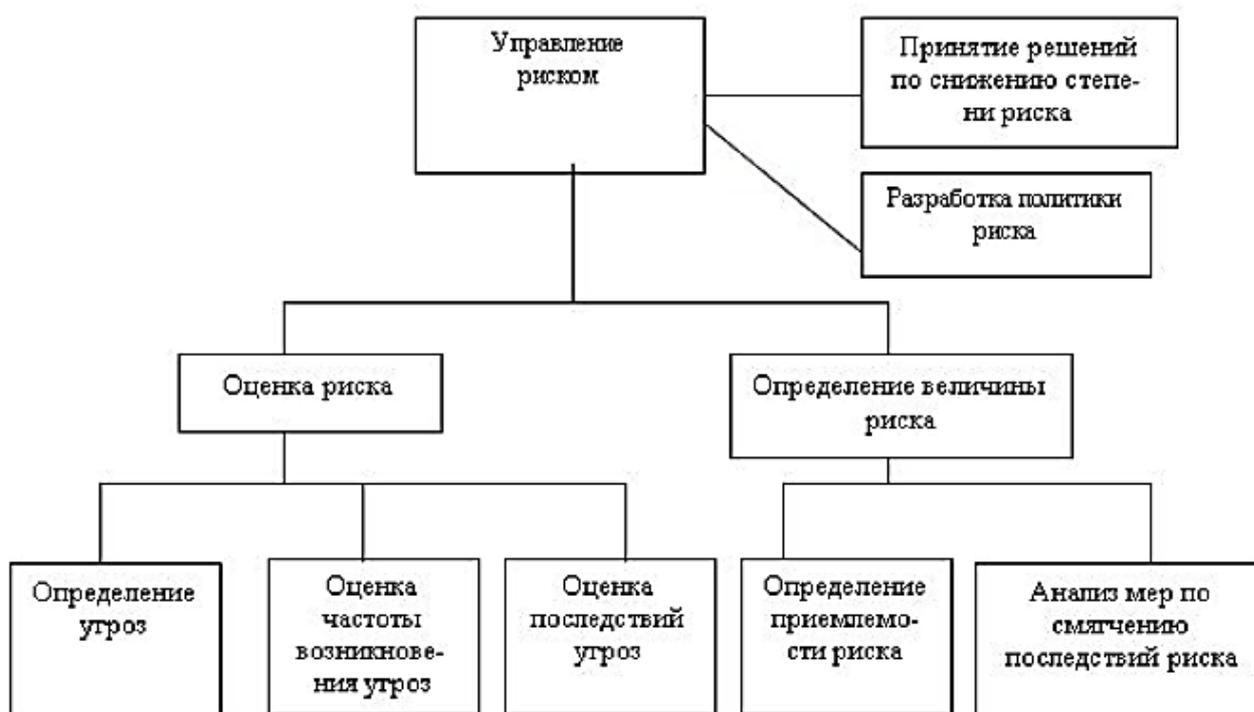


Рисунок 1.2.4 – Процесс оценки и управления риском [39, 41]

Сдерживающим фактором применения основанных на теории надежности и теории рисков методов оценки технического состояния при анализе глубоких вертикальных стволов с большим сроком службы является высокая вариативность горнотехнических условий их эксплуатации, не позволяющая применять единые унифицированные подходы даже в ходе изучения одного объекта. Более простым с точки зрения теоретического обоснования и практической реализации представляется метод, основанный на интегральных критериях с ранжированием дефектов и нарушений крепи и армировки по степени тяжести.

Параллельная оценка фактической устойчивости околоствольного массива с использованием надежных экспериментальных данных позволяет обеспечить эффективный выбор технических и технологических решений по восстановлению работоспособности стволов в необходимых случаях.

### 1.3 ГЕОМЕХАНИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ВЫБОРА ТЕХНИЧЕСКИХ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ ПРИ РЕМОНТЕ И РЕКОНСТРУКЦИИ ВЕРТИКАЛЬНЫХ СТВОЛОВ

Возможность и необходимость использования различных технологических схем ремонта и реконструкции, а также строительных материалов и конструкций в глубоких вертикальных стволах определяется горно-геологическими, гидрогеологическими, климатическими и техногенными условиями.

Наибольшая доля дефектов в стволах приходится на монолитную бетонную крепь, в которой в процессе длительной эксплуатации образуются трещины, отслоения, заколы, вывалы, участки выдавливания и нарушения контакта «крепь – породный массив». Формирование этих дефектов приводит к постепенному снижению несущей способности и водонепроницаемости конструкции крепи и необходимости выполнения соответствующих ремонтных работ.

Восстановление нарушенных участков крепи на практике часто осу-

ществляют путём установки анкеров, металлических листов с заделкой вывалов, однако такая крепь усиления характеризуется достаточно низкой долговечностью [4,42].

Весьма перспективным направлением при ремонте крепи является применение высокоэффективных составов бетона и при постоянном геотехническом мониторинге состояния системы «крепь – массив» [42], а также применение комбинированного крепления на основе набрызгбетона и анкеров [43].

Внедрение гибридных составов фиброторкретбетона, характеризующихся высокой устойчивостью к изгибающим и растягивающим деформациям, позволяет повысить долговечность и несущую способность конструкций крепи [44], однако в сложных условиях может потребоваться полное или частичное перекрепление ствола с применением традиционной или облегченной тубинговой крепи с высокой несущей способностью [45]. То есть выполняется уже полноценная реконструкция ствола с заменой существующей крепи на более мощную.

Следует также подчеркнуть важность решения проблемы реконструкции шахтных подъемов. Свыше 90 % подъемных установок, используемых на отечественных горных предприятиях, относятся к устаревшему типу с одноканатным барабанным приводом и при этом имеют высокую степень износа. Описание ряда эффективных решений по модернизации шахтного подъема представлено в работах [46,47], однако их промышленная реализация сдерживается из-за отсутствия обоснованных рекомендаций по конструктивному оформлению и расчету основных параметров оборудования.

Искривление ствола также сопровождается деформациями крепи, армировки и нарушением нормального режима работы шахтного подъема. В проектируемых в настоящее время конструкциях крепи и армировки в ряде случаев применяются компенсационные элементы, однако их параметры не всегда правильно выбраны и обоснованы, а их долговечность в агрессивной среде весьма низкая [6].

Работы по ремонту крепи и армировки стволов производятся в условиях непрерывно действующего производства, что накладывает дополнительные ограничения при выборе необходимых технических и технологических решений [48,49]. Окончательное решение должно приниматься на основании технико-экономического сравнения вариантов с учетом причин, приведших к аварийному состоянию сооружения, объемов работ и сроков дальнейшей службы реконструируемого или восстанавливаемого ствола.

Строительные геотехнологии, применяющиеся для реконструкции и восстановления шахтных стволов с большим сроком должны комплексно учитывать реальное состояние существующей крепи, околоствольного массива и протекающие процессы их взаимодействия, не характерные для нового строительства [49,50].

В ходе производства работ по ремонту и реконструкции в стволе формируется новая геомеханическая система «новая крепь – существующая крепь – породный массив», при этом в последнем элементе зачастую произошли существенные техногенные изменения, приведшие к его дезинтеграции. Рассмотрение взаимодействия такой системы необходимо на стадии обоснования проектных решений для выбора адекватных управляющих воздействий на ее элементы и обоснования окончательных параметров конструкций.

Как известно, геомеханические расчеты могут выполняться точными аналитическими и приближенными численными методами. Научно-практическая база их применения создана усилиями упомянутых ранее ведущих отечественных ученых и специалистов, а обстоятельные анализы теоретических, эмпирио-аналитических и инженерных подходов к решению задач по оценке устойчивости выработок, изучению проявлений горного давления, расчету различных конструкций крепи представлены в научных и учебных изданиях [51-66].

Практические вопросы взаимодействия крепи и породного массива в вертикальных стволах на различных этапах их строительства и эксплуатации рассмотрены в работах [67-71]. Их анализ позволяет утверждать, что воз-

возможности применения аналитических методов расчёта для решения геомеханических задач по оценке напряженно-деформированного состояния многослойных конструкций крепи в неоднородных породах весьма ограничены.

На помощь здесь математические методы, реализуемые с помощью современных программных комплексов., при этом наибольшую популярность среди других получил метод конечных элементов (МКЭ) [72-76]. В России сертифицированы и применяются в настоящее время такие комплексы как MIDAS FEA NX, PLAXIS, ABAQUS, ANSYS, FIDESYS и др. Теоретические и паратактические предпосылки применения данных программ и метода конечных элементов в целом для решения геомеханических задач общеизвестны и здесь подробно не приводятся. Следует только отметить, что большое влияние на точность полученных результатов оказывает правильный выбор модели деформирования горных пород. Классификация применяющихся сегодня в расчетах основных моделей приведена на рис. 1.3.1 [76,77].



Рисунок 1.3.1 – Классификация моделей горных пород, применяющихся в геомеханических расчетах МКЭ

Изучение напряженно-деформированного состояния такой геотехнологической системы как реконструируемый глубокий вертикальный ствол требует применения комплексного, многофакторного подхода. Качественная калибровка модели, задание граничных условий и свойств ее элементов возможны только при наличии достоверных данных, полученных экспериментальным путем в натуральных условиях. При этом в случае неоднородности и техногенной нарушенности пород околоствольного массива задачу необходимо решать в пространственной постановке, что приводит к значительному росту трудоемкости подготовки МКЭ модели и временных затрат на выполнение вычислительных процедур. Разработка таких моделей является одной из задач настоящего диссертационного исследования.

#### 1.4 Выводы. Цель и задачи исследования

По результатам выполненного анализа состояния вопроса сформулированы цель и дальнейшие задачи диссертационной работы:

**Цель работы:** обоснование методики оценки технического состояния и технологических схем реконструкции глубоких вертикальных стволов, позволяющих повысить технико-экономические показатели и обеспечить комплексную безопасность горнопроходческих работ.

#### **Задачи исследования:**

- теоретическое обоснование и разработка методики оценки технического состояния глубоких вертикальных стволов с большим сроком эксплуатации;
- экспериментальная апробация методики в реальных шахтных условиях для оценки технического состояния глубоких вертикальных стволов;
- разработка эффективных технологических схем реконструкции глубоких вертикальных стволов и их внедрение на практике.

## **2 РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ОЦЕНКИ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ШАХТНЫХ СТВОЛОВ**

### **2.1 ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ**

Развитию геомеханических методов изучения поведения породных массивов в окрестности стволов и подземных горных выработок посвящены новейшие исследования отечественных и зарубежных ученых. Отмечается, что наиболее точное понимание процессов изменения напряженно-деформированного состояния (НДС) породных массив на различных этапах эксплуатации стволов обеспечивается при использовании прямых и косвенных геомеханических методов по определению НДС в сочетании с геофизическими методами и математическим моделированием исследуемых горно-технических систем в плоской и пространственной постановке задачи. Математическое моделирование при оценке технического состояния стволов применяется для решения различных задач, в том числе и для прямой количественной оценки влияния параметров выявленных дефектов на запас несущей способности крепи.

Комплексность подхода к оценке технического состояния стволов может проявляться как в рассмотрении всех стадий его жизненного цикла, так в применении многофакторных моделей и систем оценки, базирующихся на принципах иерархии анализа, энтропии и межкритериальной корреляции.

Итогом работ по оценке технического состояния стволов должны стать конкретные рекомендации по восстановлению работоспособности крепи на участках, где это необходимо. Перспективным сегодня считается внедрение высокоэффективных гибридных составов фиброторкретбетона, характеризующихся высокой устойчивостью к изгибающим и растягивающим деформациям, а в наиболее сложных ситуациях может потребоваться полное или частичное перекрепление ствола с применением традиционной или облегченной тубинговой крепи с высокой несущей способностью.

В диссертационной работе на основании выполненного анализа состояния вопроса, а также опираясь на классические труды наиболее авторитетных ученых в области геомеханики и строительной геотехнологии, предлагается методика оценки технического состояния шахтных стволов, которая предусматривает выделение трех этапов и трех уровней обследовательских работ на объекте.

Выделяемые этапы оценки технического состояния:

I – Определение фактических параметров системы «крепь – породный массив».

II – Определение фактического запаса несущей способности крепи и устойчивости околоствольного массива пород.

III – Определение поинтервальных и обобщенных критериев технического состояния ствола.

Уровни обследования шахтных стволов:

Уровень № 1 – поверхностный, реализуемый визуально-аналитическими методами.

Уровень № 2 – приконтурный, реализуемый инструментально-техническими и неразрушающими методами.

Уровень № 3 – глубинный, реализуемый геологическими, геомеханическими и геофизическими методами.

Последовательность реализации методики обобщена в табл. 2.1.1.

При ее разработке учтены научно-методические предпосылки, содержащиеся в известных рейтинговых классификациях горных пород [78], действующие отраслевые методики по оценке устойчивости и выбору крепи горизонтальных и наклонных выработок [36,79,80], а также по оценке технического состояния подземных сооружений [25,39].

Таблица 2.1.1 – Этапы и уровни реализации методики оценки технического состояния шахтных стволов

Уровни	Этапы оценки технического состояния		
	I	II	III
1	Анализ архивных данных. Визуальное обследование и замеры геометрических параметров дефектов. Маркшейдерская профилировка. Составление дефектной ведомости и схемы дефектов.	Определение геометрических параметров расчетных моделей. Расчеты крепи с учетом фактических геометрических параметров конструкций.	Разбивка ствола на характерные интервалы по фактическим геометрическим параметрам.
2	Определение фактической прочности крепи и толщины крепи. Выявление внутренних дефектов.	Измерение напряжений в крепи, величин нагрузок и воздействий. Верификация расчетных моделей, выполнение проверочных расчетов по несущей способности.	Разбивка ствола на характерные интервалы по показателю запаса несущей способности крепи.
3	Определение степени нарушенности околоствольного массива. Уточнение структуры и физико-механических характеристик пород. Определение водопритоков.	Определение направления и величин напряжений в околоствольном массиве пород. Калибровка расчетных моделей. Оценка устойчивости околоствольного массива пород.	Разбивка ствола на характерные интервалы по горнотехническим и геомеханическим критериям. Составление сводной поинтервальной карты обследования. Определение критериев технического состояния по интервалам ствола. Определение интегрального критерия технического состояния сооружения.

## 2.2 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ИНТЕГРАЛЬНЫХ КРИТЕРИЕВ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ СТВОЛА

Техническое состояние шахтных стволов оценивается с помощью предложенных интегральных критериев, базирующихся на результатах обследования ствола и расчетов несущей способности конструкций крепи.

Выявленные дефекты крепи и армировки ствола ранжируются по категориям критичности в соответствии указаниями, приведенными в табл. 2.2.1.

Таблица 2.2.1 –Классификация дефектов ствольных конструкций [25,39]

№ п/п	Вид дефекта	Категория критичности	Коэффициент ранжирования
Дефекты, снижающие несущую способность			
1.	Искривление ствола, в том числе препятствующее движению подъемных сосудов*	A	1,0
2.	Вывалы пород, заколы	A	1,0
3.	Сквозные трещины в бетоне крепи с признаками ее деформации	A	0,9
4.	Прочность бетона крепи на 30% и более ниже проектной	A	0,95
5.	Сквозные вывалы на всю толщину крепи площадью более 1,5 м <sup>2</sup>	A	0,95
6.	Уменьшение фактической толщины крепи на 30% и более	A	0,95
7.	Косые, дугообразные трещины с возможностью вывала с выдвиганием бетона внутрь ствола на 10 мм и более	B	0,85
8.	Выдавливание внутрь ствола крепи с возможностью вывала	B	0,85
9.	Уменьшение фактической толщины крепи на 10 - 30%	B	0,8
10.	Деформации расстрелов, проводников армировки	B	0,8
11.	Наклонные и криволинейные трещины с большим раскрытием	C	0,8
12.	Вывал бетона крепи несквозной с образованием полости в пределах толщины крепи	C	0,8
13.	Внутренние неоднородности в бетоне крепи размером не менее 0,5 толщины крепи	C	0,8
14.	Уменьшение фактической толщины крепи до 10%	C	0,75
15.	Поперечные трещины в холодных и деформационных швах, раскрытием более 0,2 мм, в том числе увеличивающиеся, при наличии обводнения	D	0,6
16.	Деструктивный бетон крепи - размороженный или выщелоченный, разбирающийся вручную, глубиной более 20 мм	D	0,5

№ п/п	Вид дефекта	Категория критичности	Коэффициент ранжирования
17.	Разрушение заделки армировки	D	0,5
18.	Раковины и каверны на поверхности крепи глубиной более 20 мм	D	0,3
Дефекты, снижающие водонепроницаемость			
1.	Сквозные течи из трещин, вывалов	A	0,95
2.	Течи по стыкам заходок крепи	B	0,7
3.	Участки отдельного капежа	D	0,5

\*Примечание: в случае значительного искривления ствола, не позволяющего осуществлять дальнейшую эксплуатацию шахтного подъёма, ствол признается аварийным.

По итогам обработки данных определяется интегральный критерий технического состояния ствола:

$$K = \frac{k_H(\sum k_{A_i}A_i + \sum k_{B_i}B_i + \sum k_{C_i}C_i + \sum k_{D_i}D_i)}{H}, \quad (2.2.1)$$

где  $k_{A_i}, k_{B_i}, k_{C_i}, k_{D_i}$  – коэффициенты ранжирования дефектов;

$A_i, B_i, C_i, D_i$  – количество дефектов соответствующей категории критичности;

$H$  – глубина ствола, м;

$k_H$  – размерный коэффициент, принимается равным  $k_H = 100$  м.

На следующем этапе определяется критерий снижения несущей способности крепи ствола по формуле:

$$K_N = \frac{N_{1c,n}}{N_{1c,0}}, \quad (2.2.2)$$

где  $N_{1c,n}, N_{1c,0}$  – соответственно коэффициенты запаса несущей способности крепи ствола, определенные по результатам обследования и проектные величины.

По итогам расчетов техническое состояние ствола оценивается в соответствии с указаниями табл. 2.2.2 с выделением работоспособного, ограниченно работоспособного и неработоспособного технических состояний.

Таблица 2.2.2 – Классификация категорий технического состояния ствола

Величина $K_I$	Величина $K_N$	Категория	Техническое состояние	Вид технического состояния
> 20	< 0,7	5	Аварийное	Неработоспособное
$\leq 20 \div > 14$		4б	Предаварийное	
$\leq 14 \div > 11$	$\geq 0,7$	4а	Неудовлетворительное	Ограниченно работоспособное
$\leq 11 \div > 7$		3	Удовлетворительное	
$\leq 7 \div > 4$		2	Хорошее	Работоспособное
$\leq 4$		1	Отличное	

Техническое состояние позволяет судить о степени сложности проблемы при выборе дельнейших проектных решений по восстановлению работоспособности ствола, а с учетом вида технического состояния принимается незамедлительное решение о возможности дальнейшей эксплуатации ствола до проведения ремонтно-восстановительных мероприятий.

### 2.3 ОЦЕНКА УСТОЙЧИВОСТИ ОКОЛОСТВОЛЬНЫХ ПОРОД СТОЛОВ С БОЛЬШИМ СРОКОМ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Третий (глубинный) уровень обследования ствола направлен на комплексную оценку свойств техногенно измененного околоствольного массива пород.

СП 91.13330.2012 регламентирует расчет устойчивости массива только для проектируемых шахтных стволов, при этом в зависимости от категории устойчивости массива рекомендует применение различных типов крепей, с дальнейшим определением их геометрических и прочностных параметров. В нашем случае стоит задача по обоснованию критерия устойчивости для эксплуатационного ствола с существующей крепью, что вызывает необходимость рассмотрения и учета таких факторов, как срок службы выработок, влияние техногенной нарушенности и качества «контакта «крепь – массив» и др.

На основании анализа влияющих факторов и аналогичных методик для подземных горных выработок предложен количественный критерий устойчивости следующего вида:

$$U = (P_1 + P_2 + P_3 + P_4 + P_5) \cdot k_{\Pi}, \quad (2.3.1)$$

где  $P_1$  – показатель относительной прочности пород на одноосное сжатие;

$P_2$  – показатель, учитывающий выход керна ( $RQD$ );

$P_3$  – показатель, учитывающий качество контакта «крепь – массив»;

$P_4$  – показатель, учитывающий условия обводненности ствола и околоствольных пород;

$P_5$  – показатель, учитывающий безремонтный срок службы ствола;

$k_{\Pi}$  – суммарный поправочный коэффициент, зависящий от конкретных горно-геологических условий (влияния на ствол очистных работ, тектонических напряжений и др.), изменяющийся в диапазоне  $k_{\Pi} = 0,1 - 0,3$ .

Показатель относительной прочности пород на одноосное сжатие определяется с учетом коэффициента напряженности околоствольного массива:

$$k_{\sigma} = \frac{\gamma \cdot H}{R_c}, \quad (2.3.2)$$

где  $\gamma$  – средний объемный вес вышележащей толщи пород, МН/м<sup>3</sup>;

$H$  – глубина заложения рассматриваемого участка ствола, м;

$R_c$  – предел прочности на сжатие околоствольного массива с учетом фактической трещиноватости:

$$R_c = R k_c, \quad (2.3.4)$$

$R$  – прочность пород на одноосное сжатие в образце, МПа;

$k_c$  – коэффициент структурного ослабления околоствольных пород, принимается в соответствии с указаниями табл. 2.3.1.

Таблица 2.3.1 – Характеристика интенсивности трещиноватости массива

Характеристика трещиноватости массива	Расстояние между трещинами $L_{ср}$ , см	Интенсивность трещиноватости $J_T$ , тр./м	Коэффициент структурного ослабления $k_c$
Интенсивная трещиноватость. Зоны тектонических разломов, массив раздроблен, пустоты в околоствольном массиве	до 10	> 11	0,05 ÷ 0,10
Очень высокая трещиноватость. Высокая степень нарушенности, в том числе техногенной	10 ÷ 20	6 ÷ 11	0,1 ÷ 0,2
Высокая трещиноватость	20 ÷ 40	5 ÷ 6	0,2 ÷ 0,3
Средняя трещиноватость	40 ÷ 60	4 ÷ 5	0,3 ÷ 0,5
Слабо развитая трещиноватость. Одна-две системы трещин	60 ÷ 100	2 ÷ 3	0,5 ÷ 0,7
Очень слабо развитая трещиноватость	110 ÷ 150	1 ÷ 2	0,7 ÷ 0,8
Неразвитая трещиноватость	150 ÷ 200	-	0,8 ÷ 0,9
Нетрещиноватые породы	> 200	-	0,9 ÷ 1,0

Величина параметра  $P_1$  принимается по таблице 2.3.2.

Таблица 2.3.2 – Показатель относительной прочности пород

Коэффициент $k_\sigma$	< 0,1	0,1 ÷ 0,3	0,3 ÷ 0,5	0,5 ÷ 0,7	> 0,7
Показатель $P_1$	25	20	15	10	5

Показатель, учитывающий выход керна (RQD) принимается по таблице 2.3.3.

Таблица 2.3.3 – Показатель, учитывающий выход керна

Выход керна RQD, %	90 ÷ 100	75 ÷ 90	50 ÷ 75	25 ÷ 50	< 25
Показатель $P_2$	20	17	13	8	5

Показатель, учитывающий качество контакта «крепь – массив», принимается по таблице 2.3.4.

Таблица 2.3.4 – Показатель, учитывающий качество контакта «крепь – массив»

Качество контакта «крепь – массив»	Показатель $P_3$
Нарушение контакта «крепь – массив» по протяженности участка ствола отсутствует	20
Нарушенный контакт «крепь – массив» (не более 10% протяженности участка)	17
Нарушенный контакт «крепь – массив» (10 - 30% протяженности участка)	14
Нарушенный контакт «крепь – массив» (более 30% протяженности участка)	10
Сплошное нарушение контакта «крепь – массив», пустоты за крепью	3

Показатель, учитывающий условия обводненности ствола и околоствольных пород, принимается по таблице 2.3.5.

Таблица 2.3.5 – Показатель, учитывающий условия обводненности ствола и околоствольных пород

Параметр	Интервалы значений				
	Нет	< 0,5	0,5 ÷ 3	3 ÷ 8	> 8
Водоприток на участке ствола, м <sup>3</sup> /час					
Общие условия	Сухой участок	Отдельные влажные места	Капез	Приток по отдельным стыкам заходок и нарушенным участкам	Интенсивной приток через крепь
Показатель $P_4$	20	17	13	8	2

Показатель, учитывающий безремонтный срок службы ствола принимается по таблице 2.3.6.

Таблица 2.3.6 – Показатель, учитывающий безремонтный срок службы ствола

Безремонтный срок службы ствола, лет	до 20	20 ÷ 30	30 ÷ 40	40 ÷ 50	свыше 50
Показатель $P_5$	8	6	4	2	0

По величине параметра  $U$  определяется категория устойчивости ствола на различных участках согласно табл. 2.3.7.

Таблица 2.3.7 – Характеристика устойчивости участка ствола по параметру  $U$

Параметр	Интервалы значений				
	$> 9$	$\leq 9 \div > 7$	$\leq 7 \div > 5$	$\leq 5 \div > 3$	$\leq 3$
Категория	I	II	III	IV	V
Степень устойчивости	Очень устойчивые	Устойчивые	Средней устойчивости	Низкой устойчивости	Очень низкой устойчивости
Описание участка ствола	Весьма прочные монолитные породы, водопроявления отсутствуют, хороший контакт «крепь – массив»	Прочные мало-трещиноватые породы; незначительные водопроявления; нарушенный контакт «крепь – массив» (не более 10% протяженности участка)	Трещиноватые породы средней прочности, водопроявления, нарушенный контакт «крепь – массив» (10 - 30% протяженности участка)	Трещиноватые породы низкой прочности, водопроявления, нарушенный контакт «крепь – массив» (более 30%)	Дезинтегрированный околоствольный массив, интенсивные водопроявления, нарушенный контакт «крепь – массив»

Областью применения приведенной в табл. 2.3.7 классификации являются участки стволов, пройденные в скальных породах, склонных преимущественно к хрупкому разрушению. Участки, расположенные в соляных породах, в несвязных, вечномерзлых и других специфических грунтах по критерию устойчивости  $U$  не оцениваются.

#### 2.4 ВЫБОР УПРАВЛЯЮЩИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ

Выбор необходимых управляющих воздействий осуществляется в соответствии рекомендациями, приведёнными в табл. 2.4.1.

Текущий ремонт осуществляется силами организации, эксплуатирующей ствол, и не требует разработки отдельных проектных решений стадии П.

Капитальный ремонт выполняется для восстановления проектных параметров крепи и прочих конструкций ствола без изменения их характеристик.

Технологические схемы реконструкции ствола предусматривают изменение проектных параметров ствола и основных несущих конструкций с целью обеспечения его работоспособности в изменившихся горно-геологических условиях.

Таблица 2.4.1 – Выбор управляющих воздействий по результатам обследования

Техническое состояние	Параметр $K_N$	Категория устойчивости				
		I	II	III	IV	V
1	$\geq 0,7$	Н	Н	Н	-	-
2		Н	ТР1	ТР2	ТР3	-
3		ТР1	ТР1, КР1	ТР2, КР2	ТР2, КР2, ТР3, КР3	ТР3, КР3
4а		ТР1, КР1	КР1	КР2	КР2, КР3	КР3
4б	$< 0,7$	-	Р1	Р2	Р2, Р3	Р2, Р3
5		-	-	Р2, Р3, Л/П	Р2, Р3, Л/П	Р3, Л

Условные обозначения:

Н – проведение ремонтных работ не требуется;

ТР1/КР1/Р1 – соответственно текущий ремонт дефектов крепи на отдельных участках/капитальный ремонт крепи ствола/реконструкция ствола с изменением проектных параметров крепи;

ТР2/КР2/Р2 – тоже с дополнительным анкерным упрочнением пород;

ТР3/КР3/Р3 – тоже с применением комплексных решений по упрочнению околоствольного массива (тампотаж, цементация и др.);

Л – ликвидация ствола;

П – перепроходка ствола с предварительной засыпкой;

прочерком обозначены маловероятные на практике состояния ствола.

## 2.5 ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 2

1. Разработана новая методика оценки технического состояния эксплуатационных стволов, учитывающая плотность поверхностных и внутренних повреждений в бетоне крепи, качества контакта «крепь – массив», разме-

ры зон дезинтеграции околоствольных пород, интенсивность водопритоков и величины отклонений оси и сечения ствола от проектного положения.

2. В рамках разработанной методики разработан алгоритм по определению значения критерия технического состояния глубокого вертикального ствола  $K$ . Его величина определяется с учетом суммарного количества ранжированных дефектов, характеризующих плотность и критичность поверхностных и внутренних повреждений крепи, качество контакта «крепь – массив», фактическую прочность и толщину крепи, интенсивность водопроявлений, а также величину отклонений оси и сечения ствола от проектного положения. При значениях  $K > 14$  и переходе крепи в запредельную стадию работы, состояние ствола следует оценивать как неработоспособное.

3. В составе разработанной методики разработан порядок оценки устойчивости околоствольных пород по пяти категориям с учетом показателей относительной прочности, качества керна, контакта «крепь – массив», обводненности и срока службы ствола, что обеспечивает ранжированный выбор необходимых управляющих воздействий. В стволах в неработоспособном техническом состоянии, основная протяжённость которых относится IV и V категориям устойчивости, требуется реконструкция с изменением проектных параметров.

4. Апробация и подтверждение достоверности разработанной методики, а также обоснование эффективных технологических схем реконструкции глубоких вертикальных стволов, находящихся в неработоспособном состоянии является дальнейшей целью диссертационного исследования.

### **3 АПРОБАЦИЯ МЕТОДИКИ ОЦЕНКИ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ВЕРТИКАЛЬНЫХ СТВОЛОВ**

#### **3.1 ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ**

На следующем этапе исследований выполнена детализация и апробация предложенной методики в натуральных шахтных условиях.

Эффективная реализация трех уровней обследовательских работ в глубоких вертикальных стволах вызывает необходимость обоснованного выбора технических средств диагностики крепи, армировки и околоствольного массива, разработку алгоритмов по их применению и критериев оценки и анализа получаемого массива данных.

Дальнейшее количественное и качественное прогнозирование технического состояния ствола, остаточного ресурса крепи, устойчивости околоствольного массива при временной и пространственной изменчивости свойств элементов геотехнологической системы и интенсивной эксплуатации выработок следует осуществлять с применением комплексного подхода, включающего не только натурные исследования, но и математическое моделирование геомеханических процессов и вероятностный анализ.

В соответствии с требованиями нормативных документов [24] перечень выполняемых при обследовании шахтного ствола работ включает в себя:

- разработку общей программы обследования шахтного ствола (состав, объемы, методы и последовательность выполнения работ);
- подготовительные работы к проведению обследования (ознакомление с объектом обследования, конструктивным решением, горно-геологическими данными, подбор и анализ проектно-технической документации, составление рабочей программы работ);
- визуальное обследование крепи и армировки на протяженной части ствола. а также в приствольных выработках (вентиляционных каналов, водотливных камер, камер загрузочных устройств, сопряжений с рабочими гори-

зонтами), с выявлением дефектов и повреждений по внешним признаками, их замерами и их фиксацией;

- детальное инструментальное обследование конструкций крепи и армировки, оценка степени коррозионного воздействия, определение реальных эксплуатационных нагрузок и воздействий, воспринимаемых обследуемыми конструкциями с учетом влияния деформаций, определение расчетных нагрузок на крепь шахтного ствола;

- анализ причин появления дефектов и повреждений в крепи с составлением дефектной ведомости;

- выполнение комплекса геофизических работ по оценке свойств и структуры околоствольного массива пород;

- выполнение натурных замеров напряжений в крепи ствола методами частичной разгрузки;

- камеральную обработку и анализ результатов инструментального обследования.

Данные исследования и полученные результаты являются основной для выполнения следующих этапов работ:

- математического моделирования с целью оценки фактического напряженно-деформированного состояния крепи и околоствольного массива пород;

- статистического анализа и вероятностных расчетов по оценке фактической несущей способности крепи и армировки;

- составления заключения по итогам комплексного обследования с выводами и рекомендациями о возможности дальнейшей эксплуатации ствола;

- разработки рекомендаций по ремонту и реконструкции вертикального ствола (в случае необходимости).

### 3.2 ВИЗУАЛЬНОЕ ОБСЛЕДОВАНИЕ СТВОЛА

Визуальное обследование крепи и армировки стволов позволяет выполнить предварительную оценку технического состояния выработки и уточнить программу последующего сплошного обследования с использованием уточненного перечня приборов и оборудования

Визуальное обследование производится в направлении сверху-вниз с откидных площадок скипов с применением средств фото- и видеофиксации и измерительных устройств.

В ходе визуального обследования выявляют и фиксируются видимые дефекты и повреждения крепи, армировки и других конструкций ствола и приствольных выработок, производятся контрольные обмеры. Измерение остаточной толщины механическим методом, фотографируются дефектные участки, составляются ведомости дефектов и повреждений с фиксацией их мест и характера, и карты-развертки ствола. Проводится проверка наличия характерных деформаций и повреждений крепи и армировки, свидетельствующих о запредельном режиме их работы. Устанавливается наличие аварийных участков, если таковые имеются.

По результатам обследования выполняется:

- разработка дефектной ведомости и карты дефектов шахтного ствола;
- определение мест отбора керна в крепи и околоствольном массиве;
- определение точек инструментальных замеров напряжений в крепи;
- определение мест детального обследования крепи методом ультразвуковой томографии;
- уточнение и дополнение программы инструментального обследования.
- Формирование ранжированной таблицы дефектов и предварительная оценка технического состояния вертикального ствола с учетом рекомендаций п. 2.2 диссертационной работы.

### 3.3 ИНСТРУМЕНТАЛЬНОЕ ИЗУЧЕНИЕ СТРУКТУРЫ И ПРОЧНОСТИ БЕТОННОЙ КРЕПИ

#### 3.3.1 Исследование внутренней структуры крепи и закрепного пространства методами ультразвуковой томографии

Детальное выборочное изучение внутренней структуры крепи ствола и закрепного пространства осуществляется ультразвуковыми томографами А1040 «MIRA» и А1020 MIRA Lite.

Измерительный блок автономного томографа включает в себя матричную антенную решетку из 48 низкочастотных широкополосных преобразователей поперечных волн с сухим точечным контактом и керамическими износостойкими наконечниками (рис. 3.3.1.1). Это обеспечивает их продолжительное использование по грубой поверхности бетонной крепи ствола без применения специальных контактных жидкостей или смазок. Номинальная рабочая частота антенной решетки томографа – 50 кГц.



Рисунок 3.3.1.1 – Ультразвуковой томограф А1040 MIRA

В приборе используется метод синтезированной фокусируемой апертуры с комбинационным зондированием, при котором происходит фокусировка ультразвука в каждую точку полупространства. Массив данных по внутренней структуре бетонной или железобетонной крепи формируется путем сбора информации со всех измерительных пар антенного устройства томографа. Принимаемые антенной решеткой сигналы, отраженные от неоднородностей крепи ствола или контакта «крепь – породный массив» об-

работываются процессором и программным обеспечением устройства непосредственно в ходе работы.

При проведении измерения необходим плотный контакт антенной решетки прибора с конструкцией крепи ствола (3.3.1.3), поэтому данные работы могут выполняться с проходческого полка либо откидных площадок клеток и скипов.

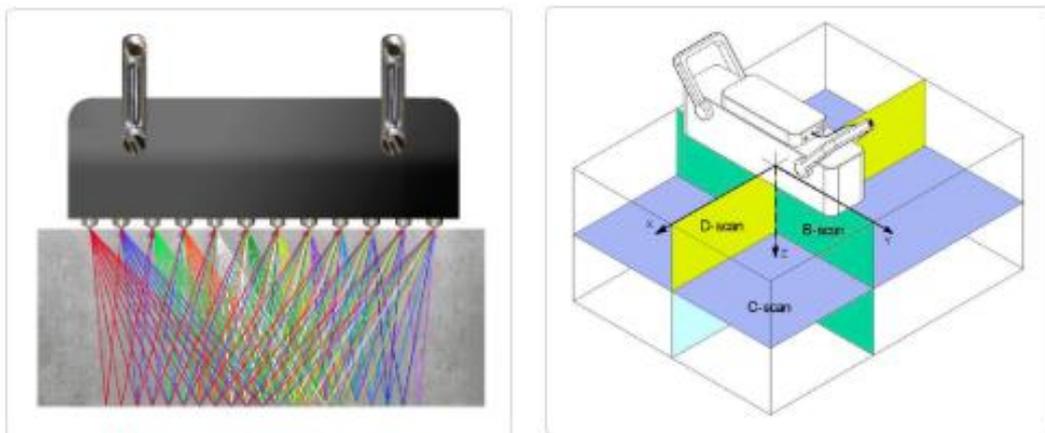


Рисунок 3.3.1.2 – Процесс сбора данных

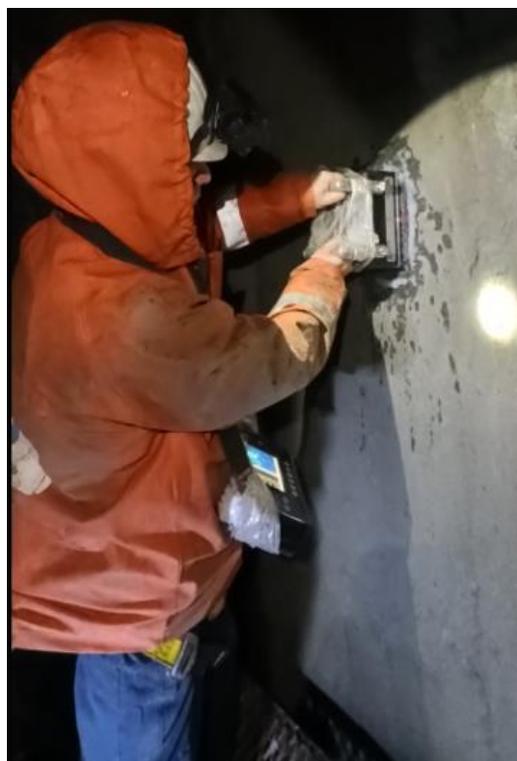


Рисунок 3.3.1.3 – Процесс обследования крепи ствола томографом  
A1020 MIRA Lite

В результате исследований можно получить, как локальные В, С и D-сканы исследуемой конструкции, так и построить ее 3D-модель в специализированной программе. При отсутствии в конструкции крепи дефектов, инородных включений, а также закрепных пустот полученные на этих участках В-сканы имеют однородную цветовую гамму с преобладанием черных и синих цветов, ярко выраженные участки отраженного сигнала не наблюдаются. Также отсутствуют скачки амплитуды ультразвуковых волн, характерные для областей с низкой плотностью.

При наличии в конструкции внутренних дефектов, инородных включений, закрепных пустот на В-скане и 3D-модели отображаются соответствующего размера области красного цвета, а также скачки амплитуд ультразвуковых волн (рис. 3.3.1.4).

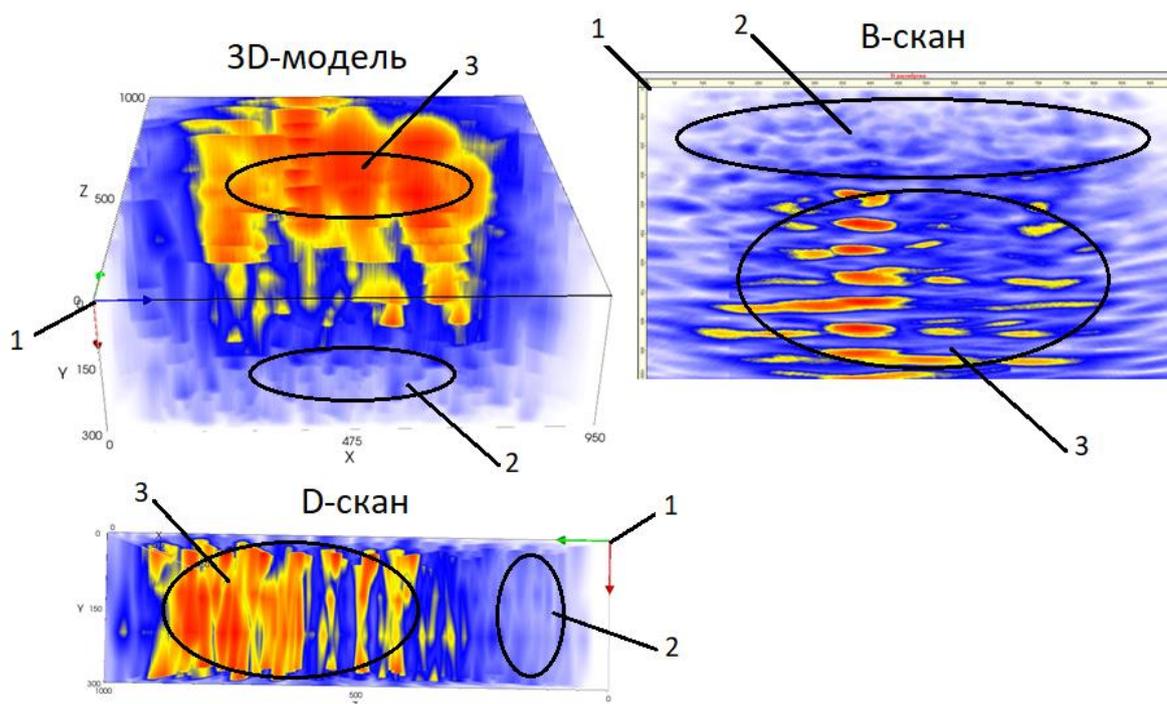


Рисунок 3.3.1.4 – Пример результатов ультразвуковой томографии:

1 – начало отсчета (точка приложения левой верхней антенны прибора); 2 – однородная зона (отраженный сигнал отсутствует); 3 – неоднородная зона (присутствует отчетливо выраженный отраженный и эховый сигнал)

### ***3.3.2 Оценка фактической прочности бетона крепи***

Данную оценку следует производить в соответствии с указаниями ч. 1 ст. 15 Федерального закона от 30.12.2009 №384-ФЗ «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений»; пп.5.3.1 ГОСТ 31937-2011 и ГОСТ 28570-2019 [81].

Пробы бетона для изготовления образцов отбирают путем их выбуривания из конструкции крепи. Пробы отбираются из мест заходок, удаленных от холодных швов на расстояние не менее 100 мм, а также вне зон видимых и скрытых дефектов крепи. Наличие скрытых дефектов предварительно проверяется с помощью ультразвукового томографа МИРА.

Размеры образцов в соответствии с указаниями п. 4.2 ГОСТ 28570-2019 принимаются равными: диаметр не менее 70 мм; высота – не менее 1,5 диаметра.

Работы по отбору кернов производятся с подъемных сосудов.

Для бурения и отбора кернов из крепи ствола применяется установка алмазного бурения Messer DM-130 (рис. 3.3.2.1).

Каждый высверленный керн маркируется и описывается в протоколе испытаний.

Испытания образцов кернов производятся в строительной лаборатории (рис. 3.3.2.2).



Рисунок 3.3.2.1 – Установка алмазного бурения Messer DM-130 и процесс отбора керна в стволе



Рисунок 3.3.2.2 – Процесс испытания образцов бетона в строительной лаборатории

Испытания осуществляются согласно требованиям ГОСТ 10180.

Отчет об испытаниях включает протокол отбора проб и результаты испытания образцов [81].

### ***3.3.3 Неразрушающий контроль прочности бетона крепи***

Для комплексной оценки прочностных свойств бетона крепи стволов в соответствии п.п. 5.3.1.4 ГОСТ 31937 [22] применяется ультразвуковой метод определения прочности по ГОСТ 17624 [82].

Для выполнения данных исследований применяется ультразвуковой тестер UK1401. Прибор обеспечивает измерение времени и скорости распространения продольных ультразвуковых волн в бетонной и железобетонной крепи при поверхностном прозвучивании на фиксированной базе с целью определения прочности и целостности материалов и конструкций (рис. 3.3.3.1). Оценка прочности основана на корреляции скорости распространения ультразвуковых волн в бетоне крепи с его физико-механическими характеристиками и физическим состоянием.



Рисунок 3.3.3.1 – Процесс определения прочности бетона ультразвуковым тестером UK1401

Перед проведением замеров устанавливается градуировочная зависимость по единичным значениям скорости ультразвука и прочности бетона крепи одних и тех же участков конструкций.

Результаты испытаний представляются в табличной форме. Обработка данных выполняется согласно требованиям ГОСТ 18105 [83]. Форма таблицы принимается согласно Приложению Г ГОСТ 17624 [82].

### 3.4 ГЕОРАДИОЛОКАЦИОННОЕ И СЕЙСМОАКУСТИЧЕСКОЕ ОБСЛЕДОВАНИЕ СТВОЛА

#### 3.4.1 Сейсмоакустика

Поверхностные сейсмоакустические работы в стволе производятся с целью анализа качества контакта «крепь – массив».

Для регистрации упругих колебаний используется сертифицированная 2-х канальная высокочастотная сеймостанция типа «ИДС-1» (производитель ООО «Логис», г. Раменское) (рис. 3.4.1.1).



Рисунок 3.4.1.1 – Сеймостанция ИДС-1

Собранные данные записываются на внутреннюю память сеймостанции, затем копируются на персональный компьютер и обрабатываются в специализированных программах. При обработке данных используются программы: Impact\_method, RadexPro, Matlab. Формат данных – segy, ddb.

Для определения участков нарушения контакта «крепь – породный массив» использовалась обработка с применением атрибутивного анализа. При интерпретации сейсмоакустических данных применяется атрибутивный анализ волнового поля, который позволяет существенно облегчить выделение аномальных участков повышенной влажности, областей разуплотнения, пустот под бетонными покрытиями [84].

В блок атрибутивного анализа могут входить следующие виды атрибутов:

- максимальное абсолютное значение амплитуды;
- энергия нормированного сигнала;
- площадь нормированного спектра;
- средневзвешенная частота;
- Q-фактор (значение Q-фактора может быть определено как отношение ширины спектра отраженного сигнала, определенного по уровню 0.7 от максимума, к центральной частоте спектра;
- отношение площади нормированного спектра к средневзвешенной частоте.

Перечисленные атрибуты определяются внутри заданного интервала  $\Delta t$  каждой точки регистрации (рис. 3.4.1.2).

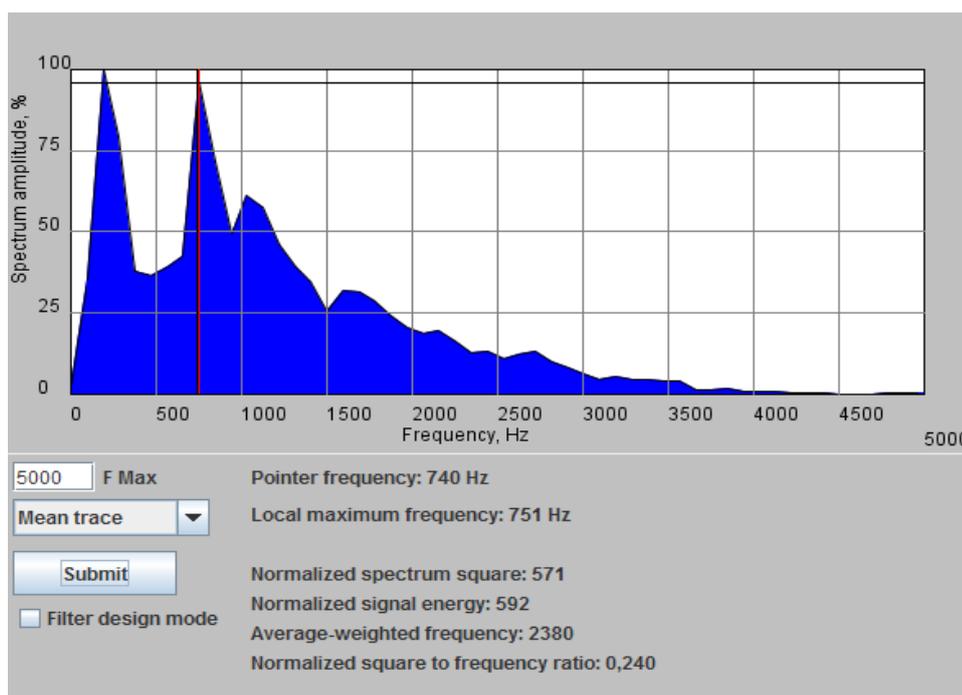


Рисунок 3.4.1.2 – Пример расчета атрибутов акустического сигнала

По результатам обработки акустических наблюдений может быть построено распределение величины атрибута сигнала вдоль обследуемой конструкции (рис. 3.4.1.3).

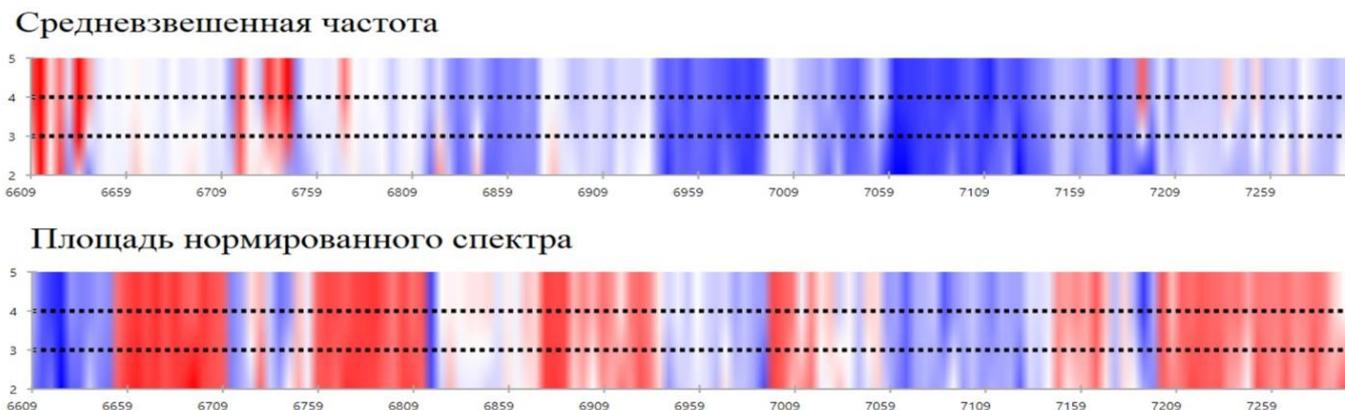


Рисунок 3.4.1.3 – Пример построения распределения величины атрибута сигнала

Граф обработки полевого материала сейсмоакустических наблюдений состоял из следующих этапов:

1. Подготовка данных.
2. Расчет спектральных атрибутов.
3. Построение карт и распределений спектральных атрибутов.

Подготовка сырых полевых данных к дальнейшей обработке состояла из следующих шагов:

1. Сборка сейсмограмм. Сейсмограмма на каждой точке наблюдений включает в себя 10 сейсмотрасс (работа проводилась двухканальной сеймостанцией с пятикратным накоплением) (рис. 3.4.1.4).

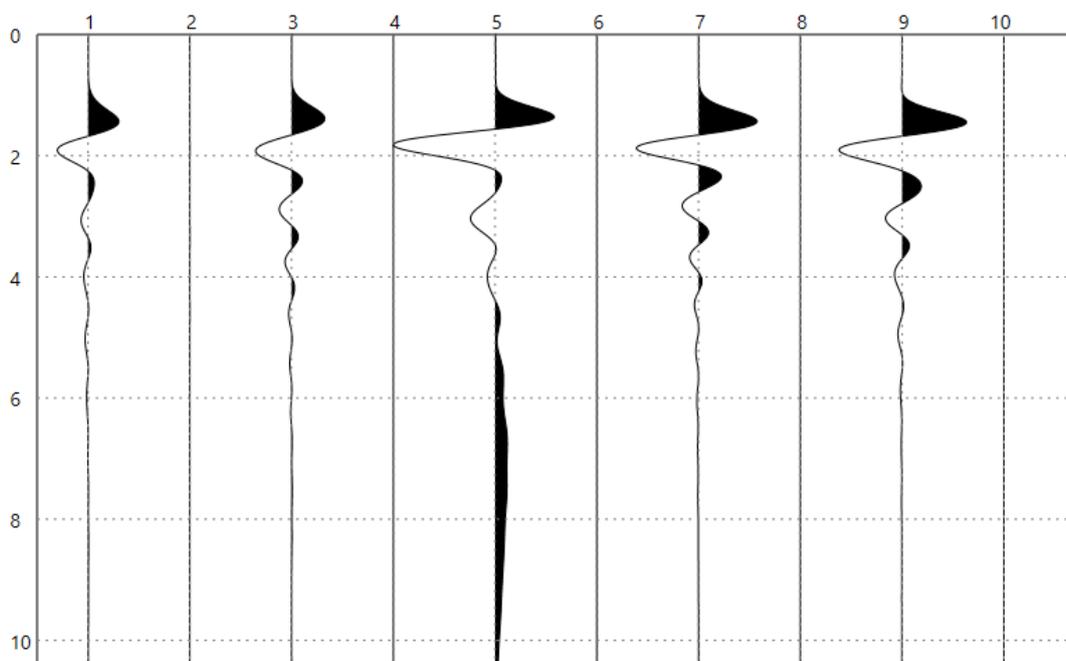


Рисунок 3.4.1.4 – Пример пяти реализаций, записанных на одной точке наблюдений

2. Отбраковка сеймотрасс. В результате отбраковки в каждой точке наблюдений оставалось пять сеймотрасс, по которым на следующем этапе производится расчет спектральных атрибутов (рис. 3.4.1.5).

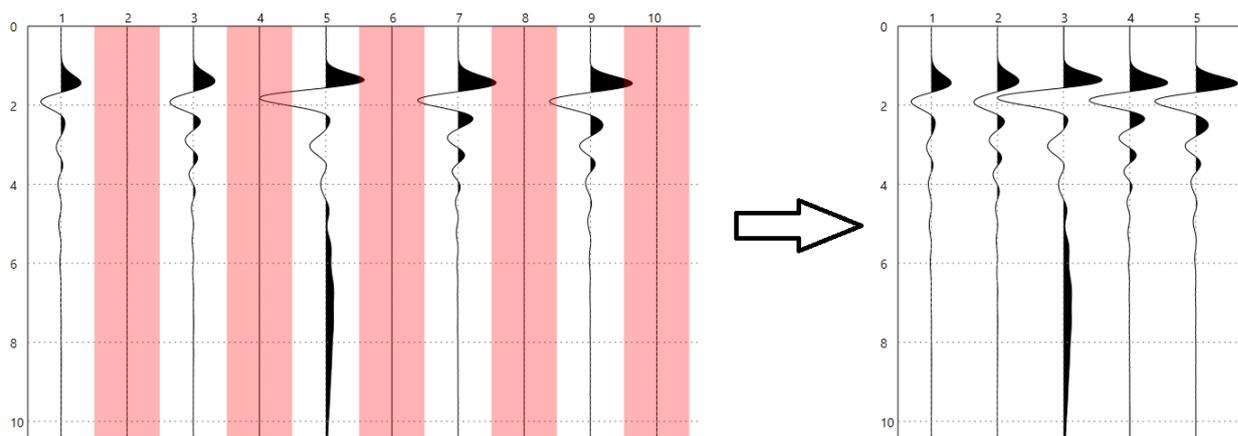


Рисунок 3.4.1.5 – Пример отбраковывания сеймотрасс

На рис. 3.4.1.6 представлен пример расчета спектральных атрибутов для одной точки наблюдений.

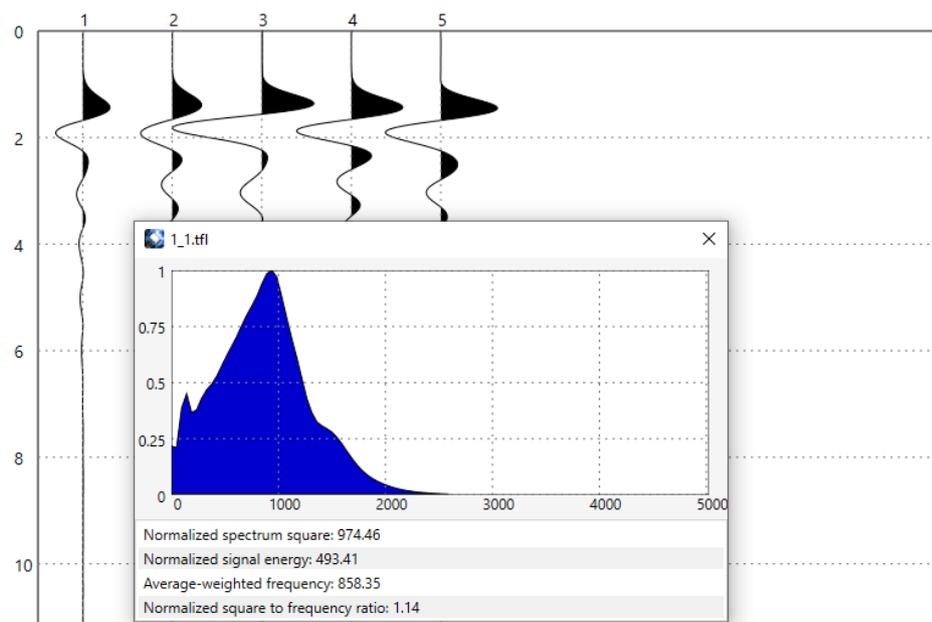


Рисунок 3.4.1.6 – Пример расчета спектральных атрибутов на точке наблюдений

Атрибуты рассчитывались для каждой сейсмотрассы, затем находилось среднее значение атрибутов по пяти сейсмотрассам, соответствующим точке наблюдения.

Обработка данных производилась в программном обеспечении Pile-MASTER.

ПО Pile-MASTER предоставляет возможность расчета следующих атрибутов по сейсмическим сигналам:

- Площадь нормированного спектра.
- Энергия нормированного сигнала.
- Средневзвешенная частота спектра.
- Отношение площади нормированного спектра к средневзвешенной частоте.

С контактными условиями на границе «крепь - породный массив» наиболее связан атрибут «энергия нормированного сигнала», поэтому именно он использовался при построении.

По окончании этапа расчета спектральных атрибутов полученные значения привязывались к точкам наблюдений и выгружались в таблицу, содер-

жащую координаты точек наблюдений и значения атрибутов. По этим таблицам производилось построение карт атрибутов.

На рис. 3.4.1.7 представлен пример построения карты значений атрибута.

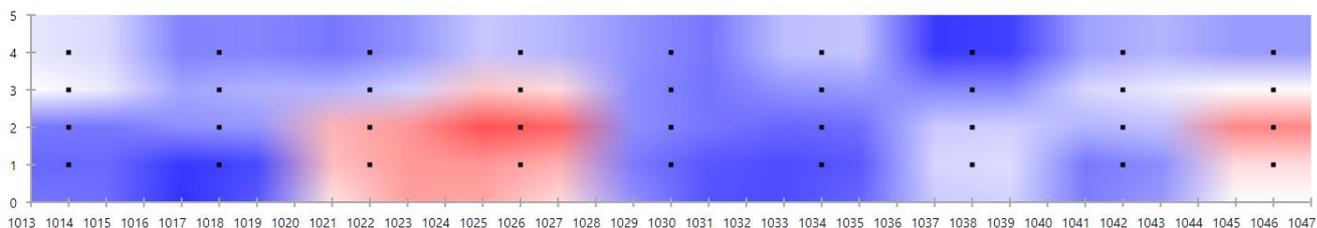


Рисунок 3.4.1.7 – Карта атрибута «энергия нормированного сигнала» на участке измерений

Для того чтобы можно было судить об относительном изменении состояния контакта конструкция-грунт, был выбран эмпирический критерий. Диапазон полученных на точке наблюдения значений атрибутов вдоль всего участка наблюдений был разбит следующим образом (рис. 3.4.1.8):

1. Хороший контакт. Все точки, значение атрибутов в которых попало в интервал:

$$[\text{СрЗнач} - \text{Ст.Откл}; \text{Ср.Знач} + \text{Ст.Откл}].$$

2. Удовлетворительный контакт. Все точки, значение атрибутов в которых попало в интервал:

$$[\text{СрЗнач} - 2 * \text{Ст.Откл}; \text{Ср.Знач} + 2 * \text{Ст.Откл}].$$

3. Ослабленный контакт. Все точки, значение атрибутов в которых попало в интервал:

$$[\text{СрЗнач} - 3 * \text{Ст.Откл}; \text{Ср.Знач} + 3 * \text{Ст.Откл}].$$

4. Отсутствует контакт. Все точки, значение атрибутов в которых попало за пределы интервала:

$$[\text{СрЗнач} - 3 * \text{Ст.Откл}; \text{Ср.Знач} + 3 * \text{Ст.Откл}].$$

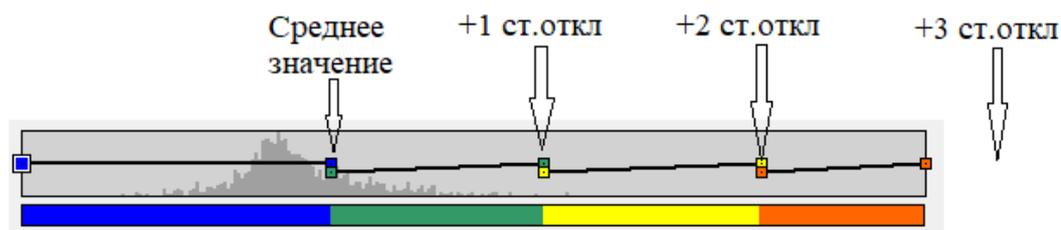


Рисунок 3.4.1.8 – Распределение значений атрибута вдоль линии наблюдений и критерий, определяющий повышенные и пониженные значения атрибута

Изменчивость энергии акустических колебаний говорит о неоднородности контактных условий. Для количественной оценки состояния контактного слоя применялся критерий по отношению измеренной амплитуды акустических колебаний к фоновому значению амплитуды [84].

### 3.4.2 Георадиолокация

Георадиолокационное обследование стволов выполняется при помощи георадара ОКО-3 (рис. 3.4.2.1) с антенными блоками АБ-150 и АБ-400 с центральной частотой сигнала 150 и 400 МГц.

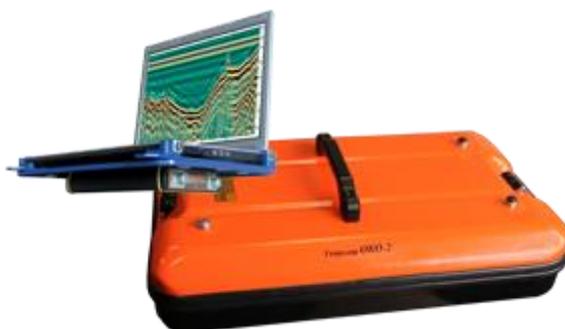


Рисунок 3.4.2.1 – Георадар ОКО-3

Регистрация входящей информации, а также управление параметрами производится через ноутбук, а в случае высокой обводненности среды посредством специального климатического блока управления.

Формирование зондирующих импульсов осуществляется методом ударного возбуждения антенн узким однополярным импульсом напряжения

наносекундной длительности.

При записи георадиолокационных профилей устанавливались следующие параметры:

- время записи – 100нс (для АБ-400 МГц) и 200 нс (для АБ-150 МГц);
- накопление – 1;
- шаг по профилю – 1 см;
- режим измерения - «по перемещению» с использованием измерителя

пути типа ДП-32.

Привязка профилей производилась при помощи датчика перемещения ДП-32 (одометра);

Георадиолокационные исследования осуществляются с движущихся по стволу подъемных сосудов, бадей, полков. Средняя скорость перемещения составляет 1 м/с (рис.3.4.2.2).

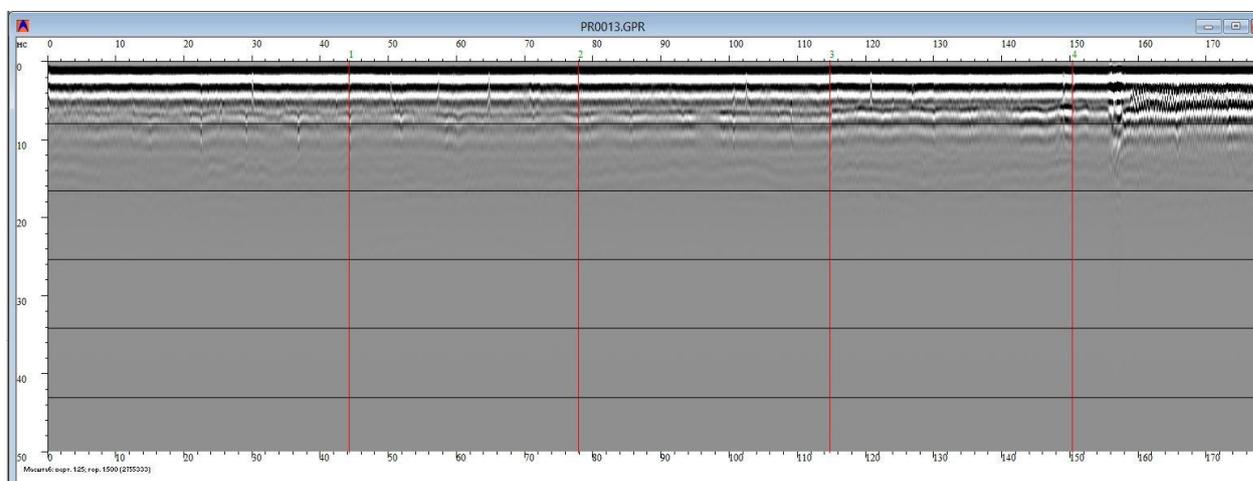


Рисунок 3.4.2.2 – Процесс перемещения антенного блока по поверхности крепи ствола

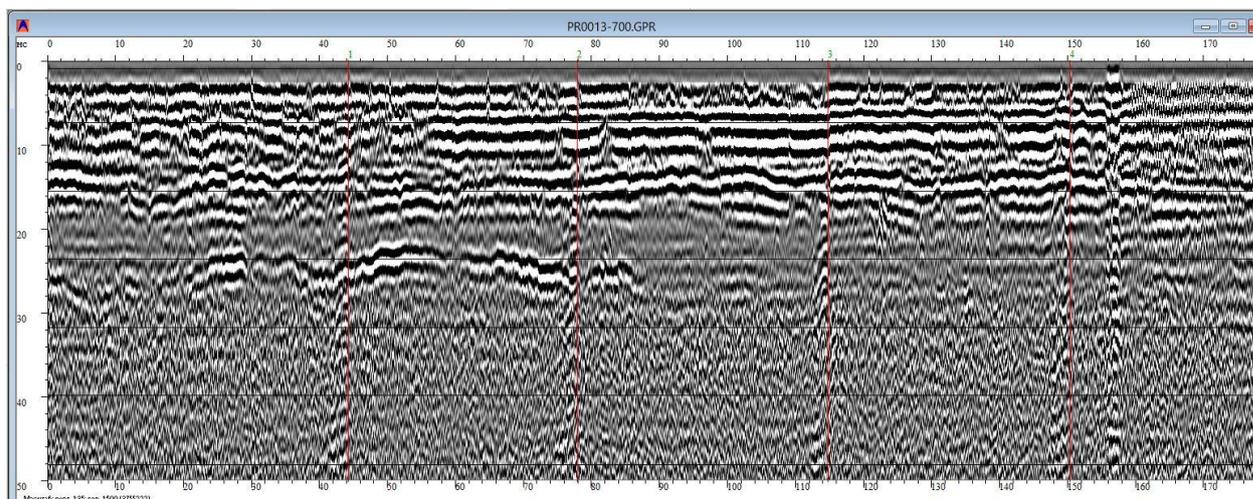
Методика обработки и интерпретации данных георадарной в вертикальном стволе заключается в выделении полезного сигнала на фоне помех и шума. С помощью разнообразных приемов преобразования сигналов помехи и шумы ослабляются или удаляются с записи, полезные волны подчеркиваются.

Обработка данных георадиолокации выполняется в программном комплексе «GeoScan-32» и «Анализ-7» (ООО «Логис») и включает в себя следующие процедуры (рис. 3.4.2.3):

- коррекция шкалы, длины профиля;
- задание параметров визуализации данных,
- задание параметров усиления (для получения записи, контрастной по всей длине);
- вычитание среднего для устранения помех;
- полосовая фильтрация [88,89].



а)



б)

Рисунок 3.4.2.3 – Пример данных георадиолокационного профилирования:

а) фрагмент ствольной полевой радарограммы; б) ее обработанное изображение

Задача интерпретации данных георадиолокационной съёмки в вертикальном стволе состоит в преобразовании исходных радарограмм в когерентный разрез, отражающий картину залегания основных структурных слоев и каких-либо локальных объектов.

Для расчета глубины залегания выделенных объектов и структурных границ необходимо определить значения диэлектрической проницаемости ( $\epsilon$ ) или скорости распространения волн ( $V$ , см/нс) в выделенных комплексах. Оба параметра связаны между собой следующим соотношением:

$$V = \frac{c}{\sqrt{\epsilon}} \quad (\text{см/нс}), \text{ где } c - \text{ скорость распространения электромагнитной}$$

волны в вакууме. По известной скорости можно рассчитать глубину залегания объекта:

$$H = \frac{V \cdot t}{2}, \text{ где } H - \text{ глубина залегания объекта, } t - \text{ время пробега волны.}$$

Для определения скорости, как основополагающей величины при пересчете временного разреза (полевые данные) в глубинный, используется несколько подходов:

1. По гиперболе дифракции от локального объекта, размеры которого меньше или сравнимы с длиной волны. Существует зависимость формы отклика, приходящего от дифрагирующего объекта, со скоростью распространения электромагнитной волны во вмещающей среде. Точность определения глубины таким способом обычно не хуже 5-10% от глубины.

2. Из справочной литературы или данных предыдущих исследований можно также получить необходимые сведения о диэлектрической проницаемости грунтов. Точность определения глубины при таком подходе может оказаться достаточно низкой вследствие значительной изменчивости свойств пород и материалов.

3. По данным бурения (или иной априорной информации) производится сопоставление выделенных отражающих поверхностей со слоями, представленными в скважине (в априорных данных).

4. При реализации методики измерения на различных базах (удалениях источника и приемника), однако данная методика требует очень значительных временных затрат как на полевые, так и на камеральные работы и применяется в исключительных случаях.

При пересчете временного разреза в глубинный используются первый и третий подходы. Определение диэлектрической проницаемости показало достаточно высокую выдержанность свойств бетона, диапазон изменений составил 0,2 ед., а среднее значение  $\epsilon = 6$ .

Так же при интерпретации георадарных данных, полученных при обследовании вертикальных стволов может применяться атрибутивный анализ волнового поля, позволяющий облегчить выделение аномальных участков повышенной влажности, областей разуплотнения, закрепных пустот.

В блок атрибутивного анализа могут входить следующие виды атрибутов:

- максимальное абсолютное значение амплитуды  $A_{\max}$ ;
- время, на котором определяется максимальное значение амплитуды  $T_{\max}$ ;
- энергия сигнала  $\sum A(t)^2 \Delta t$ , где  $\Delta$  - интервал дискретизации;
- спектр Фурье для каждой трассы;
- площадь нормированного спектра  $S_n$ ;
- средневзвешенная частота  $f_{cb} = \sum A_{if} / \sum A_i$  ( $A_i$  - спектральная амплитуда);
- Q-фактор. (Значение Q-фактора может быть определено как отношение ширины спектра отраженного сигнала, определенного по уровню 0.7 от максимума, к центральной частоте спектра:  $Q = \Delta f / f_{\max}$ ;
- отношение площади нормированного спектра к средневзвешенной частоте;
- коэффициент корреляции между ансамблями соседних трасс.

Перечисленные атрибуты определяются внутри заданного интервала  $\Delta t$ , который привязан к пропикированной отражающей границе, либо определяются в скользящем окне [90,91].

### 3.5 ГЛУБИННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ОКОЛОСТВОЛЬНОГО МАССИВА МЕТОДОМ РАДИОВОЛНОВОГО ПРОСВЕЧИВАНИЯ

Радиоволновой метод в варианте радиопросвечивания (РВП) разработан для изучения строения горных пород и обнаружения локальных неоднородностей в пространстве между буровыми скважинами.

Физической основой метода является зависимость интенсивности поглощения энергии радиоволн от электрических свойств пород, расположенных на трассе распространения волны. Породы, обладающие более низкими значениями электрического сопротивления ( $\rho$ ) и диэлектрической проницаемости ( $\epsilon\epsilon_0$ ), характеризуются более высоким поглощением радиоволн [92]. Степень различия электрических свойств пород, слагающих разрез, определяет целесообразность применения метода.

Главными геотехническими характеристиками РВП являются дальность исследований (максимально возможное расстояние между скважинами), разрешающая способность (минимальный размер уверенно выявляемой неоднородности и точность ее локализации в межскважинном пространстве), чувствительность (минимальная контрастность электрических характеристик изучаемых объектов относительно вмещающих пород).

Использование электромагнитного поля в диапазоне радиочастот (0,03 - 50 МГц), предоставляет радиоволновому методу определенные преимущества:

- высокие частоты и небольшие размеры дипольных скважинных установок обеспечивают высокую чувствительность к изменению электрических характеристик среды и разрешающую способность метода для выявления неоднородностей малых размеров;

- радиоволновое поле имеет такую весьма важную характеристику, как «зона, существенная для распространения радиоволн – «зона Френеля –  $df$ », которая четко ограничивает пространство исследования при каждом положении излучателя и приемника, что позволило разработать для радиоволнового

метода физически обоснованный алгоритм 3D обработки данных радиосвечивания (рис. 3.5.1).

Наибольший диаметр поперечного сечения зоны Френеля  $d_f$  расположен на середине расстояния между пунктами излучения и приема.

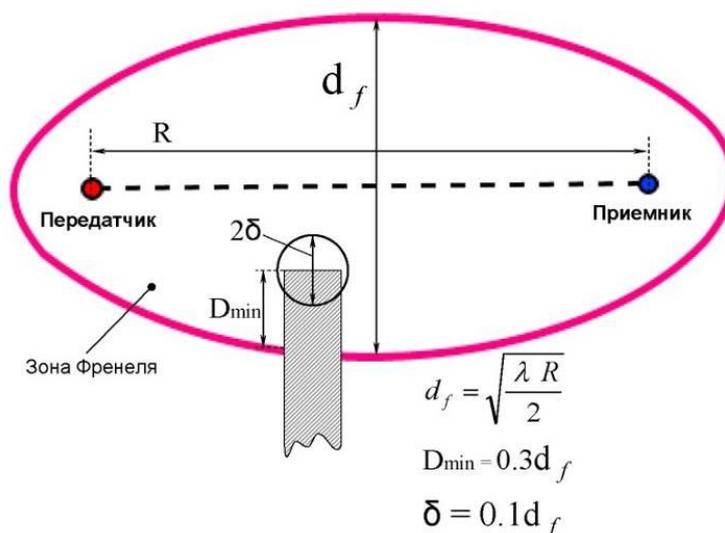


Рисунок 3.5.1 – Зона существенная для распространения радиоволн в массиве горных пород:

$R$  – расстояние между излучателем и приемником (м);  $\lambda$  – длина волны в породах (м)

Межскважинные радиоволновые измерения выполняются по «веерной» (томографической) схеме, когда в первую скважину на каротажном кабеле погружается излучающее устройство, а во вторую помещается приемник (рис. 3.5.2). При фиксированном положении излучателя в первой скважине, во второй скважине производятся измерения приемным устройством по точкам с заданным шагом. Затем в первой скважине излучатель перемещается на шаг в следующий пункт и измерения во второй скважине повторяются.

В развитие этого метода разработана технология объемного геоэлектрического картирования межскважинного пространства способом радиоволновой геоинтроскопии «3D РВГИ».

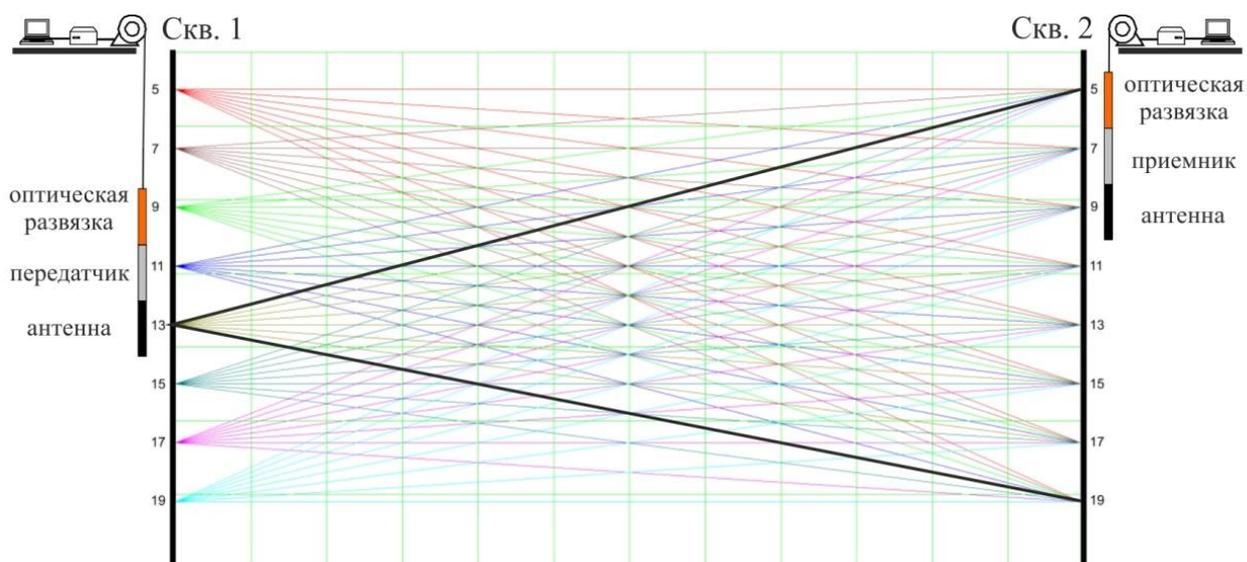


Рисунок 3.5.2 – Всерная схема измерений РВГИ с установкой EzEz (электрические антенны)

Радиоволновая геоинтроскопия (РВГИ) – это технология «визуализации» внутреннего строения непрозрачной геологической среды. Используя специальные алгоритмы обработки данных, получаемых путем многократного и под разными углами радиопросвечивания изучаемого массива, удастся определить значение электрического сопротивления  $\rho$  для каждой «элементарной ячейки» исследуемой среды. По совокупности данных просвечивания восстанавливается 2D или 3D-распределение электрических свойств пород в межскважинном пространстве и, на этой основе, выявляются и локализуются геологические неоднородности относительно малых размеров и электрической контрастности.

Радиоволновая аппаратура должна обеспечивать:

- необходимую дальность просвечивания, в том числе и в породах низкого электрического сопротивления;
- максимально короткие излучающие и приемные антенны при сохранении высоких значений коэффициента измерительной установки;
- высокую чувствительность и помехозащищенность приемного канала;

- управление с поверхности скважинным излучателем, включая резонансную настройку излучающей антенны, цифровую запись тока в каждой точке излучения;
- иметь надежную гальваническую развязку скважинных приборов от каротажного кабеля, который иначе работает как дополнительная антенна (антенный эффект кабеля)
- безаварийную работу приборов и антенн в скважинах с открытым стволом.

Этим требованиям в полной мере соответствует радиоволновая аппаратура РВГИ-17ЕМ разработки ООО «Радионда».

В состав межскважинной аппаратуры «РВГИ-17м» входит зонд с излучающим устройством, зонд с приемным устройством и комплект наземной аппаратуры для излучающего и приемного устройств (рис. 3.5.3).

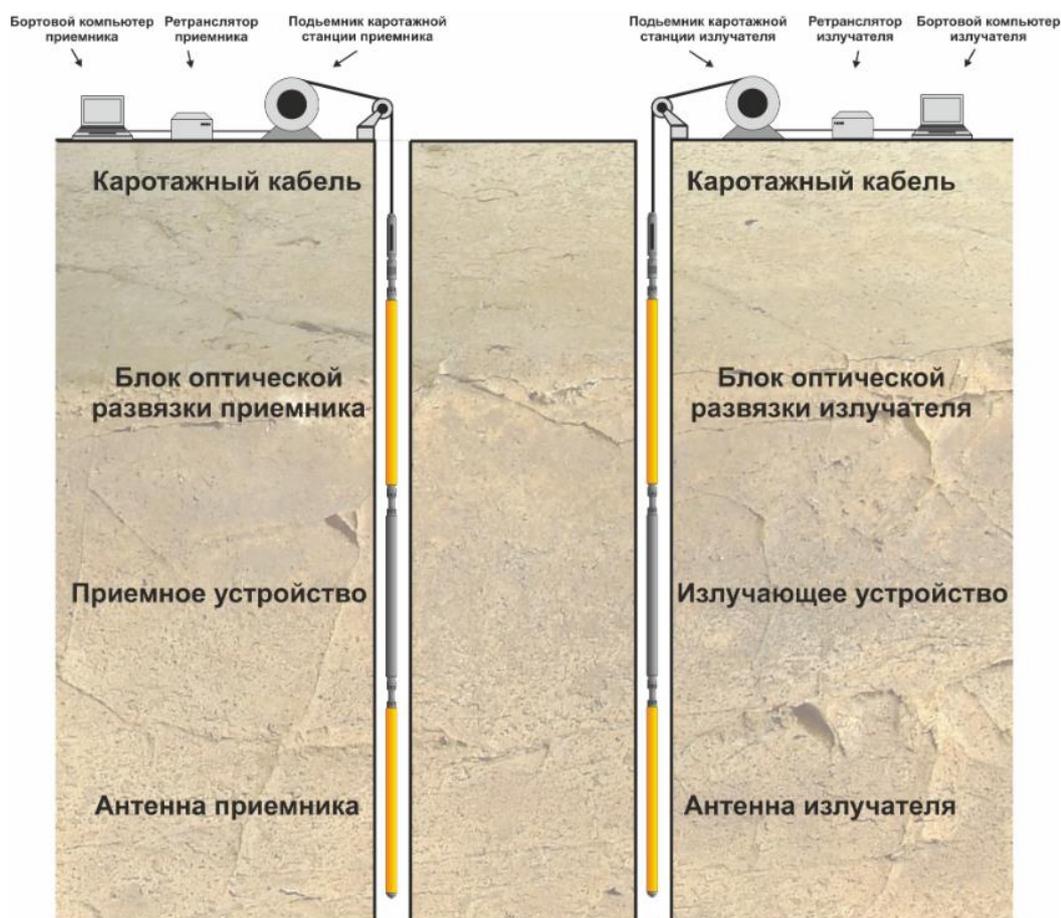


Рисунок 3.5.3 – Общий вид аппаратуры «РВГИ-17м»

Аппаратура работает совместно с каротажными подъемниками и другими геофизическими станциями, обеспечивающими спускоподъемные операции с использованием одножильного бронированного каротажного кабеля.

Переключение частот осуществляется без подъема скважинного прибора на поверхность. Использование цифровой фильтрации позволило сузить полосу пропускания приемного тракта до 12 Гц и обеспечить чувствительность во всем диапазоне рабочих частот не хуже 0,06 мкВ, что на данном этапе развития электроники является практически предельным. Это же определяет высокую помехозащищенность приемного тракта, позволяя выполнять измерения при высоком уровне промышленных помех.

Наиболее благоприятные условия для объемного геокартирования РВГИ возникают при равномерной треугольной (или гексагональной) сети скважин при отношении длины интервала измерений в скважинах к расстоянию, удовлетворяющего условию  $\Delta h \geq R/4$ .

**Обработка данных РВГИ** в одном сечении проводится способами томографического (2D). Для совместной 3D обработки данных по всем сечениям исследованного участка применяется алгоритм волнового восстановления (МВВ) реализованный в ПО «RVGI#3D». Этот алгоритм учитывает влияние неоднородностей среды, расположенных в стороне от плоскости просвечивания. В результате такой обработки получается объемная матрица расчетных значений эффективного электрического сопротивления, позволяющая построить 3D-детальную геоэлектрическую карту всего исследованного блока [94].

### 3.6 ПРИМЕРЫ РЕАЛИЗАЦИИ МЕТОДИКИ ОЦЕНКИ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ШАХТНЫХ СТВОЛОВ С БОЛЬШИМ СРОКОМ ЭКСПЛУАТАЦИИ

#### *3.6.1 Общие сведения*

Разработанная в диссертационном исследовании методика оценки технического состояния стволов и описанные выше методы выполнения обсле-

дования вертикальных стволов апробирована в глубоких вертикальных стволах Норильского промышленного района.

Объектами исследования были два глубоких шахтных ствола (скиповой глубиной 1063 м и вентиляционный глубиной 1355 м) диаметром в свету 6,5 м, закреплённые монолитной бетонной крепью толщиной 300 - 500 мм, проектный класс бетона В15 - В20.

Реализация трех уровней обследовательских работ и достоверное определение критериев технического состояния обеспечивалось за счет применения комплексного метода, включающего визуальные исследования состояния крепи и армировки; определение прочностных и деформационных характеристик бетона крепи по образцам, отобранным из конструкции и неразрушающими методами; маркшейдерские работы по оценке геометрических параметров ствола; геомеханические и геофизические методы; математическое моделирование с применением специализированных программных комплексов и определение интегральных показателей надежности конструкций [84-87].

### ***3.6.2 Результаты обследовательских работ первого (поверхностного) уровня***

В результате анализа архивных данных и визуального обследования выявлены дефекты и повреждения крепи и армировки стволов.

По характеру и причинам возникновения дефекты крепи делятся на конструктивные, производственно-строительные и эксплуатационные.

Основными типами дефектов крепи обследованных стволов, отнесенных к категории А являются разрушение бетона с обнажением приконтурных пород на глубину до 1,0 м, образование вывалов и заколов различной протяженности, разрывных трещин и каверн площадью до 3,0 м<sup>2</sup> и глубиной до 1,0 м, интенсивное снижение прочности бетона.

Сравнительный анализ схемы дефектов и данных предшествующих обследований показал, что суммарная площадь дефектов в крепи скипового ствола увеличилась на 12 % за двухлетний период.

Примеры характерных дефектов приведены в табл. 3.6.2.1.

Таблица 3.6.2.1 – Примеры характерных дефектов бетонной крепи ствола

Глубина ствола, м	Фото дефекта	Описание
288		Сплошное разрушение стыка заходок, $h=0,9$ м
481		Сплошное разрушение крепи, $S = 2,2 \text{ м}^2$ , вывал, отрыв металлических листов крепи усиления

Глубина ствола, м	Фото дефекта	Описание
563		<p>Полное разрушение крепи заходки с обнажением приконтурных пород,  <math>S = 3,0 \text{ м}^2</math></p>
712		<p>Полное разрушение крепи заходки с обнажением приконтурных пород,  <math>S = 2,5 \text{ м}^2</math></p>
741		<p>Сплошное разрушение крепи, <math>S = 1,8 \text{ м}^2</math>, вывал, отрыв металлических листов крепи усиления</p>

В ходе визуального обследования также выявлена коррозия, деформации и полная потеря работоспособности металлических листов крепи усиления и анкерной крепи, установленных при проведении частичных ремонтов. Наблюдаются срыв гаек, отрыв и деформации листов, отсутствие надежного закрепления в шпурах анкерных стрежней. Уложенный при ремонтах за металлические листы бетон интенсивно разрушается.

Визуальное обследование конструкций армировки показало, что двутавровые расстрелы и коробчатые проводники находятся в удовлетворительном состоянии. Интенсивного повреждения их коррозией предварительно не выявлено. На металлических конструкциях имеется налет мелких увлажненных частиц поднимаемой по стволу горной массы. К наиболее существенным дефектам относятся механические повреждения металлических конструкций и разрушение узлов их заделки в бетонную крепь.

Результаты выполненной маркшейдерской съемки показали, что в вентиляционном стволе наблюдается существенное искривление (отклонение вертикальной оси от проектного положения). Величины максимальных отклонений достигают 1,1 м. По итогам первого этапа работ построена карта обследования ствола, фрагмент которой представлен на рис. 3.6.2.1. Зоны обводненности, трещиноватости и нарушенного контакта «крепь – массив» дополнительно уточнены в результате инструментальных исследований второго и третьего уровней.



### 3.6.3 Результаты обследовательских работ второго (приконтурного) уровня

Оценка фактической толщины крепи и выявление скрытых дефектов осуществлялась методами ультразвуковой томографии и георадиолокации.

В результате томографических исследований получены локальные В-сканы бетонной крепи. Всего обработано и изучено более 250 сканов крепи. На всех обследованных участках стволов повсеместно наблюдается четкий отраженный сигнал, при этом характер распространения сигнала и структура полученных В-сканов при различной глубине сканирования является однотипной.

Фактическая толщина крепи скипового ствола изменяется в диапазоне от 220 до 550 мм.

Статистическая обработка представленных данных показала, что более 80% полученных сканов имеют достаточно ярко выраженные неоднородности в крепи, свидетельствующие о развитии деструктивных процессов в бетоне (рис. 3.6.3.1).

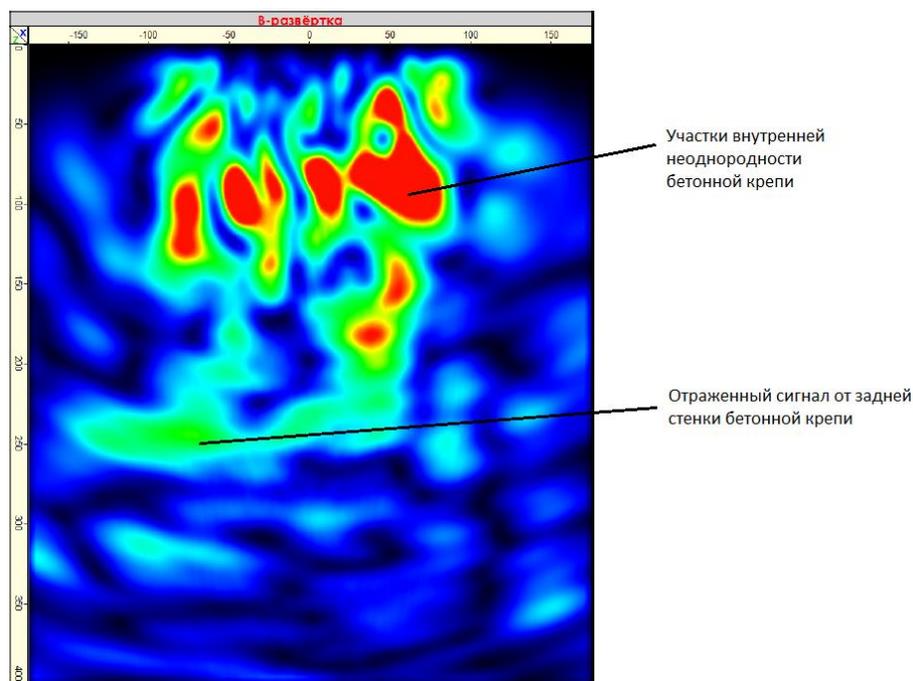


Рисунок 3.6.3.1 – Пример В-скана бетонной крепи, полученный с помощью ультразвукового томографа

Причинами данного состояния является большой срок службы бетона в коррозионной среде и изначально недостаточно высокое качество монолитной крепи обследованных стволов, которые строились в 70-80 года прошлого века с применением совмещенной технологической схемы проходки.

Фактическая толщина крепи вентиляционного ствола изменяется в диапазоне от 350 до 800 мм.

На 37,5% обследованных участков вентиляционного ствола непосредственно в крепи выявлены локальные дефектные области сниженной плотности, отрицательно влияющие на общую несущую способность крепи. Примеры сканов приведены на рис. 3.6.3.2 и 3.6.3.3, дефектные зоны крепи показаны красными пятнами.

Обобщая результаты сканирования, сопоставляя их с данными визуального осмотра и результатами предыдущих обследований можно сделать вывод, что надежный контакт между крепью и массивом отсутствует, непосредственно за крепью находится водонасыщенная область дезинтегрированных (раздробленных и сильно трещиноватых) пород.

Георадарное сканирование по четырем профилям сечений стволов двумя типами антенн показало следующее:

1. Глубинность зондирования при применении антенного блока с частотой 150 МГц составила 7,0 м, с частотой 400 МГц – 2,5 м.
2. За крепью прослеживается отчетливая зона трещиноватых пород. Размеры зоны на большинстве участков составляют 2,0 - 3,0 м.
3. Имеются места водопроявлений, преимущественно приуроченные к участкам сильно трещиноватых пород (рис. 3.6.3.4).

Всего, в скиповом и вентиляционном стволах обработано более 10 км георадиолокационных профилей, полученных посредством антенных блоков различного типа. В результате исследований определены интервалы нарушенного контакта «крепь – массив». Данные интервалы определялись по атрибуту «амплитуда спектра» на частоте резонанса. При коэффициенте вариации атрибута большем 16% контакт считался нарушенным.

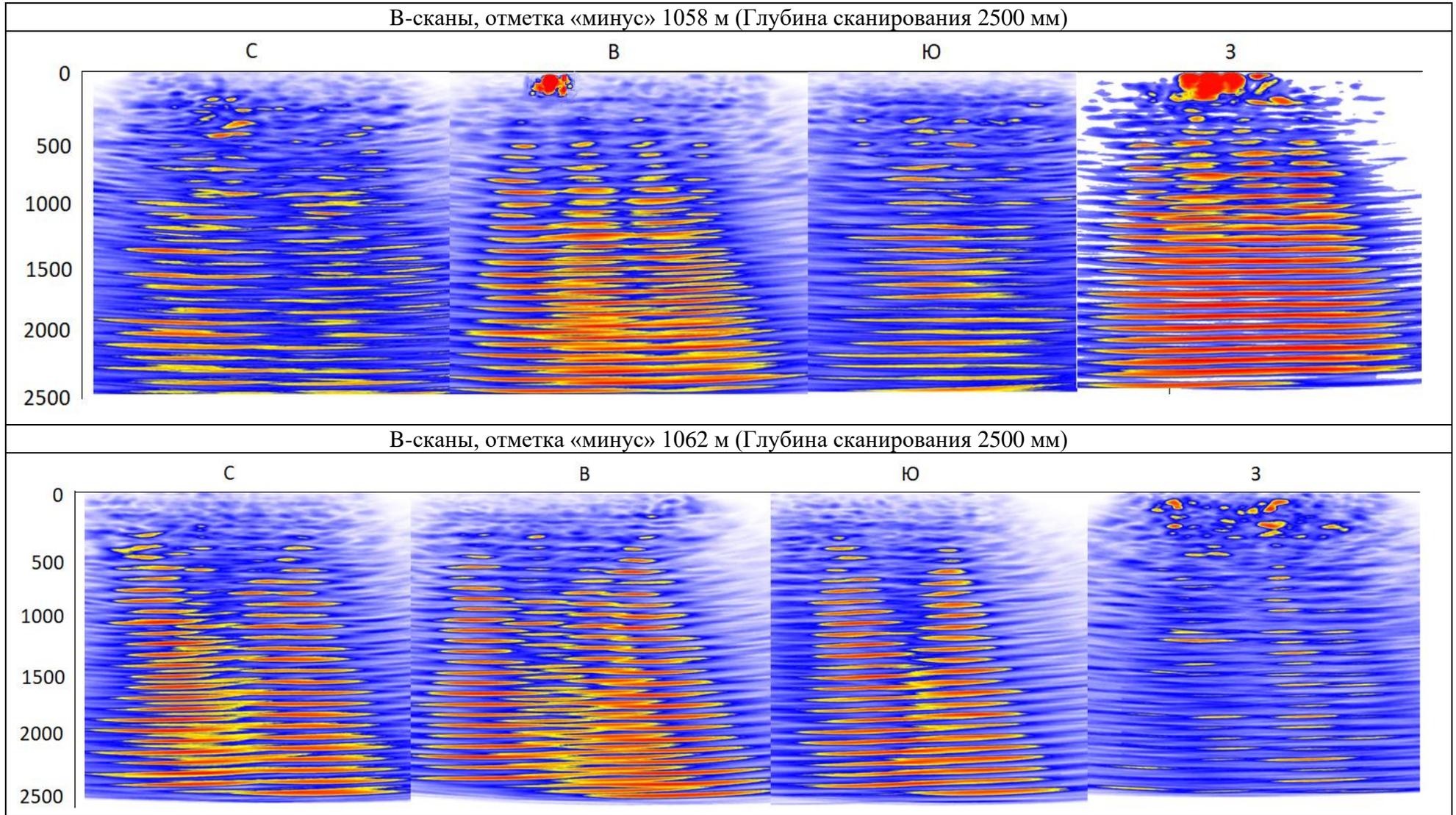


Рисунок 3.6.3.2 – Результаты сканирования крепи вентиляционного ствола ультразвуковым томографом  
(глубина сканирования – 2500 мм)

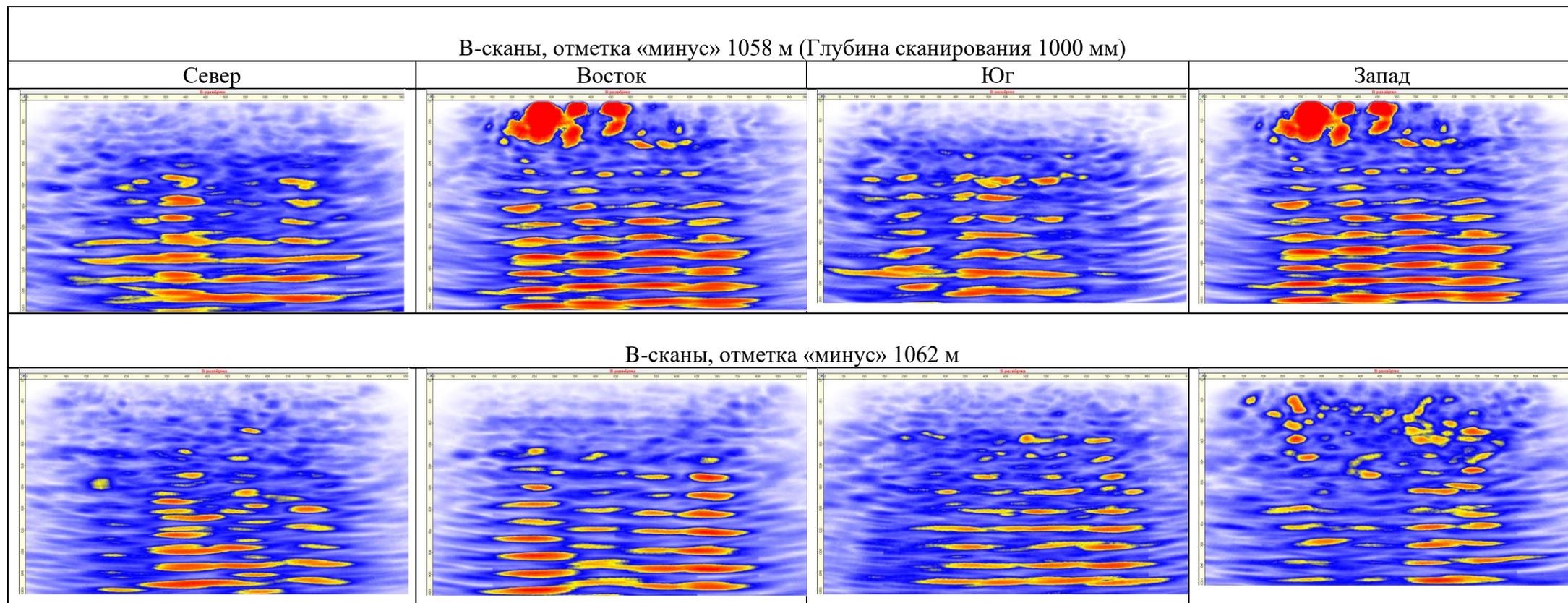
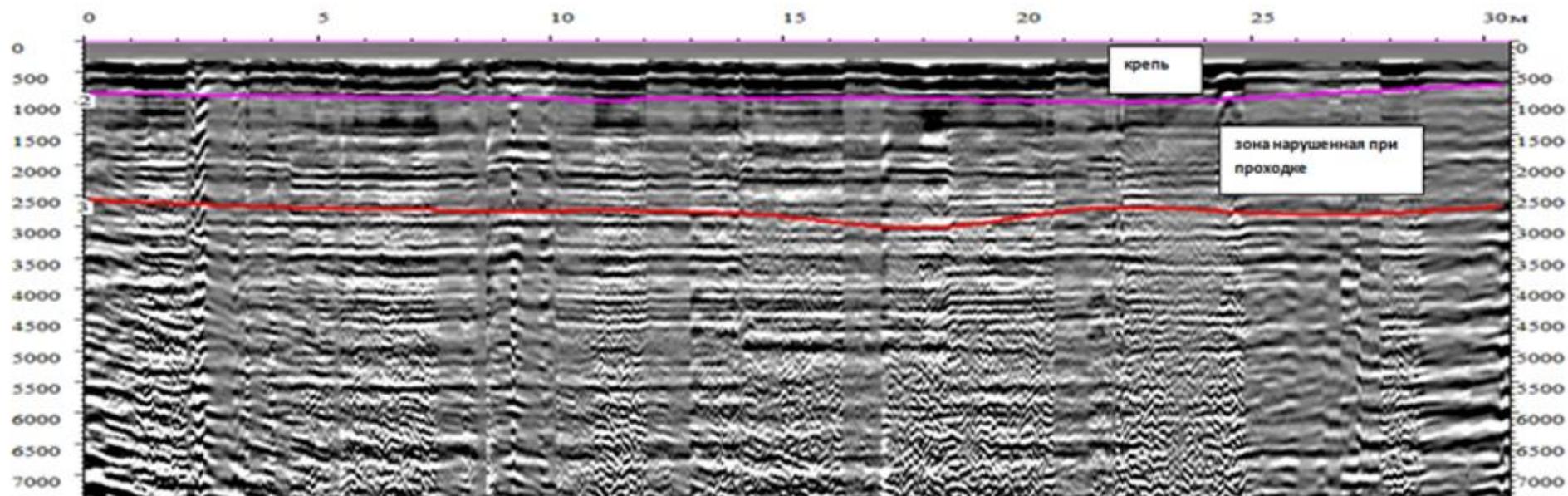
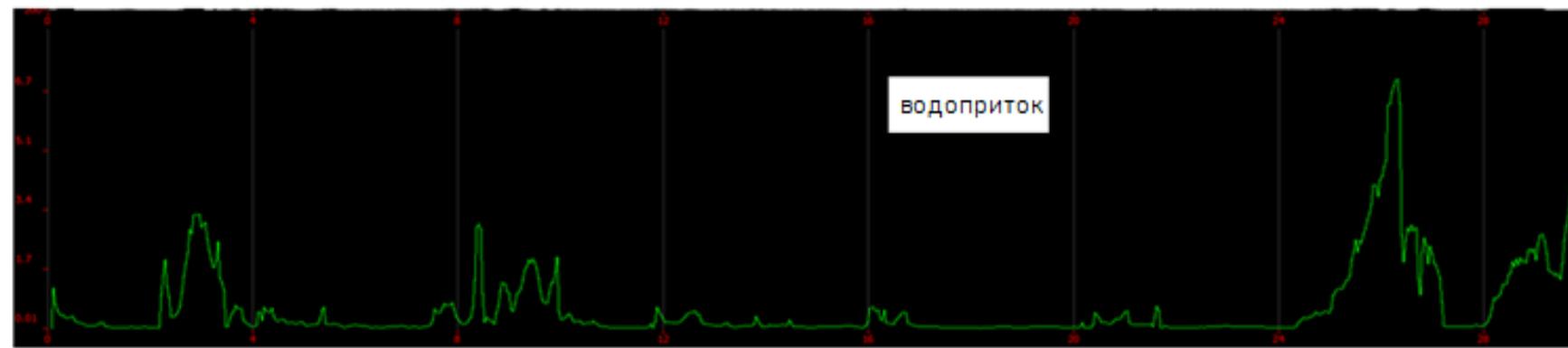


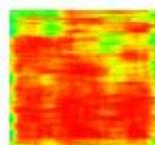
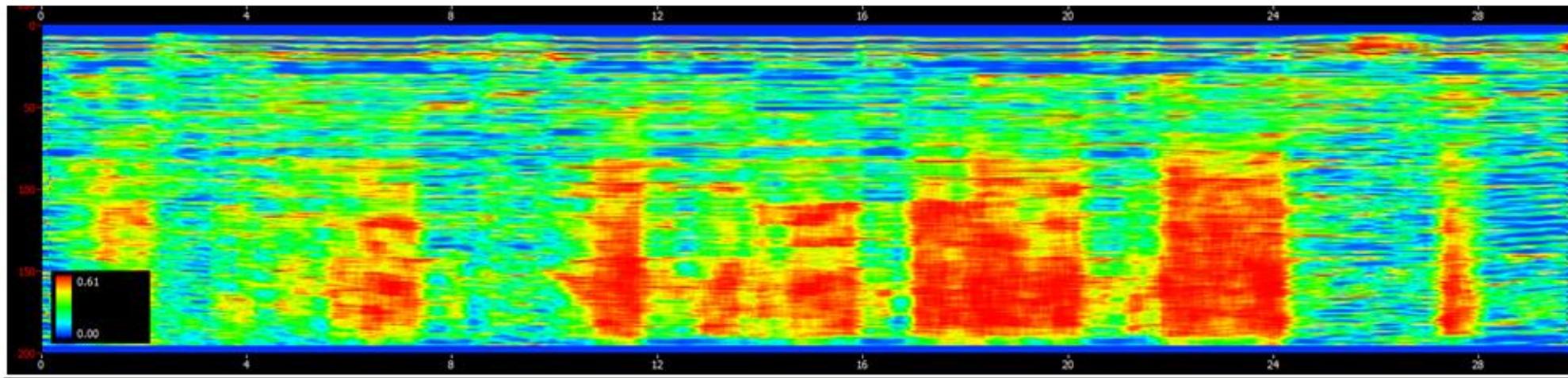
Рисунок 3.6.3.3 – Результаты сканирования крепи вентиляционного ствола ультразвуковым томографом  
(глубина сканирования – 1000 мм)



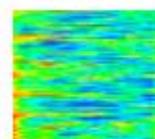
a)



б)



**монолитные участки**



**трещиноватые участки**

в)

Рисунок 3.6.3.4 – Пример результатов георадиолокации в вентиляционном стволе

а) обработанная радарограмма с выделенными границами; б) график водообильности околоствольных пород;

в) зоны трещиноватости

Пример полученных результатов приведён табл. 3.6.3.1. Интервалы плохого контакта выделены желтой заливкой.

Таблица 3.6.3.1 – Результаты обработки данных сканирования скипового ствола (Северо-западное направление)

№ профиля	Отн. отметка начала профиля, м	Отн. отметка конца профиля, м	Длина профиля, м	Мах. толщина крепи, см	Мин. толщина крепи, см	Среднее, см	Коэф. вариации, %	Примечание
PR22	-65	-160,98	95,98	50	19	36	22	Граница тубинговой и бетонной крепи
PR23	-160,98	-257,59	96,62	42	29	38	12	
PR24	-257,59	-350,25	92,66	45	23	42	14	
PR25	-350,25	-443,71	93,46	45	31	42	11	
PR26	-443,71	-537,17	93,46	50	14	42	28	Ремонт металлическими листами между отметками 1-2, 3-4, между 4-5 тубинги, от метки 5 до конца профиля ремонт металлическими
PR27	-537,17	-632,08	94,92	45	31	42	16	
PR28	-632,08	-697,34	65,26	45	31	38	17	
PR29	-697,34	-767,22	69,88	45	22	42	12	
PR30	-767,22	-863,46	96,24	45	38	42	14	
PR31	-863,46	-979,66	116,20	45	18	38	12	между метками 1 и 2 приствольная камера

Средняя толщина крепи скипового ствола составляет 350 мм при минимальных значениях до границы нарушенного контакта «крепь – массив» 130 - 200 мм. Данные величины являются недостаточными для бетонной крепи согласно таблице 7.4 СП 91. СП 91.13330.2012.

Совместное применение сейсмоакустических и георадарных методов позволяет провести качественную оценку контактных условий «крепь – породный массив» и определить зоны нормального и нарушенного контакта. Состояние контакта определяются как отношение значения атрибута А (амплитуды) к фоновому (минимальному) значению  $A_{\phi}$  и ранжируется следующим образом:

1.  $A/A_{\phi} \leq 6$  – плотный контакт «крепь – породный массив»;
2.  $6 < A/A_{\phi} \leq 10$  – частичный (ослабленный) контакт;

3.  $A/A\phi > 10$  – отсутствие контакта «крепь – породный массив».

На рис. 3.6.3.5 представлена карта атрибута «энергия нормированного сигнала», полученная на участке измерений в интервале глубин 1014,0 – 1046,0 м вентиляционного ствола по 36 точкам измерений.

### Энергия нормированного сигнала

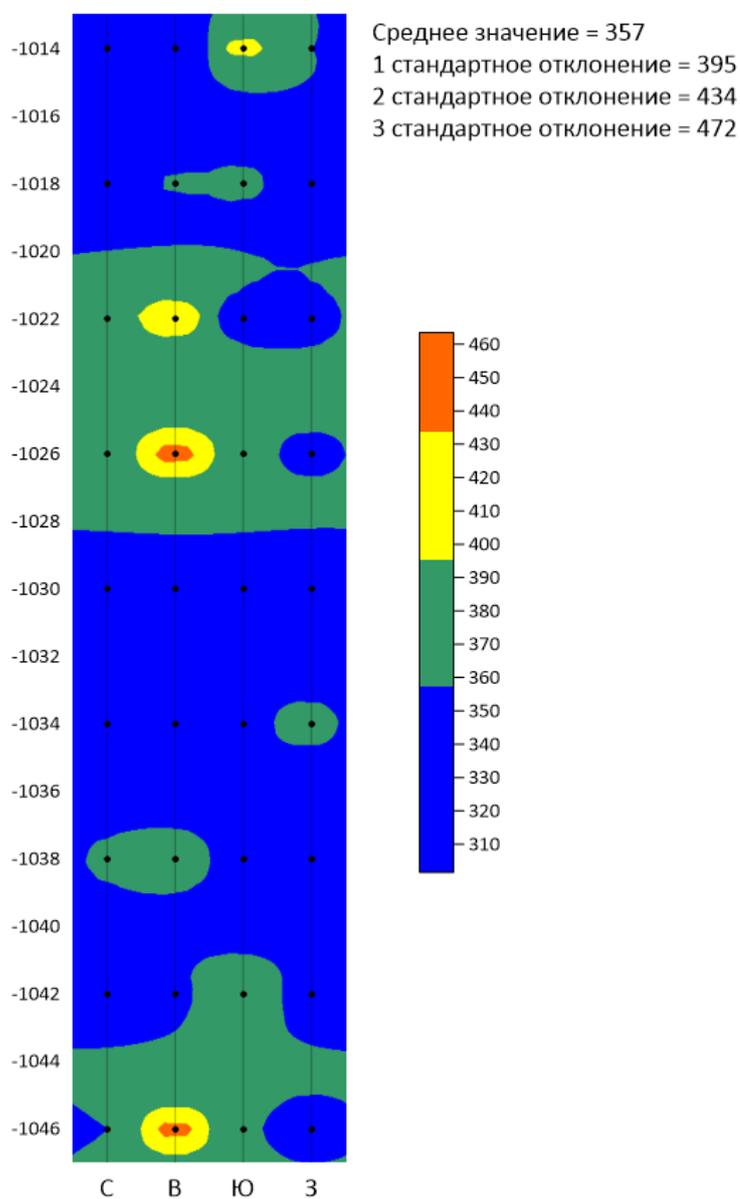


Рисунок 3.6.3.5 – Распределение значений атрибута вдоль линии наблюдений и критерий, определяющий повышенные и пониженные значения атрибута (черными точками показаны пункты наблюдений)

На основе обработки полученных данных выделены две аномальные зоны с относительно ослабленным контактом:

1. Интервал глубин 1047 - 1045 м (направление С-В-Ю).
2. Интервал глубин 1028 – 1020 м (направление С-В-Ю).

По эмпирическому критерию эти зоны являются зонами с удовлетворительным-ослабленным контактом. Зоны с отсутствующим контактом не обнаружены. Полученные результаты в целом хорошо согласуются с данными георадиолокационного зондирования с антенным блоком А400, которое показало плохое состояние контакта «крепь – породный массив» в северо-восточном и северо-западном направлениях ствола на глубинах свыше 1015 м.

В ходе исследований произведен отбор кернов из бетонной крепи на различных участках выработок по глубине.

Статистический анализ полученных данных показал, что крепь стволов характеризуется существенной неоднородностью прочностных свойств бетона с изменением фактического класса бетона от В5 до В30.

Параллельно производилось определение прочности бетона крепи ультразвуковым неразрушающим методом. Дополнительно установлено, что вблизи стыков заходок прочность бетона, как правило, значительно ниже, чем в центральных областях колец крепи, что свидетельствует, в том числе о недостаточно высоком качестве приготовления, доставки и производства бетонных работ при проходке стволов.

Пример графика изменения прочности бетона крепи по глубине ствола, полученный по результатам обработки данных испытаний приведён на рис. 3.6.3.6.

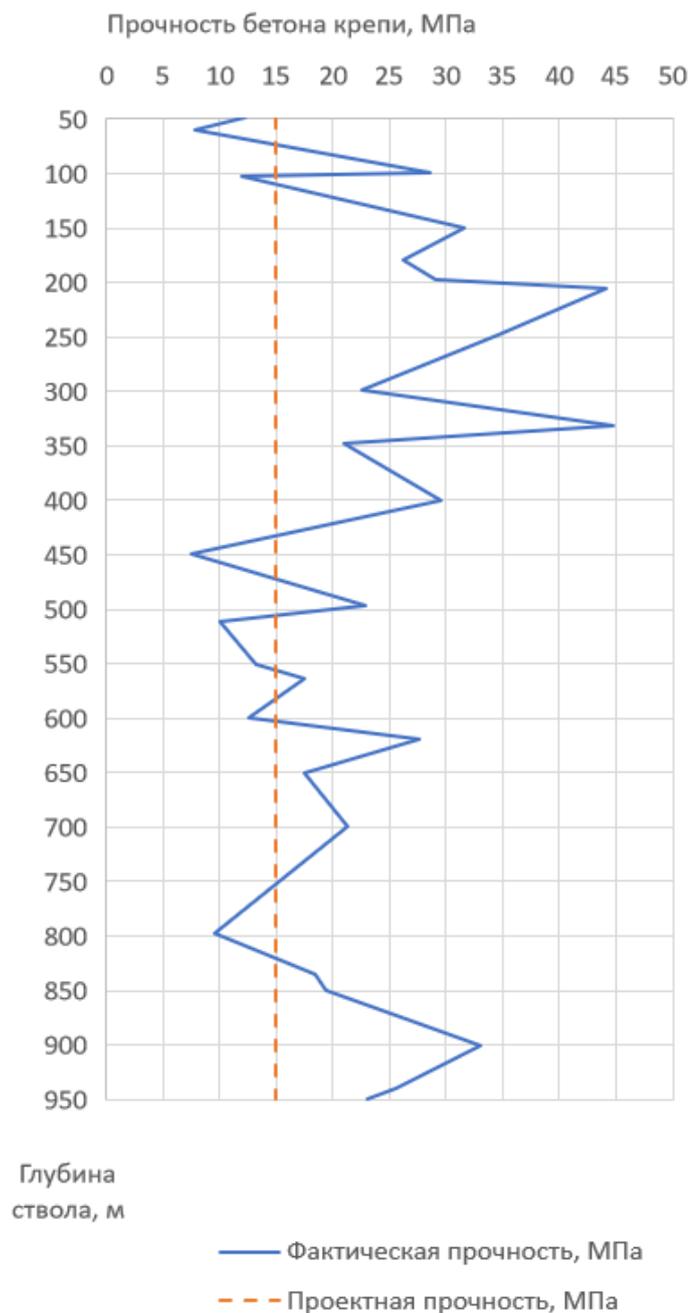


Рисунок 3.6.3.6 – График изменения прочности бетона крепи по глубине ствола

### ***3.6.4 Результаты обследовательских работ третьего (глубинного) уровня***

В вентиляционном стволе при обследовании выявлен протяженный аварийный участок, где дополнительно проведены комплексные геомехани-

ческие и геофизические исследования с бурением горизонтальных и наклонных скважин с выработки горизонта, расположенной на расстоянии 50 м от ствола.

По результатам анализа полученного кернового материала установлено, что по направлению простирания пород от горизонтальной выработки к вентиляционному стволу в интервале от 0,0 до 22,5 м массив представлен прослоями аргиллита и субпараллельными зонами дробления (дезинтеграции) массива; в интервале от 32,5 м до проектной отметки скважин – прослой аргиллита и субпараллельные тектоническим нарушениям зоны дробления (дезинтеграции) массива.

Общая оценка устойчивости показала по методике, изложенной в главе 2 диссертации показала, что изученный участок относится к наихудшей V-й категории.

Для оконтуривания зоны дезинтеграции пород выполнены радиоволновые исследования способом объемной радиоволновой геоинтроскопии горных пород «3D РВГИ».

На рисунке 3.6.4.1 представлен «куб данных» - 3D матрица эффективных значений электрических сопротивлений  $\rho_{эфф}$  в элементарных ячейках в форме куба размером 2x2x2 м, полученная по результатам обработки всех сечений РВГИ на частоте 2.25 МГц с помощью 3D алгоритма объемной обработки способом волнового восстановления. «Куб данных» ограничивает исследованную область и в обобщенном виде наглядно представляет всю совокупность данных просвечивания - 3D геоэлектрическую карту РВГИ.

3D карта РВГИ может быть представлена в виде произвольно ориентированных вертикальных сечений (разрезов) и горизонтальных сечений (планов), построенных в изолиниях значений  $\rho_{эфф}$ , Ом·м (рис. 3.6.4.2 - 3.6.4.4) или в виде изоповерхности с фиксированным значением сопротивления (рис. 3.6.4.5).

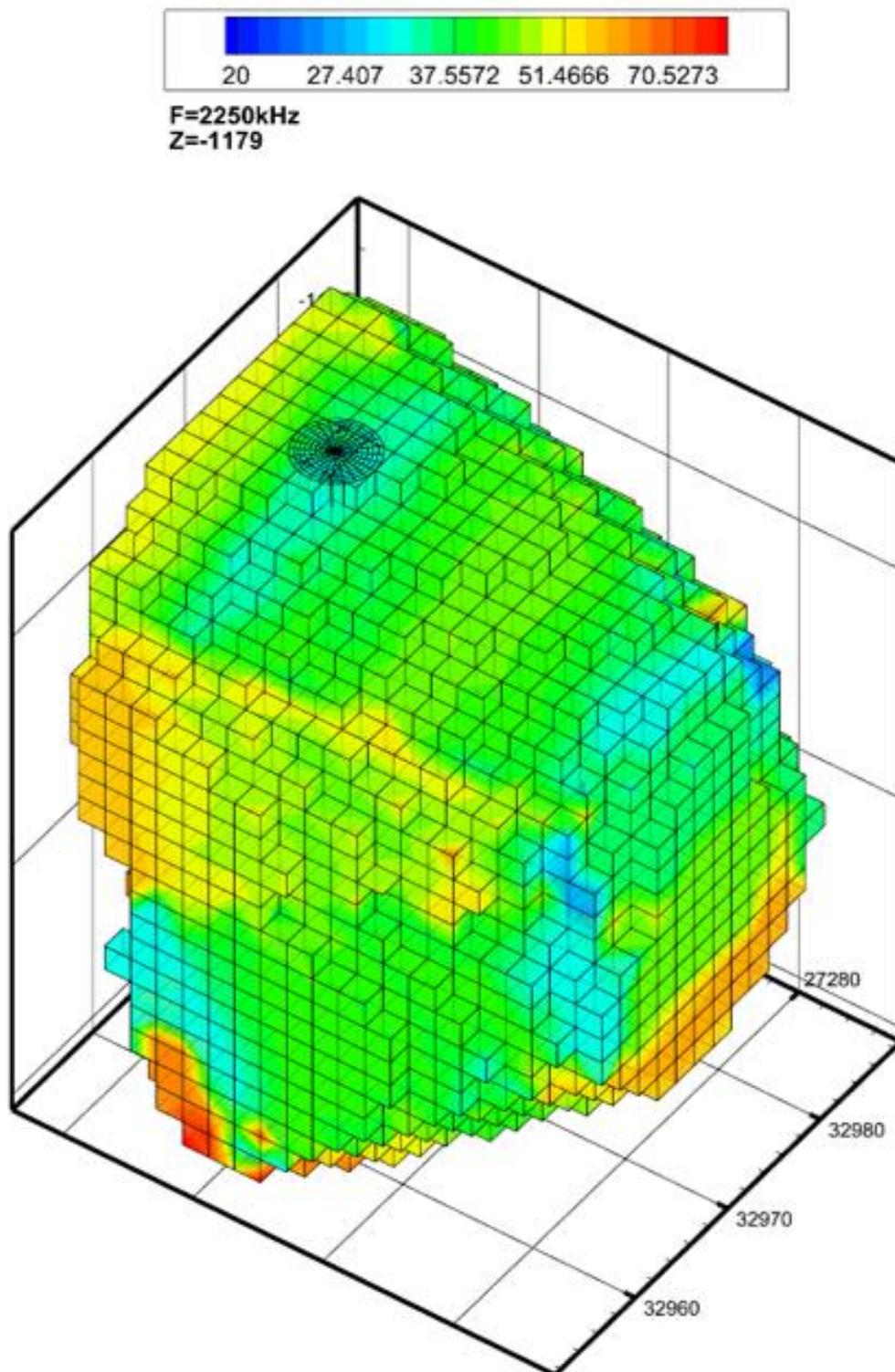


Рисунок 3.6.4.1 – 3D карта РВГИ («куб данных в элементарных ячейках обработки») в эффективных значениях электрического сопротивления  $\rho_{эфф}$ , Ом·м. Частота 2.25 МГц

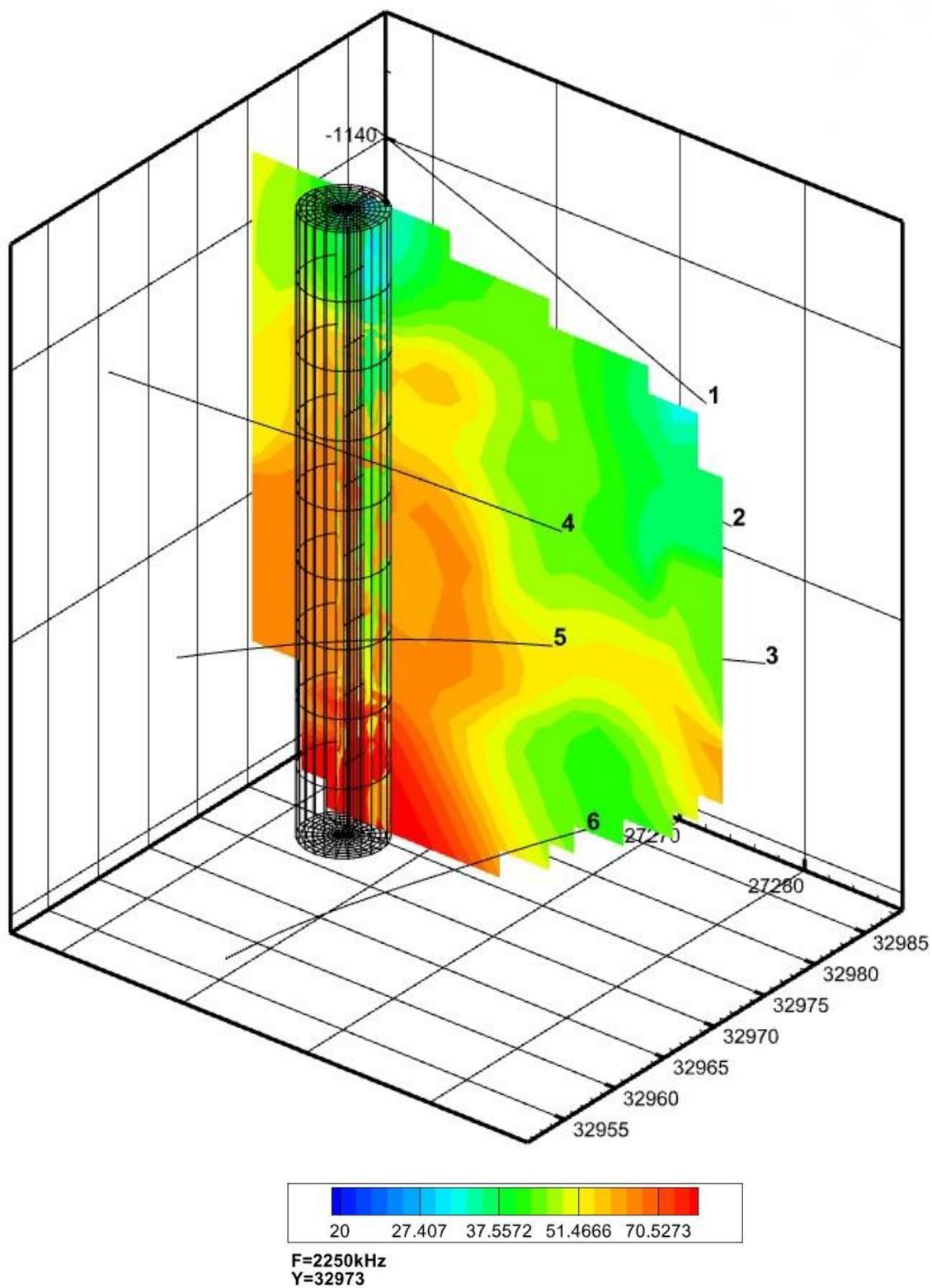


Рисунок 3.6.4.2 – Фрагмент 3D карты РВГИ. Вертикальный геоэлектрический разрез по оси Y через ось ствола ВС-5

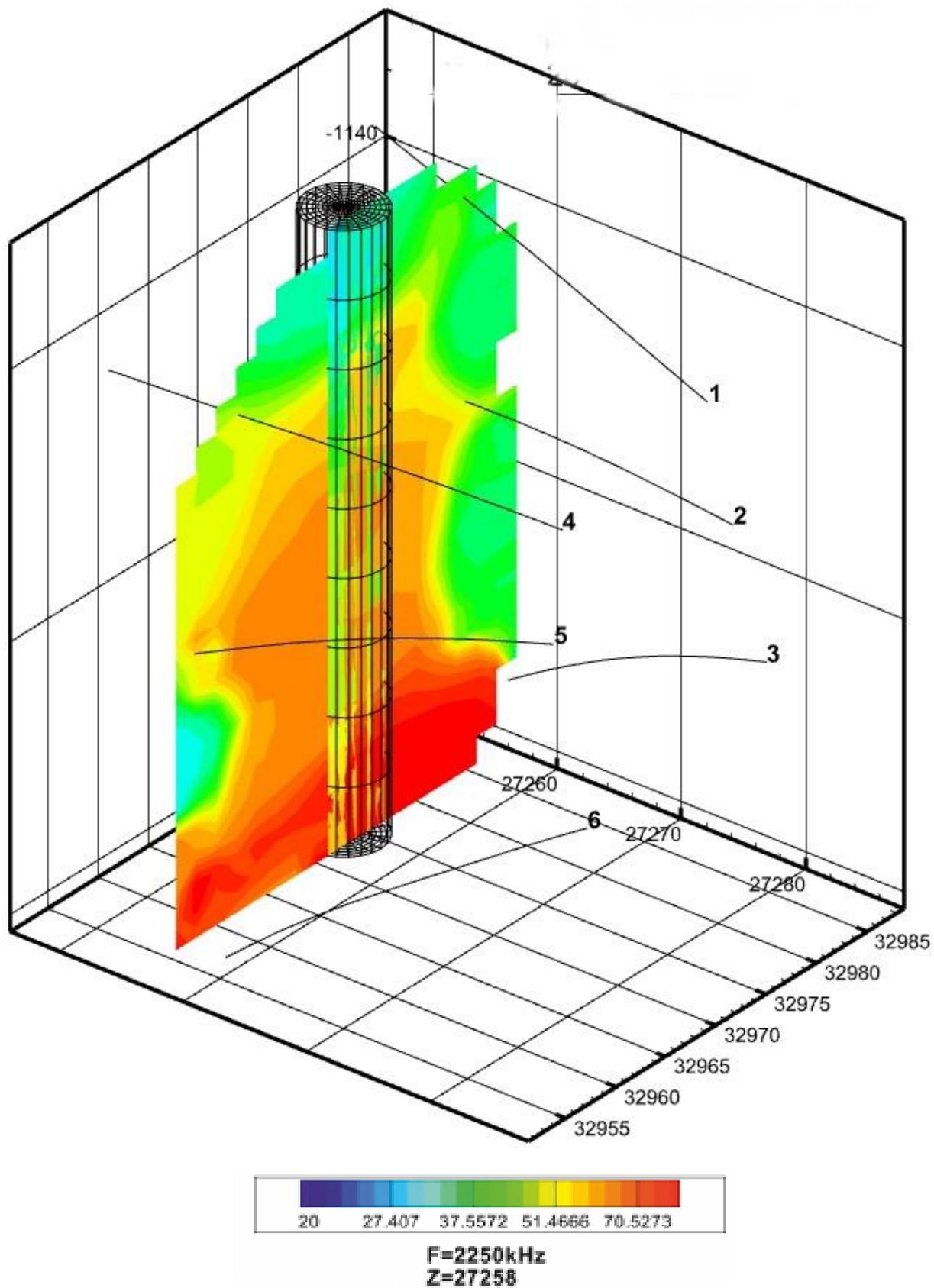
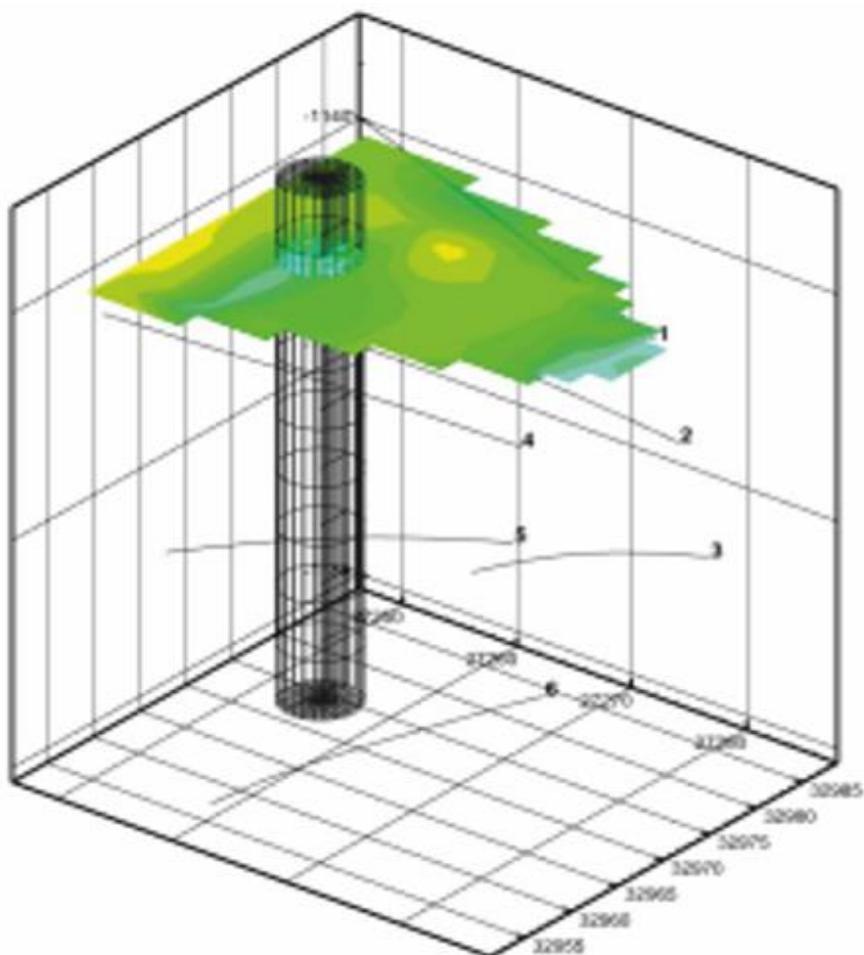


Рисунок 3.6.4.3 – Фрагмент 3D карты РВГИ. Вертикальный геоэлектрический разрез по оси X через ось ствола ВС-5

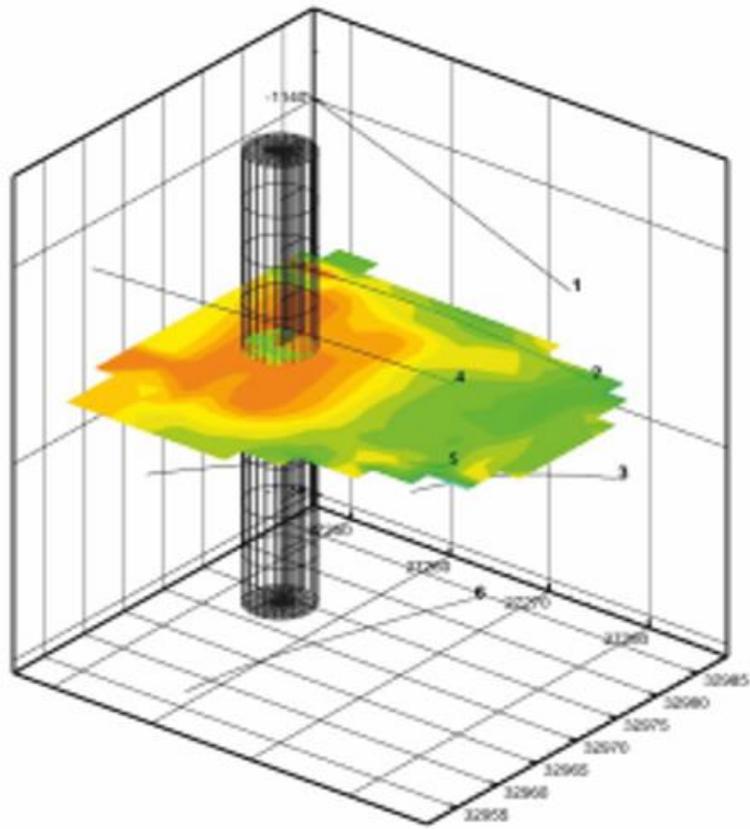
На разрезах можно выделить следующие основные особенности:

- область пород, непосредственно примыкающих к вентиляционному стволу, характеризуется пониженным поглощением радиоволн, то есть относительно высоким электрическим сопротивлением;

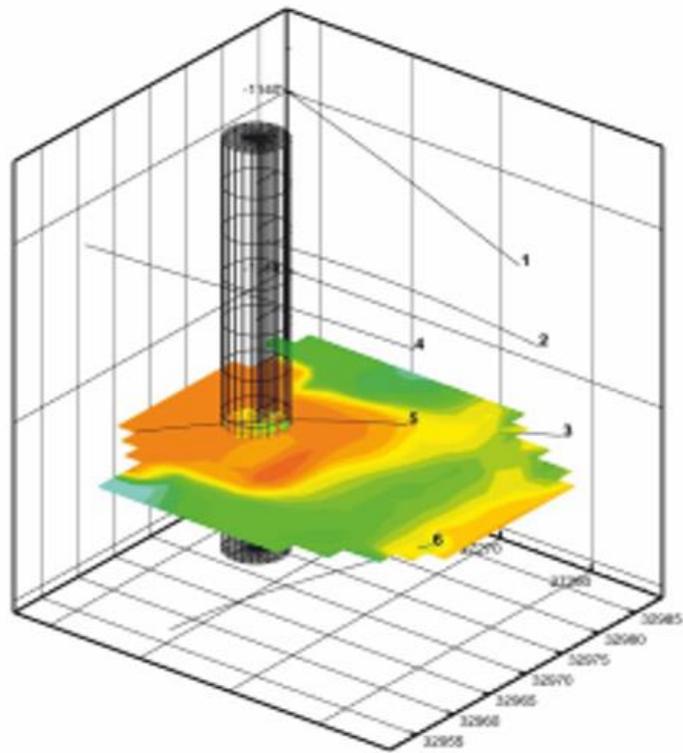
- выделенная и оконтуренная аномалия пониженного поглощения характеризуется постепенным повышением сопротивления пород вниз по разрезу и имеет «пережимы» и «раздувы». Еще более отчетливо это видно на горизонтальных сечениях (рис. 3.6.4.4), где размеры аномальной области в плане (диаметр) варьируется приблизительно от 10 до 20 м.



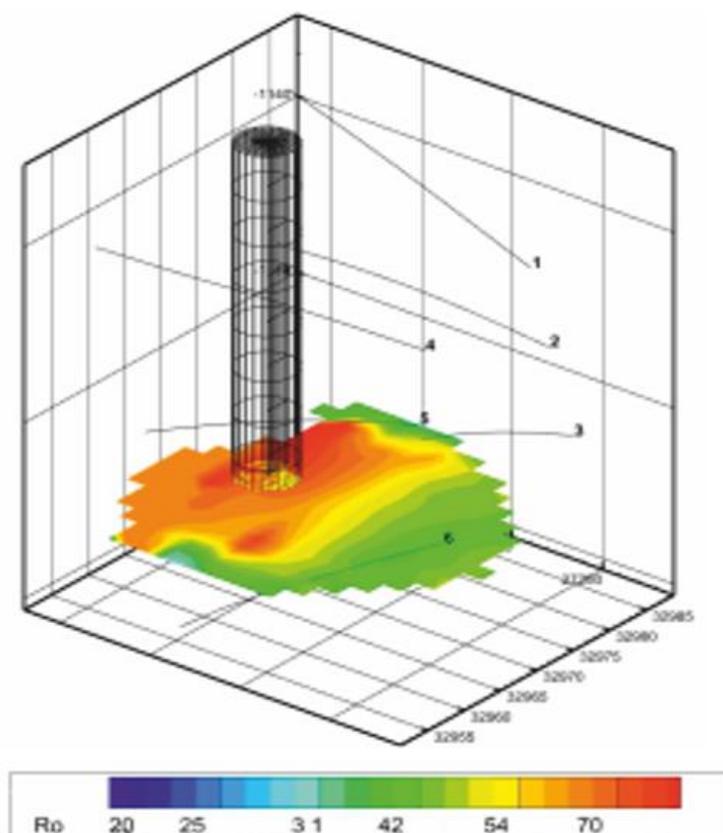
а) глубина 1140 м



б) глубина 1153 м



в) глубина 1165 м



г) глубина 1171 м

Рисунок 3.6.4.4 – Горизонтальные геоэлектрические разрезы по различным глубинам

Представленное на фрагментах 3D карты РВГИ распределение электрического сопротивления пород визуализирует неоднородность геологического строения вмещающих пород, а выделенные области аномально низкого поглощения могут быть интерпретированы, как зоны разрушения и дезинтеграции пород вокруг вентиляционного ствола. Для наглядности, на рис. 3.6.4.5 область повышенного сопротивления пород, предположительно связанная с дезинтегрированными породами вокруг ствола ВС-5, представлена в виде объемной фигуры, ограниченной изоповерхностью по значению эффективного сопротивления  $\rho_{эфф} = 58 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ .

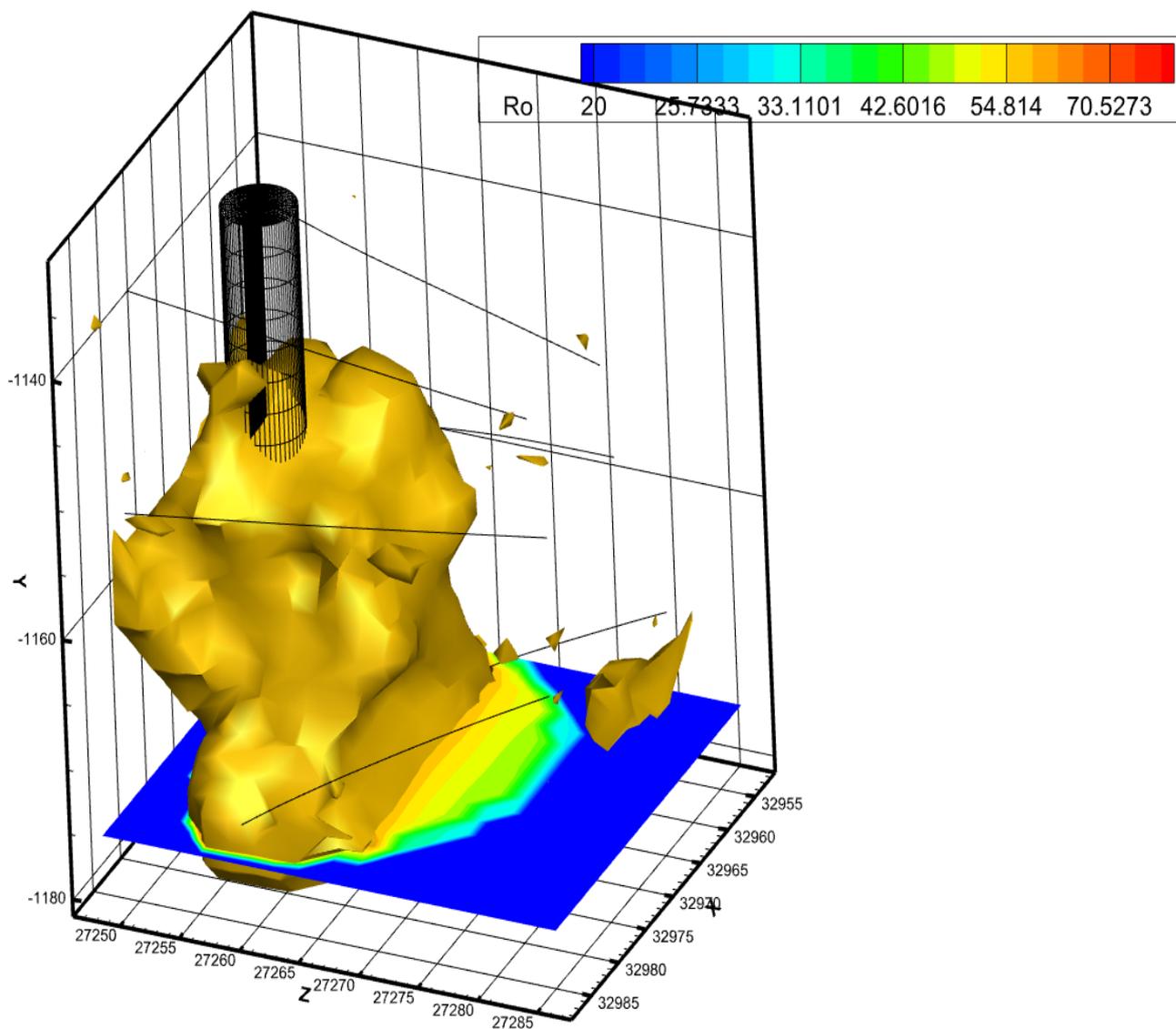


Рисунок 3.6.4.5 – 3D карта РВГИ в виде изоповерхности по значению эффективного сопротивления  $\rho_{эфф} = 58 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ . Аксонометрическая проекция

Установлено, что, вокруг ствола ВС-5 наблюдается область высокоомных пород, предположительно связанная с их дезинтеграцией, произошедшей в результате обрушения. Повышение сопротивления скорее всего вызвано повышенным дренажом воды из дезинтегрированных пород, связанным с образованием дополнительных каналов – трещин, по которым вода уходит в ниже расположенную часть ствола вентиляционного ствола. Нарушенные породы, в отличие от ненарушенных, неспособны удерживать воду. Таким образом, результаты геофизических исследований подтвердили данные бур-

ния геомеханических скважин и позволили уточнить геометрические параметры дезинтегрированной зоны.

### **3.6.5 Результаты определения остаточного запаса несущей способности крепи и общей оценки технического состояния стволов**

Расчёты выполнены методом конечных элементов с применением программного комплекса Midas FEA NX в пространственной постановке задачи. Теоретические предпосылки математического моделирования подробно рассмотрены в 4 главе диссертации.

Пример полученных результатов проверочных расчетов несущей способности и определения критерия  $K_N$  (см. 2.2.2) для различных участков скипового ствола приведён в таблице 3.6.5.1.

Таблица 3.6.5.1 – Результаты проверочных расчетов несущей способности крепи ствола

№	Глубина расчётного участка, м	Наибольшие горизонтальные напряжения в массиве пород, МПа	Нагрузка на крепь (контактные напряжения), МПа	Максимальные напряжения в крепи, МПа	$N_{c,n}$	$N_{c,0}$	$N$
1	60	1,57	0,097	1,4	1,42	2,14	0,66
2	102	2,28	0,121	1,7	1,83	2,08	0,88
3	180	3,39	0,298	4,2	1,89	1,89	1,00
4	206	3,78	0,608	8,5	1,37	1,77	0,77
5	298	4,92	0,49	6,9	0,85	1,63	0,52
6	332	5,17	0,385	5,4	2,17	1,55	1,40
7	400	5,9	0,335	4,7	1,69	1,49	1,13
8	448	6,44	0,251	3,5	0,88	1,41	0,62
9	511	7,06	0,271	3,8	0,82	1,43	0,57
10	563	7,56	0,434	6,1	0,85	1,56	0,54
11	620	8,09	0,461	6,5	0,80	1,43	0,56

Анализ результатов расчетов показывает, что в интервалах скипового ствола на глубинах от 30 до 450 м имеются отдельные участки крепи, на которых не выполняются соответствующие условия по предельным состояниям первой группы.

В интервалах глубин от 450 до 620 м крепь ствола не удовлетворяет критериям по первой группе предельных состояний. Запредельный режим работы крепи подтверждается большим количеством дефектов и локальных разрушений в существующей крепи в данных интервалах.

По итогам обследования скиповой ствол отнесен к категории ограниченно работоспособного технического состояния, а вентиляционный – к категории аварийного технического состояния.

Для вентиляционного ствола потребовалась незамедлительная разработка проекта реконструкции, с применением управляющего воздействия РЗ – реконструкция ствола с применением комплексных решений по упрочнению околоствольного массива (см. табл. 2.4.1).

### 3.7 ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 3

1. Усовершенствована программа обследования глубоких вертикальных стволов с большим сроком эксплуатации, предусматривающая применение визуальных методов обследования крепи, комплекс инструментальных методов, отбор кернов и определение прочности бетонной крепи, геофизическое и геомеханическое изучение околоствольного массива, расчеты и статистическую обработку данных с последующим определением категории технического состояния.

2. Представлены примеры апробации методики оценки технического состояния глубоких вертикальных стволов Норильского промышленного района, включающие результаты визуального обследования с построением карты дефектов, трехуровневого инструментального обследования, включая изучения нарушенности околоствольного массива пород, расчеты остаточной несущей способности крепи и определение категории технического состояния

выработок. По итогам обследования скиповой ствол отнесен к категории ограниченно работоспособного технического состояния, а вентиляционный – к категории аварийного технического состояния. Для вентиляционного ствола потребовалась незамедлительная разработка проекта реконструкции с применением комплексных решений по упрочнению околоствольного массива.

## **4 ОБОСНОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СХЕМ РЕКОНСТРУКЦИИ ВЕРТИКАЛЬНЫХ СТВОЛОВ**

### **4.1 ОСНОВНЫЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПОЛОЖЕНИЯ**

На следующем этапе исследований перейдем к разработке эффективных элементов строительных геотехнологий по реконструкции шахтных стволов с большим сроком эксплуатации.

В соответствии с целью и задачами работы рассматриваются, прежде всего, стволы в неработоспособном техническом состоянии, основная протяжённость которых относится IV и V категориям устойчивости, и требует проведения реконструкции с изменением проектных параметров. В результате реализации такого проекта в стволе формируется геотехнологическая система «новая крепь – существующая крепь – дезинтегрированный породный массив» (далее геотехнологическая система), анализ которой и позволит сделать обоснованный выбор в пользу тех или иных строительных геотехнологий.

Следует отметить, что изучение напряженно-деформированного состояния геотехнологической системы является комплексной многофакторной задачей. Анализ проведенных натуральных и лабораторных исследований по оценке технического состояния шахтных стволов, обобщённый в третьей главе диссертационной работы, показал, что при прогнозе напряженно-деформированного состояния следует рассматривать пространственную задачу с учетом фактического состояния крепи и околоствольного породного массива.

В реконструируемых вертикальных стволах, околоствольные породы которых отнесены к IV и V категориям устойчивости, основной формой потери устойчивости является вывалообразование с разрушением конструкций крепи, поэтому важнейшей задачей обеспечения безопасности работ является обоснованное применение технических и технологических решений, исключающих наступление таких предельных состояний.

Большое количество влияющих на геотехнологическую систему факторов наилучшим образом может быть учтено при математическом моделировании с применением современных программных комплексов. При этом выделяется несколько подходов к моделированию, проявляющихся на этапе создания расчетной схемы: выбор модели пород, возможность представления массива в виде сплошной или дискретной среды, особенности задания нагрузок, воздействий, полей напряжений. В общем случае алгоритм математического моделирования может быть представлен в виде следующей блок-схемы (рис. 4.1.1).

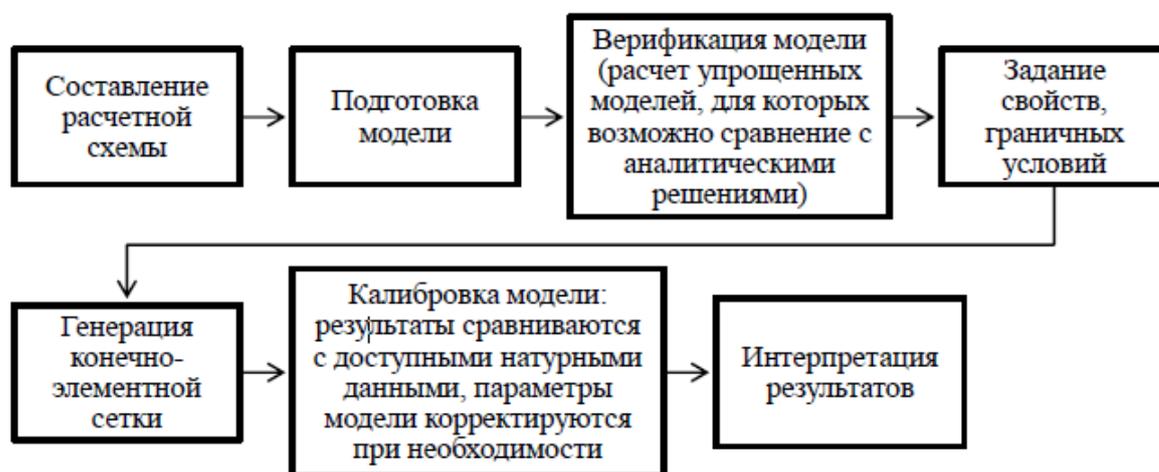


Рисунок 4.1.1 – Последовательность математического моделирования геотехнологической системы

С учетом результатов проведенного в первой главе диссертации анализа, для решения поставленной задачи принят метод конечных элементов в пространственной постановке, а для создания и расчета моделей использованы современные программные комплексы Plaxis 3D и Midas FEA NX.

Применение данных комплексов, за счет их высокой производительности, позволяет провести необходимые вычислительные эксперименты, основанные на расчете серии вариантов крепления при изменении входных параметров, с рассмотрением геотехнологической системы в 4D постановке, учитывающей, как пространственную ствола, так и влияние на его состояние технологических и временных факторов.

## 4.2 ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНЫХ МОДЕЛЕЙ

### 4.2.1 Выбор упругопластической модели для дезинтегрированных скальных пород

Для изучения закономерностей изменения НДС геотехнической системы в диссертационном исследовании используются модели деформирования пород Кулона-Мора и Хоека-Брауна [95,96].

Первая модель применяется для участков стволов, где отсутствуют достоверные данные по определению параметров дезинтеграции околоствольного массива (не проводилось керновое бурение).

Общепринятым математическим описанием теории прочности Кулона-Мора является выражение:

$$\tau = C + \sigma \times \operatorname{tg} \phi, \quad (4.2.1.1)$$

где  $\tau$  – предел прочности породы на срез, МПа;

$C$  – сцепление, МПа;

$\sigma$  – нормальное напряжение, действующее на площадке разрушения, МПа;

$\phi$  – угол внутреннего трения, град.

В практических геомеханических расчетах более широко применяют выражение с использованием главных напряжений:

$$2C \cos \phi + (\sigma_1 + \sigma_3) \sin \phi \geq (\sigma_1 - \sigma_3) \quad (4.2.1.2)$$

Из выражения (4.2.2) получаем критерий устойчивости массива пород следующего вида:

$$K_m = \frac{2C \cos \phi + (\sigma_1 + \sigma_3) \sin \phi}{(\sigma_1 - \sigma_3)} \quad (4.2.1.3)$$

Значения  $K_m < 1$  характеризуют области возможного запредельного деформирования пород. В практических расчетах пороговый уровень целесообразно назначать равным  $K_m < 1,2$ .

Упругопластическая модель Хоека-Брауна широко применяется для геомеханических расчетов ненарушенных и нарушенных скальных массивов

(рис. 4.2.1.1). Ее целесообразно использовать для анализа геотехнологической системы при наличии до

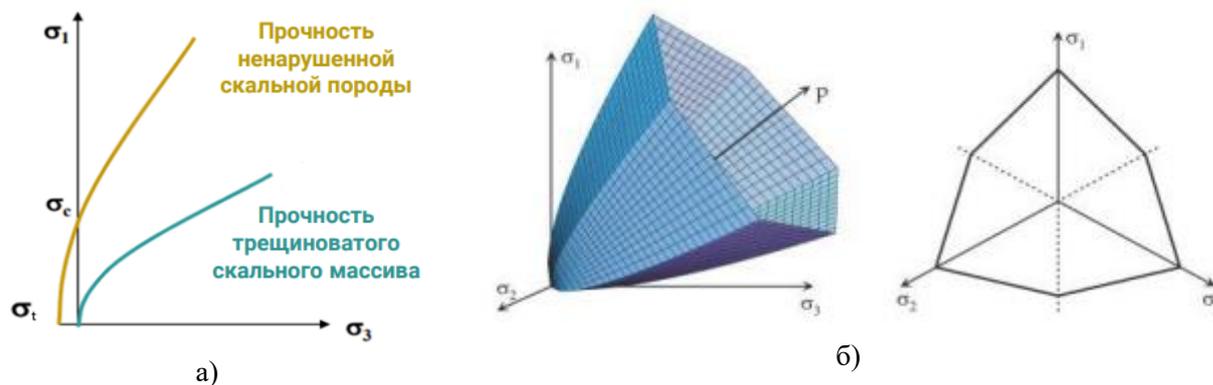


Рисунок 4.2.1.1 – Критерий прочности Хоека – Брауна:

а) графики изменения прочности; б) поверхность разрушения

Для определения обобщенного критерия Хоека-Брауна используются четыре начальных параметра:

$\sigma_{ci}$  – прочность на одноосное сжатие;

$m_i$  – литологический тип грунтов;

$GSI$  – индекс геологической прочности, зависящий от структуры массива, например, ненарушенный, блочный, флишевый и т.д. (изменяется в общем случае от 0 до 100);

$D$  – фактор техногенной нарушенности (взрывные работы, экскавация) массива горных пород (изменяется от 0 до 1).

Критерий в процессе своего развития претерпевал несколько модификаций, современное выражение для его определения имеет следующий вид:

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_{ci} \left( m_b \frac{\sigma_3}{\sigma_{ci}} + s \right)^a, \quad (4.2.1.4)$$

где  $\sigma_1$  и  $\sigma_3$  – главные напряжения,  $\sigma_{ci}$  – прочность на одноосное сжатие,  $m_b$ ,  $s$  и  $a$  – критерии Хоека-Брауна для породы, которые можно получить из следующих уравнений:

$$m_b = m_i \exp \left( \frac{GSI-100}{28-14D} \right); \quad (4.2.1.5)$$

$$s = \exp \left( \frac{GSI-100}{9-3D} \right); \quad (4.2.1.6)$$

$$a = \frac{1}{2} + \frac{1}{6} (e^{-GSI/15} - e^{-20/3}); \quad (4.2.1.7)$$

$$E_m(GPa) = \left(1 - \frac{D}{2}\right) \sqrt{\frac{\sigma_{ci}}{100}} \cdot 10^{\left(\frac{GSI-10}{40}\right)}. \quad (4.2.1.8)$$

Параметр  $s$  в критерии Хоека-Брауна исполняет роль учета степени нарушенности массива и снижения его прочности на сжатие по сравнению с образцом.

Физический смысл постоянной  $m_i$  для конкретного литологического типа пород – это соотношение предела прочности на одноосное сжатие к пределу прочности на растяжение ненарушенной породы (в образце). Степенной показатель  $a$  в большом диапазоне значений индекса  $GSI$  составляет  $a = 0,5$  (рис. 4.2.1.2).

Каждый из описанных выше четырех входных параметров ( $\sigma_{ci}$ ,  $m_i$ ,  $GSI$ ,  $D$ ) может быть оценен на основе классификационных графиков и таблиц Хоека-Брауна в зависимости от конкретных геологических условий. На рисунке 4.2.1.3 приведена классификация структуры массивов скальных грунтов для определения индекса геологической прочности  $GSI$ .

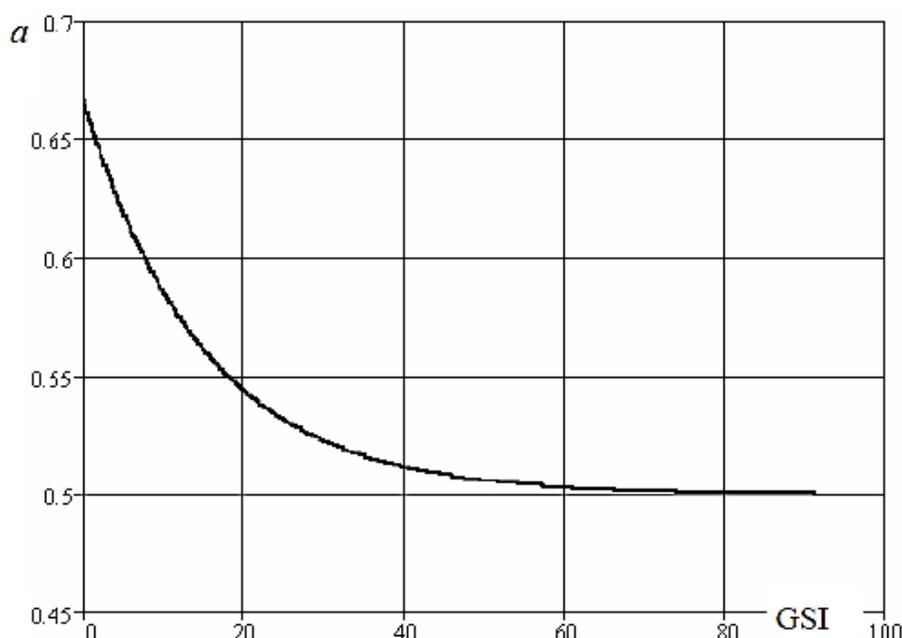


Рисунок 4.2.1.2 – Пределы изменения показателя степени  $a$  в зависимости от индекса геологической прочности

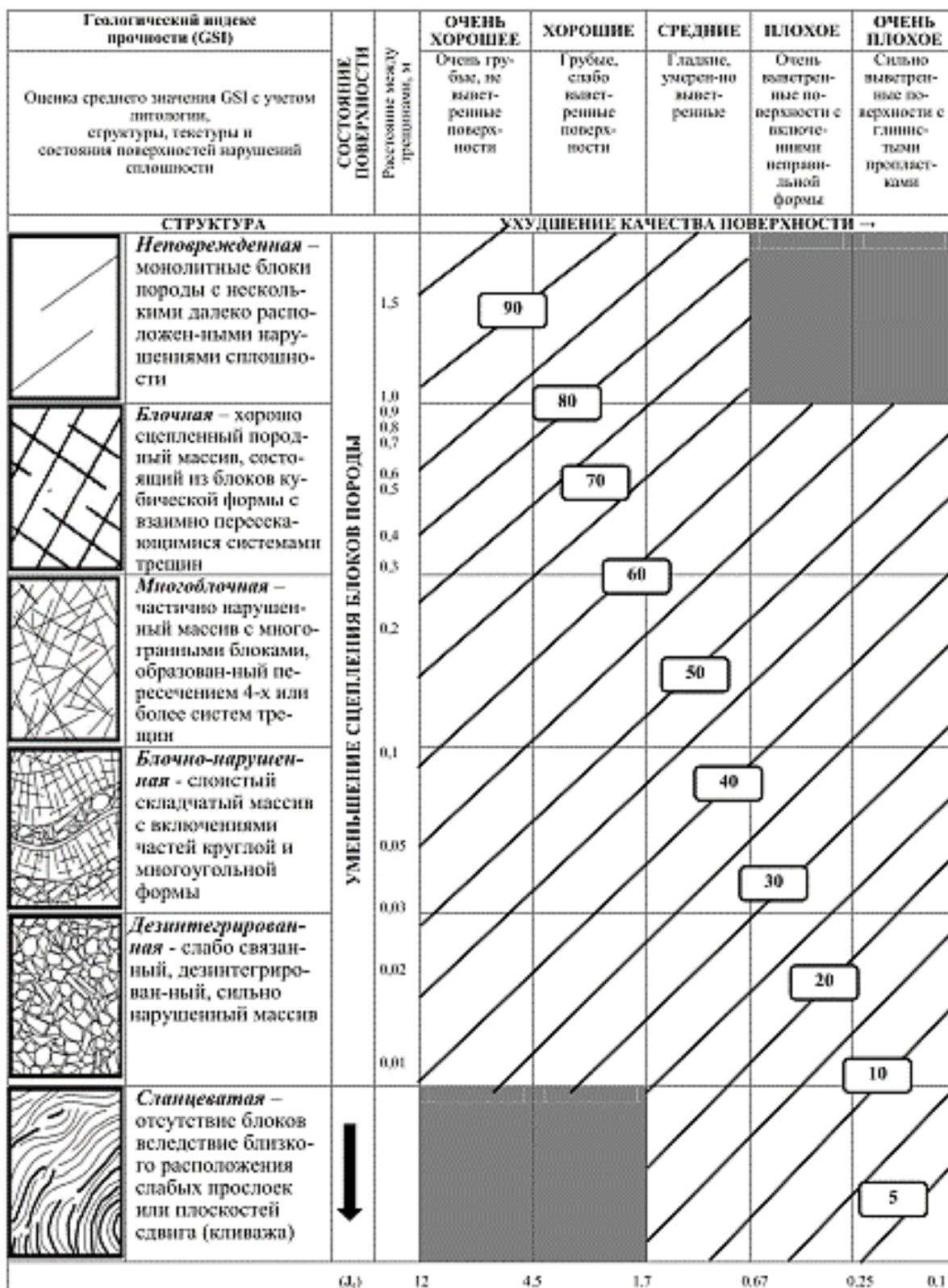


Рисунок 4.2.1.3 – Классификация структуры массивов скальных грунтов для определения индекса геологической прочности GSI

Значения коэффициента техногенной нарушенности массива  $D$  (Determination of rock mass disturbance factor  $D$ ) приведены в табл. 4.2.1.1.

Таблица 4.2.2.1 – Значения коэффициента техногенной нарушенности массива  $D$

	Описание
$D = 0$	Хорошее качество пород. Минимальные нарушения, механический способ проходки выработок
$D = 0,5$	Случаи, когда горное давление приводит к нарушению приконтурного массива, а также обрушениям массива вмещающего выработку. Буровзрывной способ проходки выработок
$D = 0,8$	Выработка, пройденная с применением буровзрывного способа проходки, который приводит к нарушению приконтурного массива на глубину до 2–3 м

Известные эмпирические зависимости, учитывающие влияние нарушенности массива на его деформационные характеристики, приведены на рис. 4.2.1.4.

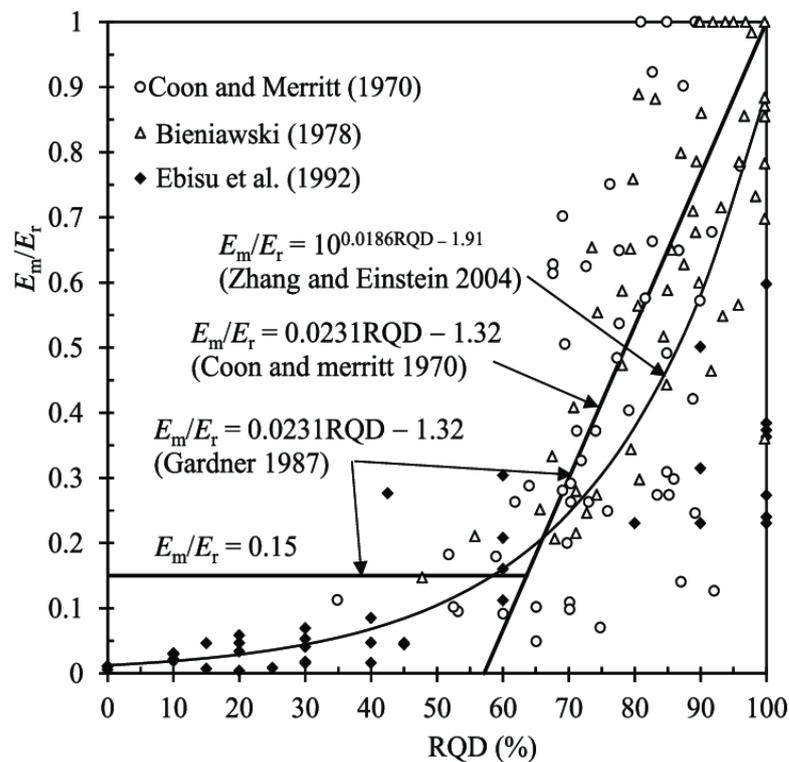


Рисунок 4.2.1.4 – Эмпирические зависимости, учитывающие влияние нарушенности массива на его деформационные характеристики [95,97]

#### 4.2.2 Определение начального поля напряжений в породном массиве

Для интервалов стволов, где отсутствуют повышенные тектонические напряжения, принимается гравитационная модель распределения напряже-

ний, компоненты которой определяются по формулам:

$$\sigma_1 = \gamma H; \quad \sigma_2 = \sigma_3 = \lambda \gamma H, \quad (4.2.2.1)$$

где  $\gamma$  – средний удельный вес пород налегающей толщи;

$H$  – глубина залегания расчетного участка ствола;

$\lambda$  – коэффициент бокового распора пород.

Для описания природного напряженного состояния породных массивов месторождений полезных ископаемых в условиях тектонического воздействия используются корреляционные зависимости, полученные экспериментально-аналитическим путем для Талнахско-Октябрьского месторождения [98,99]:

$$\sigma_{H \max} = 2,8 e^{\kappa \lambda} \gamma H^{0.7} \approx \sigma_1; \quad (4.2.2.2)$$

$$\sigma_{h \min} = (0,60 \div 0,70) \sigma_{H \max} \approx \sigma_2; \quad (4.2.2.3)$$

$$\sigma_v \approx \gamma H \approx \sigma_3, \quad (4.2.2.4)$$

где  $\sigma_v$ ,  $\sigma_{H \max}$ ,  $\sigma_{h \min}$  – вертикальные, максимальные и минимальные горизонтальные напряжения;

$\lambda$  – коэффициент бокового давления, изменяющийся с глубиной;

$\nu$  – коэффициент Пуассона пород;

$\kappa$  – эмпирический коэффициент, учитывающий деформационно-прочностные свойства горных пород.

### ***4.2.3 Алгоритм разработки математической модели***

Для наиболее точного учета технологии горных работ, а также геомеханических процессов, реализующихся во вмещающем массиве, выполняются серии стадийных расчетов с применением шагово-итерационных процедур по следующему алгоритму:

1. Геометрическое моделирование участков ствола. Модели разрабатываются в масштабе 1:1 и имеют призматическую форму с размерами горизонтальных граней 65х65 м. Границы модели выбраны в соответствии с принципом Сен-Венана, исключая негативное влияние граничных усло-

вий на участки модели, где важна точность и достоверность результатов. Шаг дискретизации принят от 2,5 м на внешних контурах модели до 0,03 м для конечных элементов тубинговой крепи стволов.

2. Выбор типов конечных элементов. Колонна крепи ствола и окружающий породный массив моделирован с помощью пространственных изопараметрических конечные элементы призматической формы. Анкерная крепь моделировалась с помощью строжневых элементов.

3. Задание граничных условий, нагрузок и воздействий. Граничные условия модели представляются ограничения нормальных перемещений по боковым и нижней граням (смещения внутрь модели не ограничиваются). Для учета веса горных пород массива в расчетах задавалась объемная сила  $\gamma g$ . Учет влияния водоносных горизонтов в вышележающих слоях пород осуществлялся приложением к крепи стволов соответствующего гидростатического давления. При рассмотрении модели, построенных для глубоких участков не от земной поверхности, задаются соответствующие поля гравитационных и тектонических напряжений. На границах контакта разнородных пород выполняется условие жесткого сцепления.

4. Формирование стадий расчета. Первоначально выделяется начальная стадия расчета, представляющая собой модель участка околоствольного массива. Включаются все элементы околоствольного массива, граничные условия (заделка), собственный вес и поля напряжений, отключаются элементы ствола. Задается режим обнуления вертикальных деформаций модели после расчета начальной стадии, так как они реализованы задолго до этапа проходческих работ. На следующем этапе включаются элементы эксплуатационного ствола с существующей крепью. Далее моделируется поэтапный процесс реконструкции ствола. При рассмотрении системы «новая крепь – существующая крепь – дезинтегрированный породный массив» с применением тубинговой крепи на следующих шагах расчета моделируется возведение новой крепи и укладка закрепного бетона. Дополнительно учитываются анкерные опорные элементы. План математического моделирования и стадийного рас-

чета представлен в табл. 4.2.3.1. Последний шаг позволяет сформировать модель с закреплённым новой крепью участком ствола протяженностью 60,0 м. Для участков с бетонной крепью расчетный алгоритм в целом аналогичный за исключением этапа возведения тубингов [100,101].

Таблица 4.2.3.1 – План стадийного расчета реконструируемого шахтного ствола

Элемент модели	Начальная стадия	Ст. 1	Ст. 2	Ст. 3...	Ст. 7	Ст. 8	Ст. 9...	Ст. 39	Ст. 42	Ст. 41
Околоствольный массив	Вкл									
Пройденный ствол	Выкл	Вкл.								
Существующая крепь	Выкл	Вкл.								
Анкерные опоры	Выкл		Вкл. 1				Вкл. 2			
Заходка тубинговой крепи	Выкл			Вкл 1	Вкл 5	Вкл 6	Вкл 7...	Вкл 39	Вкл 40	
Закрепный бетон	Выкл				Вкл 4...	Вкл 5	Вкл 6...	Вкл 38	Вкл 39	Вкл 40
Граничные условия	Вкл									
Собственный вес	Вкл									
Поле напряжений	Вкл									

Примечание. В таблицы обозначены:

Вкл – включаемые группы конечных элементов,

Выкл – выключаемые на соответствующей стадии расчета группы конечных элементов.

Внешний вид конечно-элементных моделей ствола, разработанных в программном комплексе Midas FEA NX и примеры визуализации результатов расчета приведены на рис. 4.2.3.1.

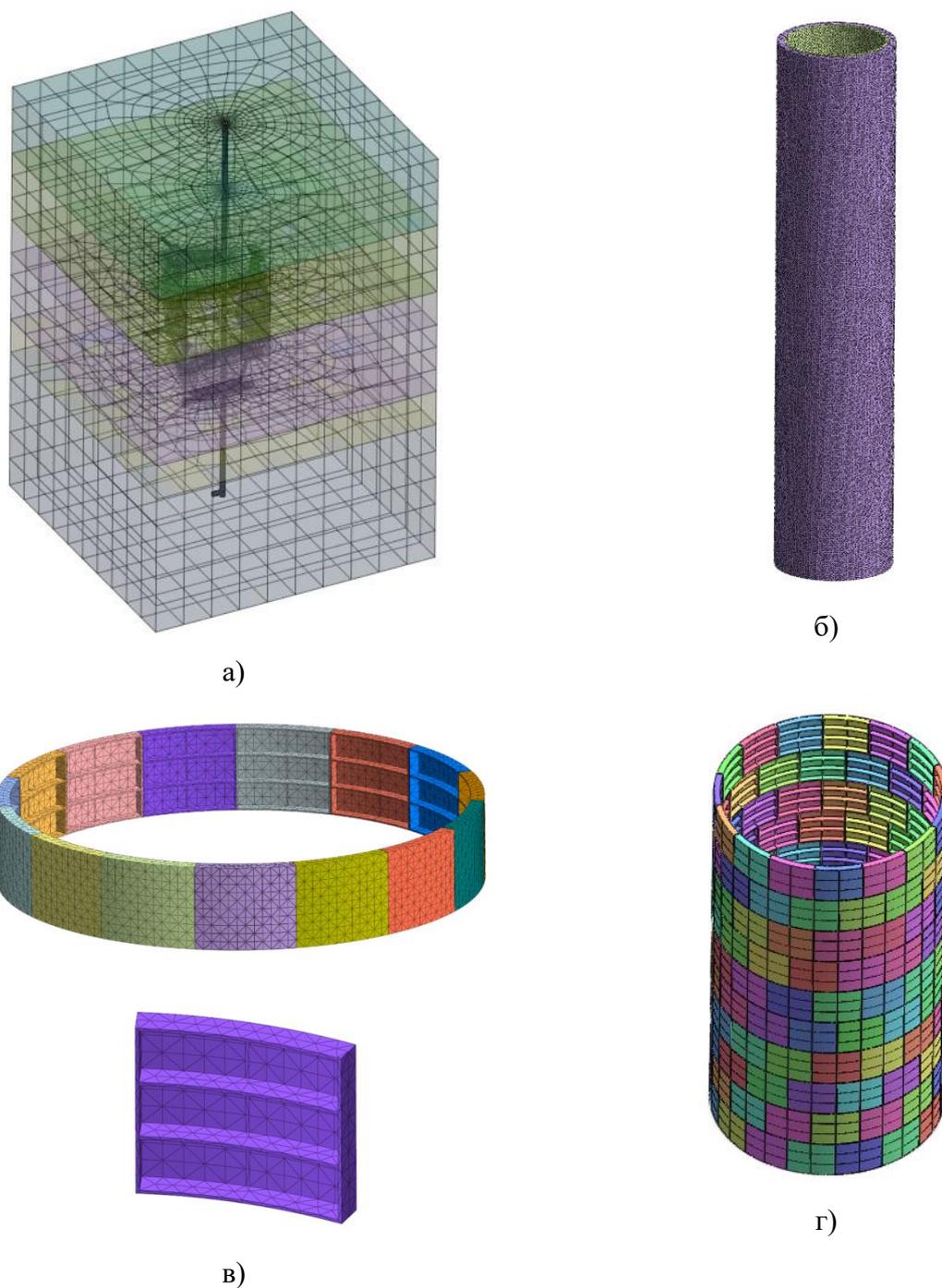


Рисунок 4.2.3.1 – Примеры структурных элементов численных моделей:

- а) фрагмент модели участка ствола с приствольными выработками; б) бетонная крепь в) тубинг и тубинового кольцо, г) тубинговая колонна

#### ***4.2.4 Верификация модели***

Верификация модели выполнена путем параллельных расчетов конечно-элементных моделей и расчетов аналитическим методом [53] с рассмот-

рением плоской задачи контактного взаимодействия породного массива с однослойной и двухслойной крепью вертикального ствола. Задача решалась в полных напряжениях в упругой постановке.

Фрагмент численной модели, разработанной в ПК MIDAS, и расчетная схема к аналитическому решению приведены на рис. 4.2.4.1.

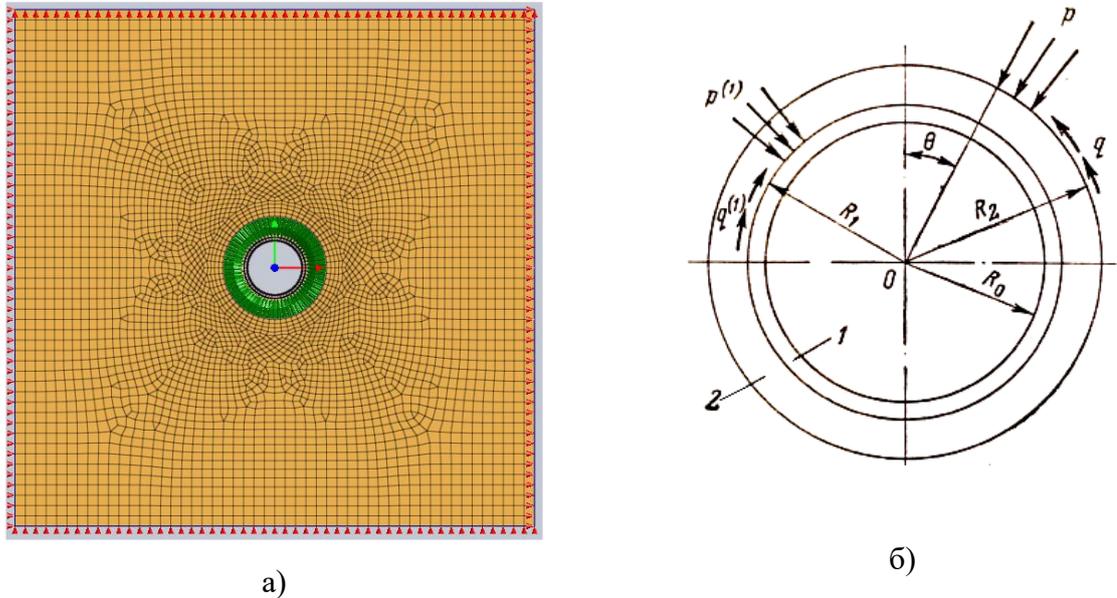


Рисунок 4.2.4.1 – Фрагмент численной модели (а) и аналитическая расчетная схема (б): 1 – первый слой крепи; 2 – второй слой крепи

Результаты параллельных расчетов представлены в таблице 4.2.4.1.

Таблица 4.2.4.1 – Результаты сравнительных расчетов крепи шахтного ствола

Описание задачи	Количество расчетов	Диапазон изменения параметров		Оцениваемые параметры	Погрешность, %
		Диаметр ствола, м	Модуль деформации пород, ГПа		
1. Шахтный ствол в однородном массиве горных пород. Толщина монолитной бетонной крепи 300 мм, класс бетона В25	9	6,0; 7,0; 8,0	1,0; 10,0; 50,0	1. Радиальные напряжения в крепи	2,85
				2. Нормальные тангенциальные напряжения в крепи	2,82
				3. Радиальное перемещение относительно вертикальной оси ствола	3,43

Описание задачи	Количество расчетов	Диапазон изменения параметров		Оцениваемые параметры	Погрешность, %
		Диаметр ствола, м	Модуль деформации пород, ГПа		
2. Тюбинго-бетонная крепь в однородном скальном массиве. 1 Слой. Тюбинги с толщиной спинки 60 мм, чугун СЧ-30. 2 Слой. Бетон. Толщина 300 мм, класс бетона В25	9	6,0; 7,0; 8,0	1,0; 10,0; 50,0	1. Радиальные напряжения в крепи	8,43
				2. Нормальные тангенциальные напряжения в крепи	9,7
				3. Радиальное перемещение относительно вертикальной оси ствола	9,92

Анализ парильных расчетов показал, что отклонения результатов расчетов по трем сравниваемым параметрам находятся не превышают 9,92 %. Это подтверждает корректность разработанных конечно-элементных моделей.

#### ***4.2.5 Параметры материалов крепи***

В качестве основного материала для закрепного бетона принимается бетон классов В25 - В40.

При определении расчетных характеристик бетона в соответствии с СП 63.13330.2018 [5] учитываются коэффициенты:

$\gamma_{b1} = 0,9$  – учитывающий влияние длительности действия нагрузки;

$\gamma_{b2} = 0,9$  – учитывающий характер разрушения бетонных конструкций;

$\gamma_{b3} = 0,85$  – учитывающий бетонирование в вертикальном положении при высоте слоя бетонирования свыше 1,5 м;

$\gamma_{b5} = 0,7$  – учитывающий влияние попеременного замораживания и оттаивания (для интервалов крепи, контактирующих с породами, имеющими отрицательную температуру).

При определении расчетного модуля деформации бетона учитывается коэффициент длительной ползучести в среде с высокой влажностью.

Расчетные характеристики бетона приведены в табл. 4.2.5.1.

Таблица 4.2.5.1 – Расчетные параметры бетона крепи

Класс бетона	Начальный модуль упругости бетона, МПа	Модуль деформации при продолжительном действии нагрузки, МПа	Нормативная прочность бетона $R_{bn}$ , МПа	Расчетная прочность бетона с учетом понижающих коэффициентов $R_b$ , МПа	Коэффициент поперечной деформации бетона
B25	30000	10714	18,5	9,8	0,2
B30	32500	11607	22,0	11,65	0,2
B35	34500	13800	25,5	13,5	0,2
B40	36000	15000	29,0	15,35	0,2

Тюбинговая крепь принимается из чугуна марки СЧ-20, СЧ-25, СЧ-30, СЧ-35.

Расчетные характеристики тюбингов приведены в табл. 4.2.5.2.

Таблица 4.2.5.2 – Расчетная прочность тюбингов

Марка чугуна	Толщина спинки тюбинга, мм									
	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120
СЧ-20	172,2	166,6	149,5	140,6	125,6	117,9	108,8	100,7	90,1	82,3
СЧ-25	193,2	190,6	174,0	162,1	150,1	142,9	133,8	126,2	115,1	107,3
СЧ-30	214,2	214,6	198,5	183,6	174,6	167,9	158,8	151,7	140,1	132,3
СЧ-35	235,3	238,6	223,0	205,1	199,1	192,9	183,8	177,2	165,1	157,3

Согласно требованиям СП 91.13330.2012 в расчетах учитывались коэффициенты по надежности  $\gamma_f = 1,17$  и ответственности  $\gamma_n = 1,2$ .

### 4.3 ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ СХЕМЫ РЕКОНСТРУКЦИИ ГЛУБОКИХ ВЕРТИКАЛЬНЫХ СТВОЛОВ

#### 4.3.1 Обоснование элементов строительных геотехнологий

Традиционные способы и технологические схемы ремонтно-восстановительных работ в стволах предусматривают перекрепление ствола участками в направлении снизу вверх с разделкой опорных венцов, а в случае аварийного состояния выработки – засыпку ствола или участка ствола с последующей перепроходкой.

Для повышения эффективности и безопасности работ по восстановлению работоспособности вертикальных стволов предложены альтернативные технологические схемы реконструкции, предусматривающие выполнение ра-

бот в направлении сверху вниз с сохранением целостности существующей крепи и возведением новой крепи, обеспечивающей работоспособность ствола на большой срок дальнейшей эксплуатации.

Областью применения предлагаемых технологических схем являются глубокие вертикальные стволы в аварийном и предаварийном техническом состоянии, основная протяжённость которых относится IV и V категориям устойчивости.

Обоснование элементов строительных геотехнологий предлагаемых схем базируется на рассмотрении всех аспектов взаимодействия формируемой в процессе реконструкции ствола системы «новая крепь – существующая крепь – дезинтегрированный породный массив» (рис. 4.3.1.1).

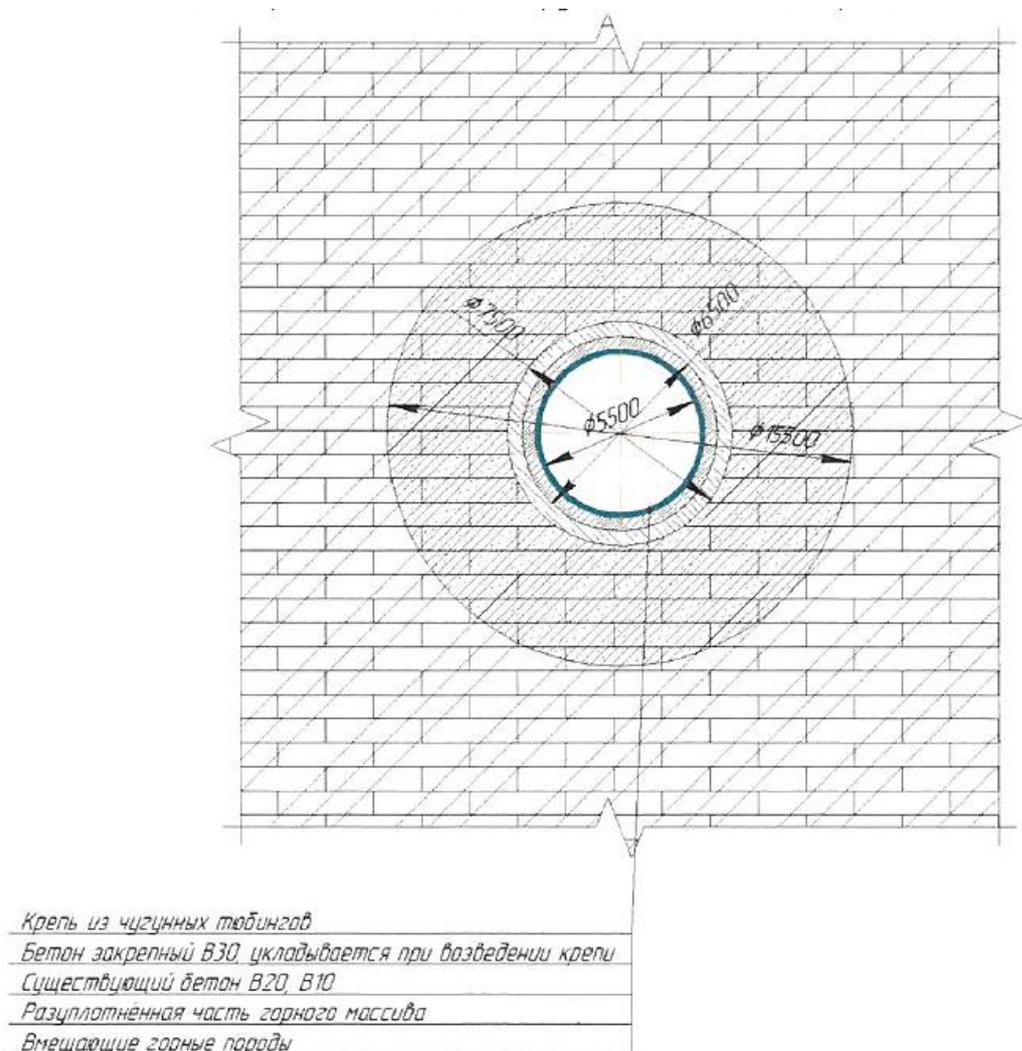


Рисунок 4.3.1.1 – Схема системы «новая крепь – существующая крепь – дезинтегрированный породный массив»

**Технологическая схема № 1** предусматривает возведение внутренней колонны тубинговой крепи с уменьшением диаметра ствола.

Основные элементы данной технологии были успешно апробированы при восстановлении ствола ВС-5 рудника «Таймырский», технологическая схема работ (рис. 4.3.1.2) подразумевает следующее:

1) На первом этапе осуществляется обследование ствола и оценка его технического состояния в соответствии с указаниями главы 2 диссертационной работы.

2) Выполняется переоснащение ствола для производства работ по реконструкции, в стволе производится поэтапная навеска трех полков.

3) С нижнего монтажного полка № 1 производятся работы по бурению скважин под установку анкеров типа «Атлант». Бурение скважин осуществляется буровым станком типа Figaro 400 Н. Буровой станок размещается на нижнем ярусе монтажного полка № 1. Затем производится установка анкеров «Атлант». Крепление анкера производится на цементном растворе, которым заполняют скважину. Цементный раствор, схватываясь, обеспечивает прочное соединение анкера с окружающим породным массивом.

4) С монтажной платформы производится монтаж армокаркасов опорных венцов, последующая сборка тубинговых колец и их бетонирование.

5) Монтажный полк № 2 обеспечивает работы по монтажу тубинговой крепи, приём и укладку бетонной смеси за тубинговую крепь, имеет трехэтажную компоновку.

6) Тампонажный полк № 3 (шагающий) предназначен для укладки закрепного бетона и вспомогательных работ. Тампонаж закрепного пространства осуществляется заходками на высоту двух тубинговых колец, направление работ в заходке – снизу-вверх.

7) По мере движения по стволу осуществляется демонтаж старых проходческих коммуникаций и монтаж новых.

8) На последнем этапе производится рассечка сопряжений, монтаж элементов армировки и коммуникаций в стволе.

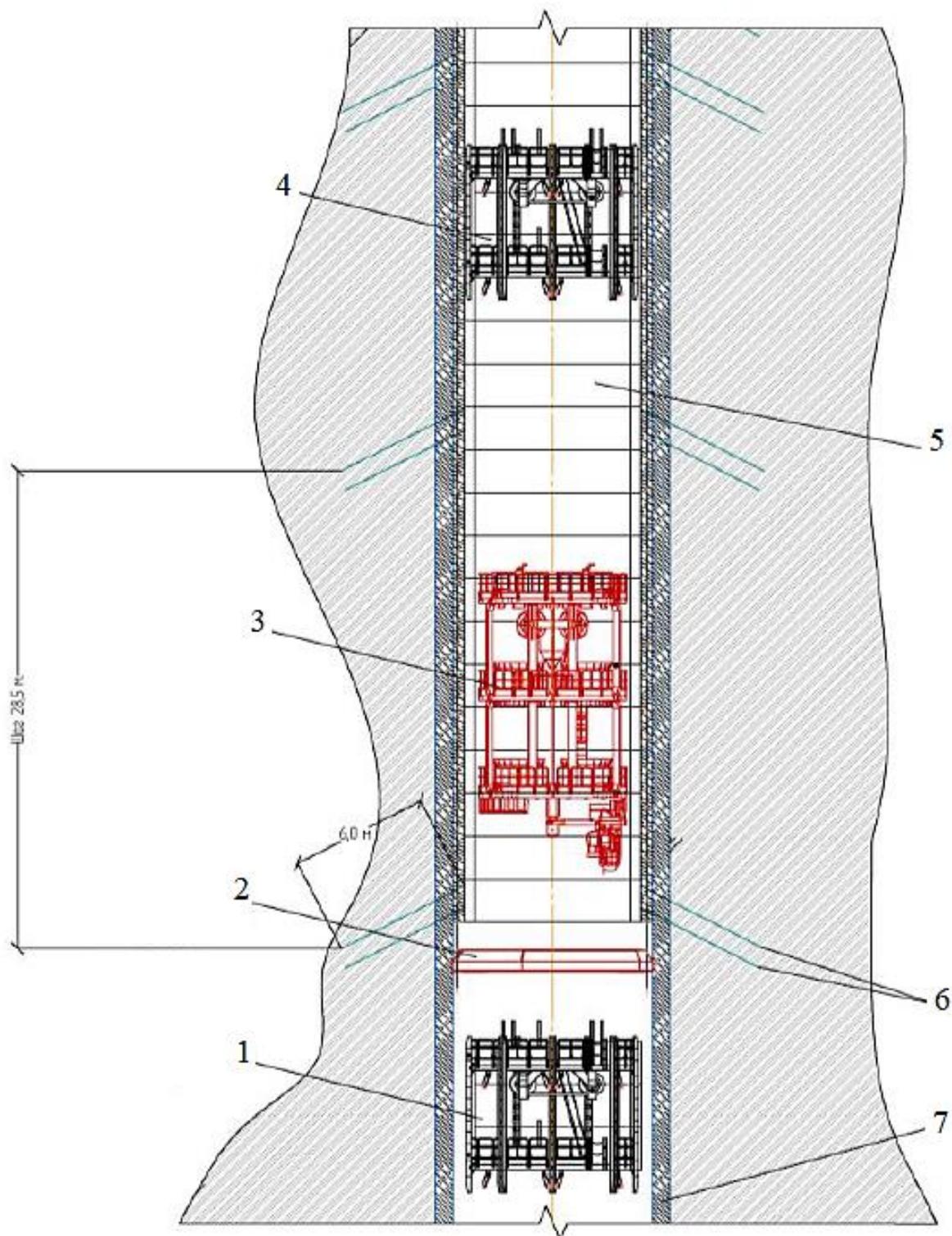


Рисунок 4.3.1.2 – Технологическая схема работ № 1:

- 1 – нижний монтажный полок; 2 – монтажная платформа; 3 – монтажный полок № 3;  
4 – тампонажный полок № 3; 5 – тубинговая крепь; 6 – анкера «Атлант»;  
7 – существующая бетонная крепь

**Технологическая схема № 2** может быть реализована с одного подвесного полка и предусматривает следующую последовательность работ в направлении сверху вниз.

С нижнего этажа полка производится установка буроинъекционных анкеров и нагнетание в массив упрочняющих смесей. Глубина необходимого упрочнения массива по данным геофизических исследований на большинстве участков ствола составляет 2,0 - 3,0 м. Далее производится частичная оборка старой крепи механическим способом на дефектных участках, выполняется ремонт мелких дефектов с применением современных ремонтных смесей для бетона, а также заполнение вывалов, пустот в крепи путем торкретирования. На наиболее нарушенных участках может устанавливаться металлическая сетка и возводится сплошной слой торкретбетона. В составе торкретбетона следует применять добавки, повышающие пластичность и сцепление материала с существующей бетонной поверхностью старой крепи. Особое внимание необходимо уделить качественной заделке стыков между заходками.

В результате выполнения работ в стволе будет сформирована комбинированная конструкция крепи, схема которой приведена на рис. 4.3.1.3. Дополнительный слой торкретбетона показан условно на части поверхности кольца крепи.

Реализация технологической схемы № 2 потребует помимо обследования и оценки технического состояния ствола по методике, изложенной в главе 2 диссертационной работы, выполнение опытно-промышленных испытаний элементов комбинированного крепления: подбора анкеров, тампонажных смесей, ремонтных материалов и составов торкретбетона для основных типов пород, пересекаемых глубоким вертикальным стволом.

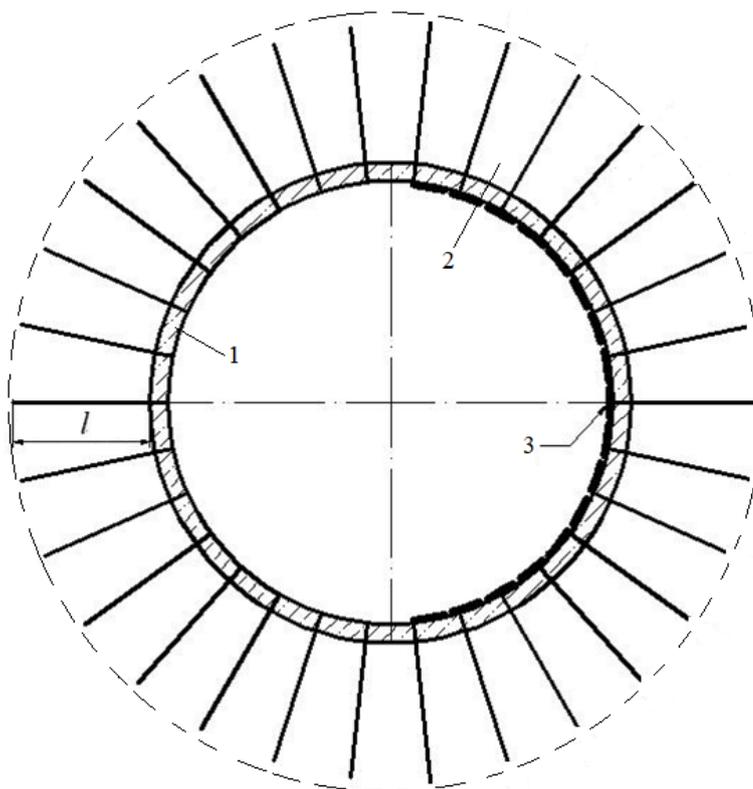
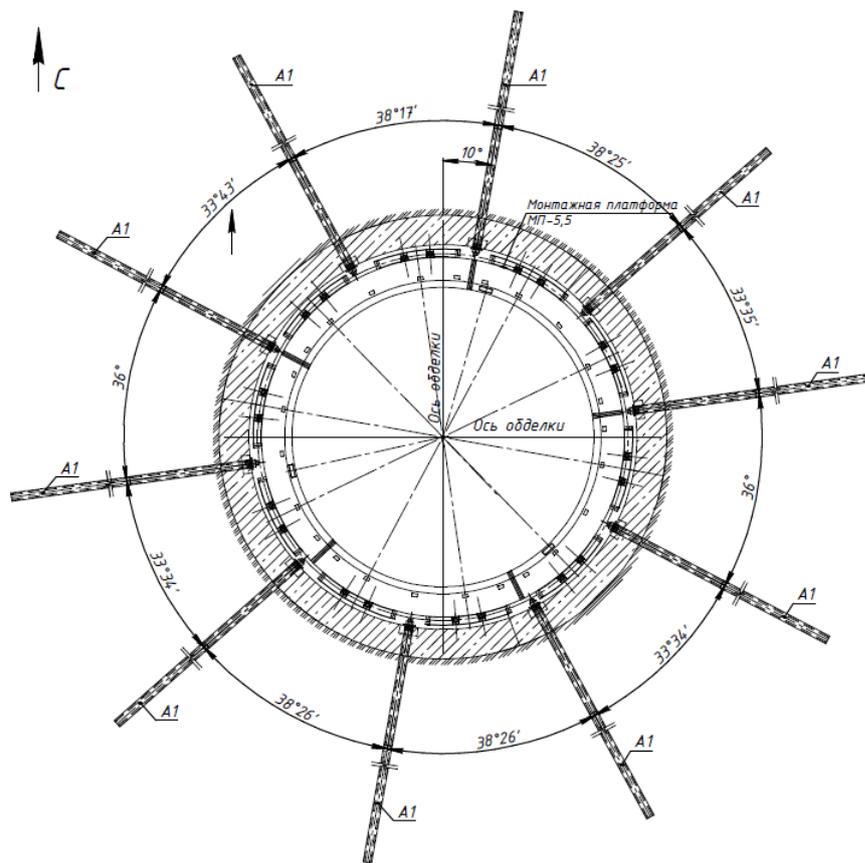


Рисунок 4.3.1.3 – Схема формирования системы «новая крепь – существующая крепь – упрочненный околоствольный массив» при реализации технологической схемы № 2:

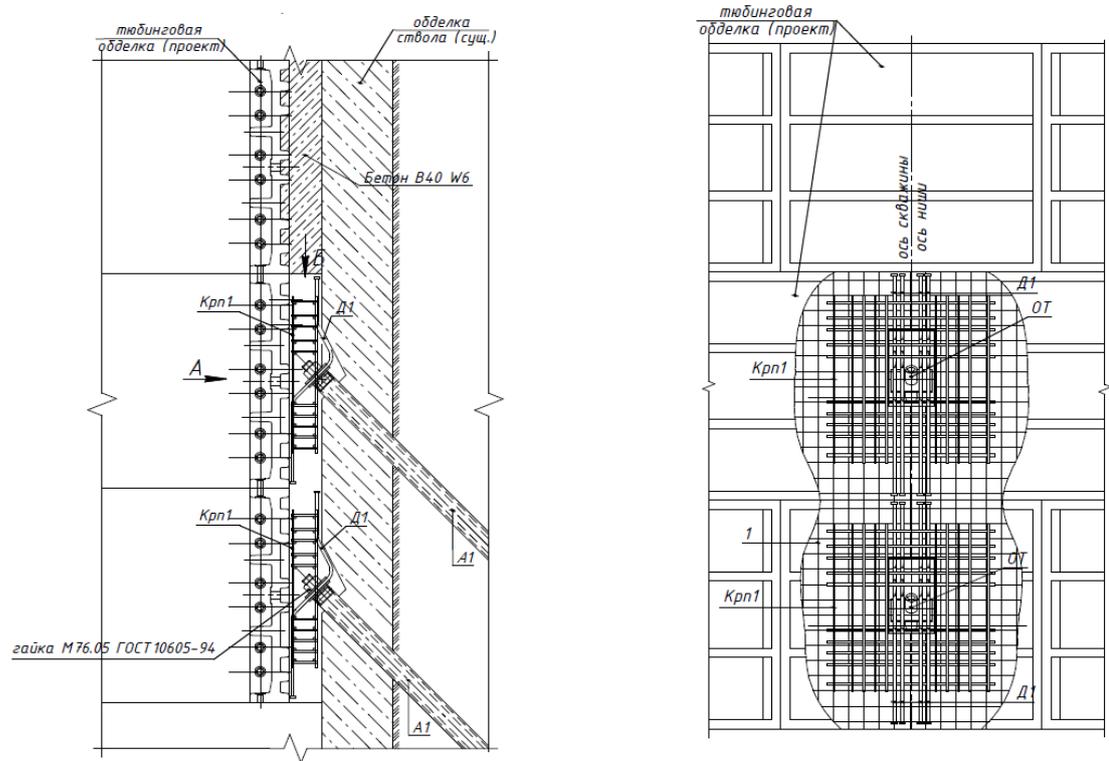
1 – старая бетонная крепь; 2 – упрочненный анкерами и нагнетанием дезинтегрированный породный массив вокруг ствола; 3 – слой торкретбетона

В глубоких вертикальных стволах технологическая схема № 2 может применяться на участках ствола с величиной интегрального критерия технического состояния ствола  $K \leq 20$  (см. ф-лу 2.2.1). на аварийных, в том числе искривленных участках ствола производится переход на технологическую схему № 1.

Для обеспечения устойчивости геотехнологической системы в процессе возведения тубинговой колонны разработаны анкерные опорные системы, исключая необходимость разделки классических опорных венцов и обеспечивающие упрочнение околоствольных пород (рис. 4.3.1.4).



а)

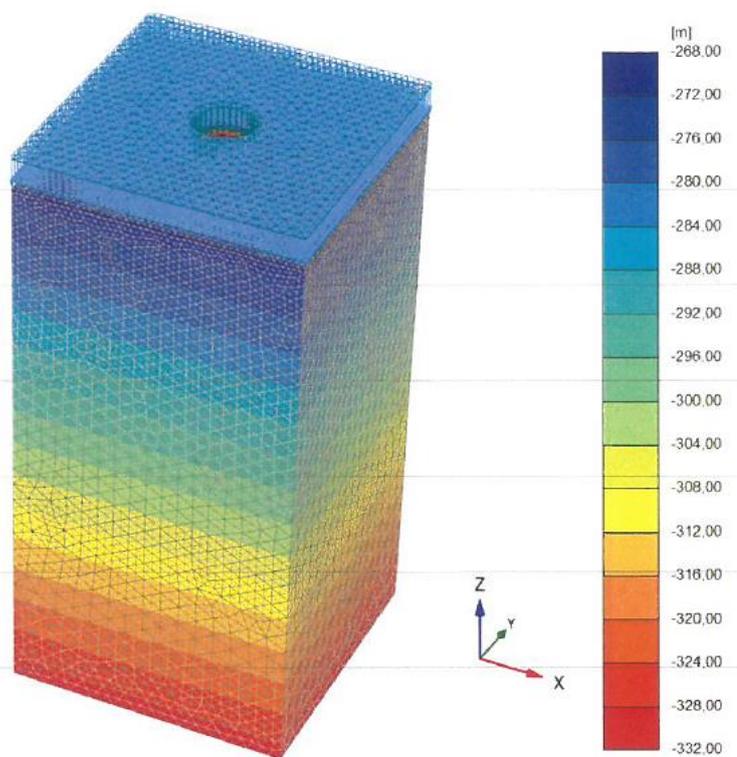


б)

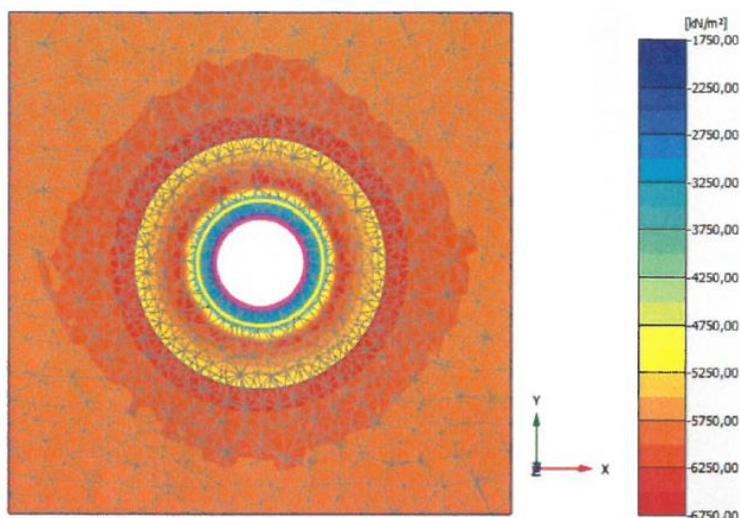
Рисунок 4.3.1.4 – Конструкция анкерного опорного пояса и тюбинговой КОЛОННЫ:

а) поперечное сечение; б) разрез и торцевой вид

Для обоснования параметров анкерных опорных систем разработаны конечно-элементные модели и выполнены расчеты в программе Plaxis 3D. Примеры модели и результатов расчета приведен на рис. 4.3.1.5.



а)



Principal total stress  $\sigma_2$   
Maximum value = -1819 kN/m<sup>2</sup>  
Minimum value = -6678 kN/m<sup>2</sup>

б)

Рисунок 4.3.1.5 – Конечно-элементная модель реконструируемого ствола:  
а) пример общего пространственного вида модели; б) Изопья нормальных тангенциальных напряжений в геотехнологической системе

Пример схемы установки анкеров опорной системы приведен на рис. 4.3.1.6, соответствующей расчетной схеме и результатов расчетов на рис. 4.3.1.7.

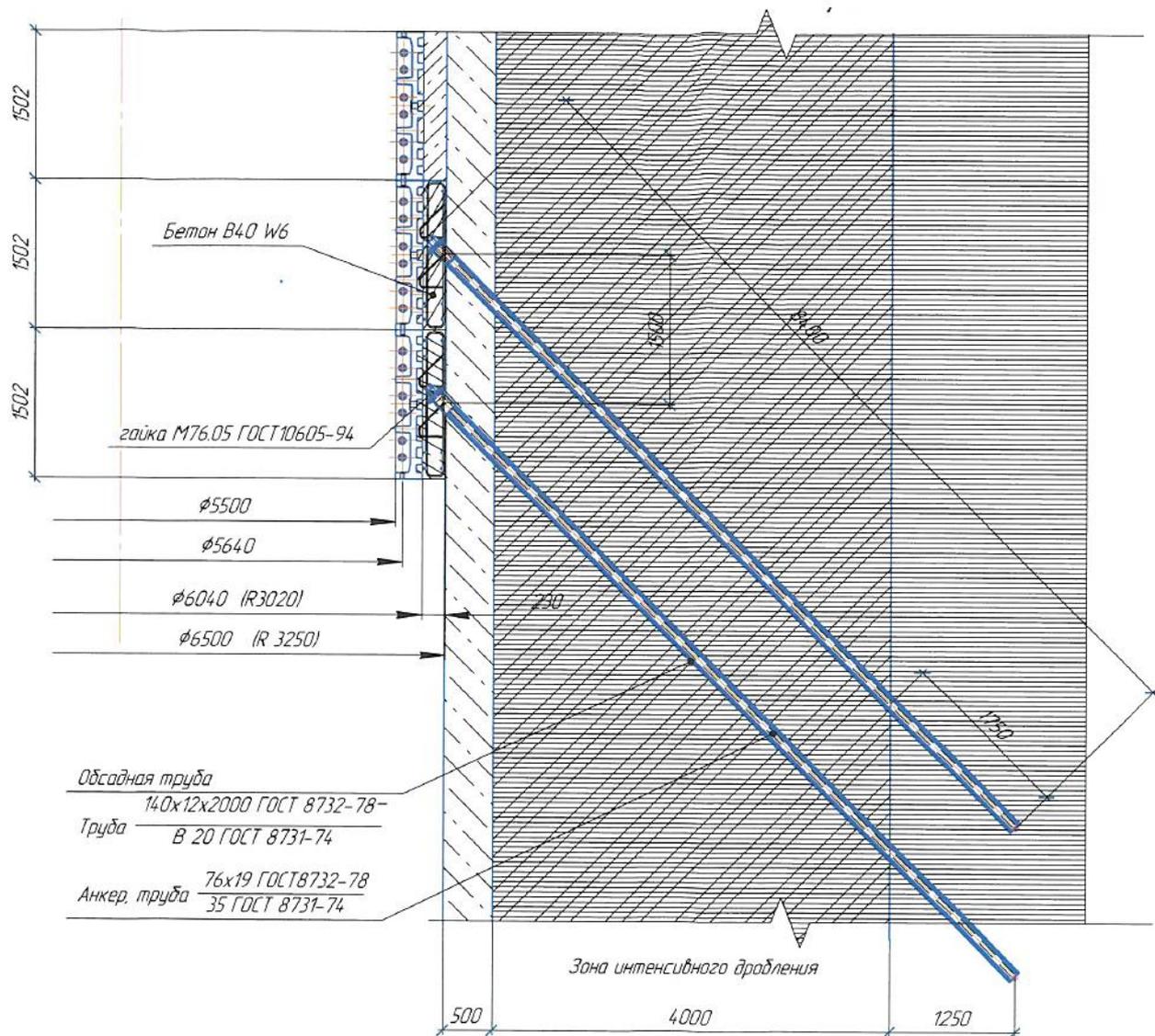


Рисунок 4.3.1.6 – Пример схемы установки опорных анкеров в дезентегрованном породном массиве

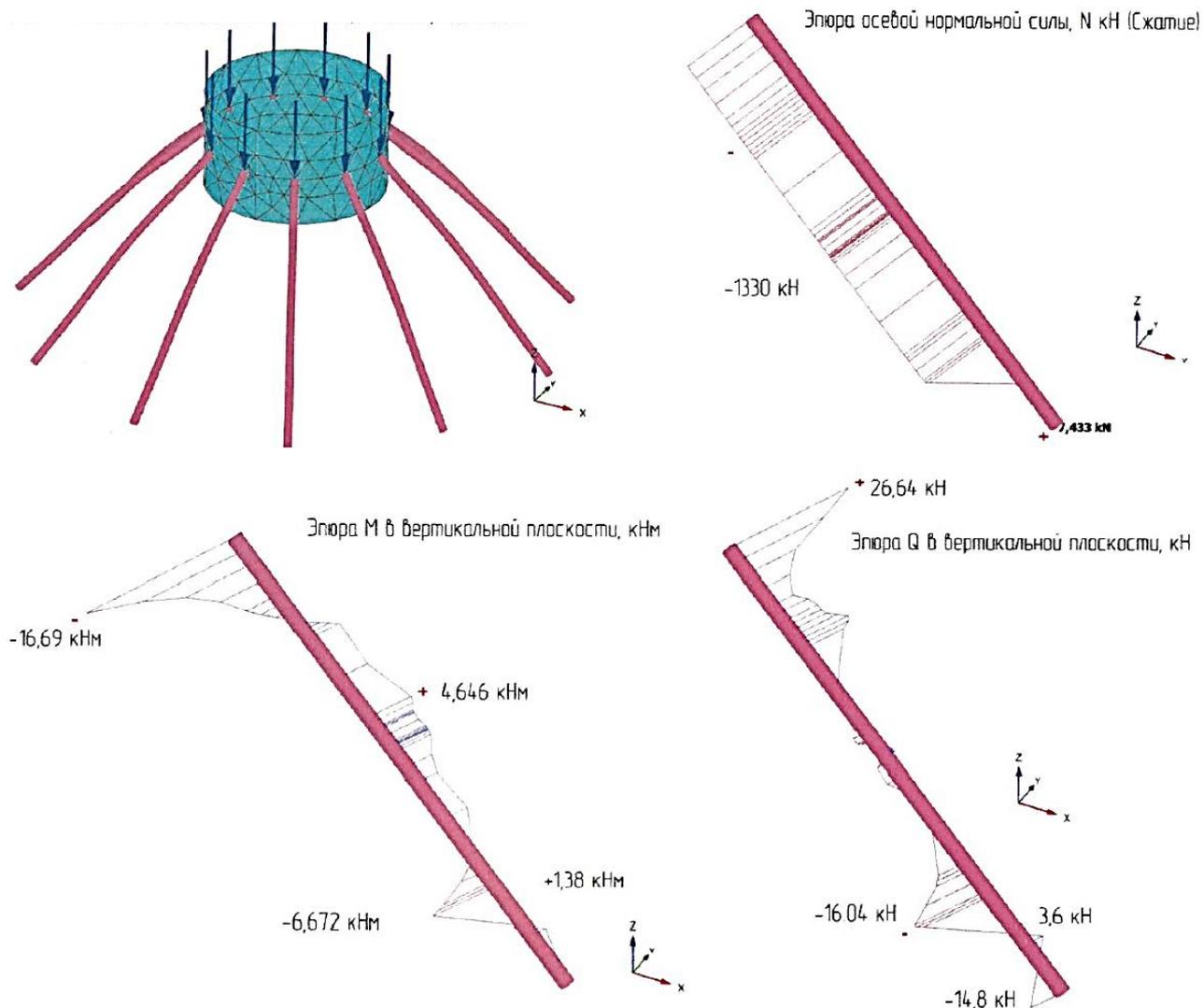


Рисунок 4.3.1.7 – Пример результатов расчета анкерной опорной системы

По результатам серий вычислительных экспериментов при варьировании диаметра, длины и плотности установки анкеров типа «Атлант» установлено, что для обеспечения требуемой несущей способности и устойчивости конструкции в породах III-IV категорий устойчивости, необходимо заглубление анкеров в устойчивую зону массива на глубину не менее  $1/3$  размера нарушенной зоны вокруг ствола. Оптимальный угол установки анкеров к вертикальной оси составляет 42 - 46%, так как при данных величинах обеспечивается снижение главных напряжений в контактных слоях системы «новая крепь – существующая крепь – дезинтегрированный породный массив» на 20 - 30%.

Сложную геотехнологическую задачу представляет собой возведение тубинговой колонны в искривленном стволе.

Для исследования негативного влияния отклонений ствола от проектных значений разработаны пространственные конечно-элементные модели в программном комплексе MIDAS FEA NX. Пример результатов расчета тубингового кольца приведен на рис. 4.3.1.8.

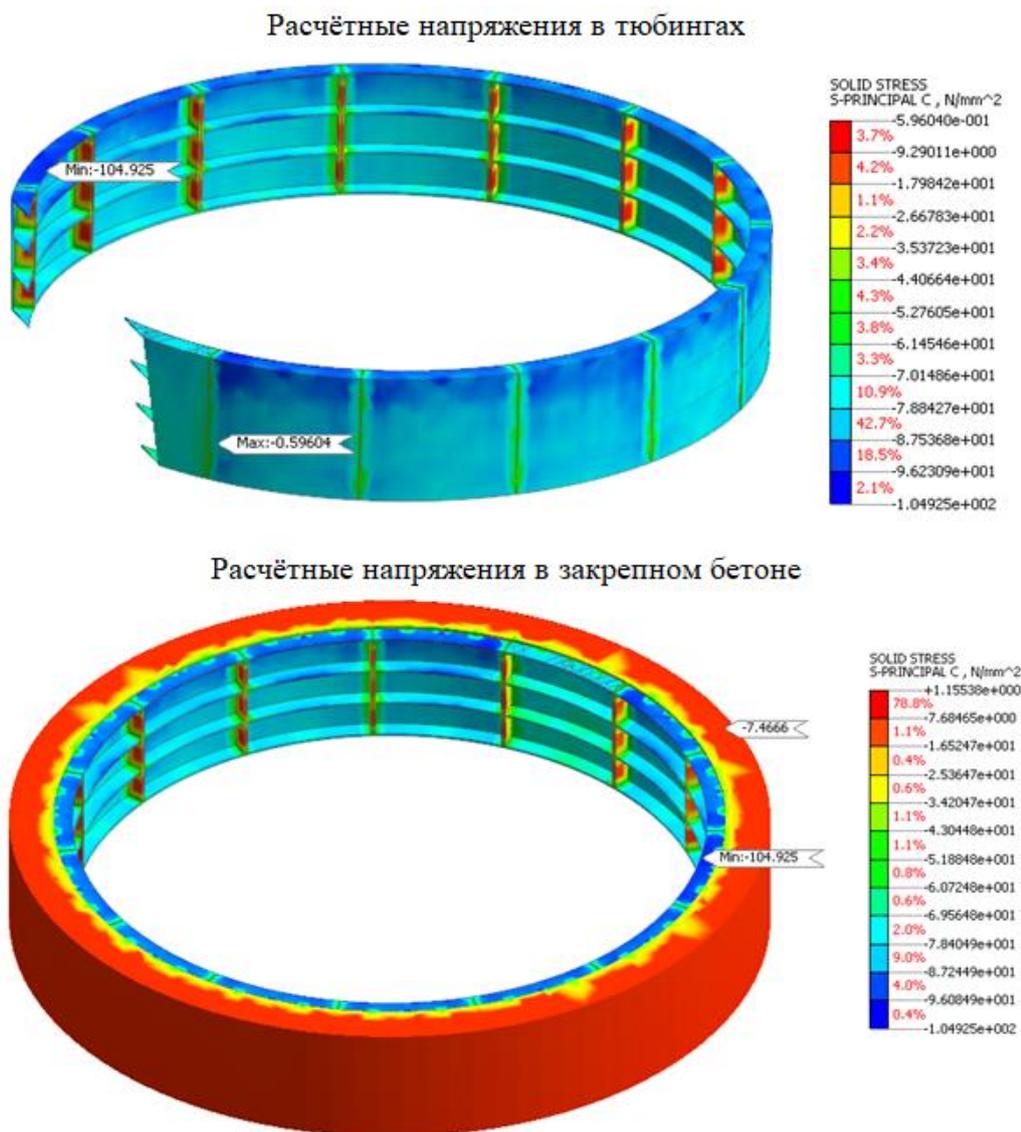


Рисунок 4.3.1.8 – Пример результатов расчета тубинговой крепи

Установлено, что при увеличении угла отклонения оси ствола от вертикали в тубинговой колонне возникают концентрации напряжений, в 1,3 - 1,4 раза превышающие средний уровень. Соответствующий график зависимости коэффициента увеличения напряжений от угла отклонения оси ствола приведен на рис. 4.3.1.9.

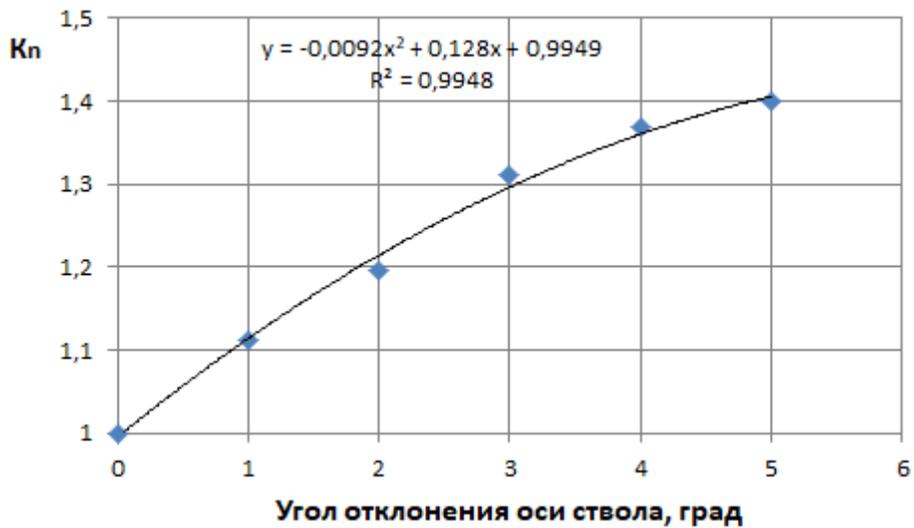


Рисунок 4.3.1.9 – График зависимости коэффициента концентраций напряжений от угла отклонения оси ствола

Для исключения выявленного негативного влияния искривления ствола разработаны специальные промежуточные компенсационные элементы с обоснованными в результате моделирования геометрическими параметрами рис. 4.3.1.10.

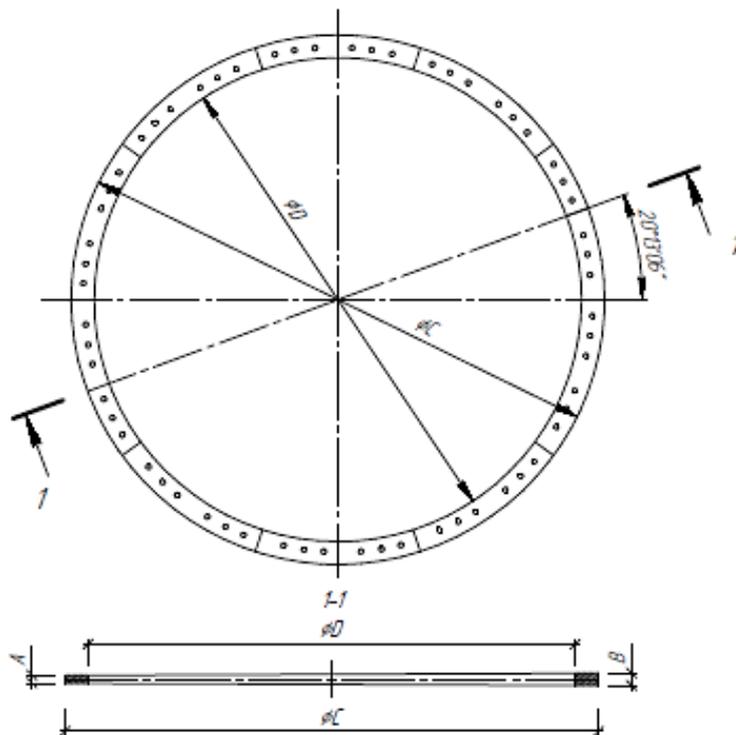


Рисунок 4.3.1.10 – Пример компенсационного элемента для тубинговой колонны в искривленных стволах

### *4.3.2 Оценка эффективности предложенных решений*

Разработанная методика оценки технического состояния вертикальных стволов успешно применена при обследовании двух глубоких вертикальных стволов в Норильском промышленном районе.

Разработанные технические и технологические решения по реконструкции вертикальных стволов и предложенная в диссертации технологическая схема работ использованы при разработке проектных решений и производстве работ по реконструкции ствола ВС-5 рудника «Таймырский» ПАО «ГМК «Норильский никель» глубиной 1355 м.

Основные положения диссертации использованы для выбора и обоснования параметров новой тубинговой крепи при разработке проекта реконструкции ствола, в том числе на искривленных участках. С учетом рекомендаций, приведённых в главах 2-4 диссертационной работы, разработана и реализована технологическая схема реконструкции ствола ВС-5 рудника «Таймырский», предусматривающая выполнение работ в направлении сверху вниз с сохранением целостности существующей крепи и возведением внутренней тубинговой колонны с ее опиранием на анкерных элементах с высокой несущей способностью.

Оценка технико-экономической эффективности предложенной технологической схемы по сравнению с традиционными решениями показала, что при ее применении обеспечивается сокращение сроков реконструкции ствола на 1,2 года и экономический эффект в размере 1 млрд. 140 млн. руб.

Акт внедрения результатов диссертационной работы представлен в Приложении А.

### 4.4 ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 4

1. Определены основные теоретические предпосылки, которые следует учитывать при анализе напряженно-деформированного состояния эксплуатационных стволов к которым, прежде всего, относится структурная и

прочностная неоднородность породного массива и уровень его напряженности. Обоснованы геомеханические модели массива пород и разработаны пространственные конечно-элементные модели, учитывающие особенности взаимодействия системы «новая крепь – существующая крепь – дезинтегрированный породный массив» и реализованные в программных комплексах Midas FEA NX и Plaxis 3D.

2. Разработаны технологические схемы реконструкции шахтных стволов, обеспечивающие снижение геотехнических рисков и повышение безопасности работ в сложных горно-геологических условиях, предусматривающие устройство на аварийных участках внутренней колонны крепи с ее опиранием на анкерных элементах с высокой несущей способностью.

3. Установлены закономерности взаимодействия системы «новая крепь – существующая крепь – дезинтегрированный породный массив», формируемой в процессе реконструкции ствола, в том числе на искривлённых участках стволов, с учетом которых определены параметры анкерных опорных систем и компенсационных элементов для тубинговой крепи.

4. Выявлены негативные факторы, приводящие к возникновению концентраций напряжений в тубинговой крепи, искривленных в процессе эксплуатации стволов, и обоснованы технологические решения по их минимизации.

5. Выполнена оценка технико-экономической эффективности предложенной технологической схемы реконструкции стволов по сравнению с традиционными решениями, которая показала, что при ее применении обеспечивается сокращение сроков реконструкции ствола на 1,2 года и экономический эффект в размере 1 млрд. 140 млн. руб.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертация представляет собой научно-квалификационную работу, в которой на основании теоретических и экспериментальных исследований решена актуальная задача по совершенствованию оценки технического состояния глубоких шахтных стволов и разработке новых технологических схем их реконструкции, позволяющих повысить технико-экономические показатели и безопасность горнопроходческих работ, что имеет важное значение для строительной геотехнологии.

Основные результаты диссертационной работы заключаются в следующем:

1. Выполнен теоретических основ и практических исследований в области оценки технического состояния шахтных стволов и разработки решений по их ремонту и реконструкции. Сформулированы цель и задачи диссертационного исследования.

2. Разработана новая методика оценки технического состояния эксплуатационных стволов, учитывающая плотность поверхностных и внутренних повреждений в бетоне крепи, качества контакта «крепь – массив», размеры зон дезинтеграции околоствольных пород, интенсивность водопритокков и величины отклонений оси и сечения ствола от проектного положения.

3. Разработан алгоритм по определению значения критерия технического состояния глубокого вертикального ствола  $K$ . Его величина определяется с учетом суммарного количества ранжированных дефектов, характеризующих плотность и критичность поверхностных и внутренних повреждений крепи, качество контакта «крепь – массив», фактическую прочность и толщину крепи, интенсивность водопроявлений, а также величину отклонений оси и сечения ствола от проектного положения.

4. В составе разработанной методики разработан порядок оценки устойчивости околоствольных пород по пяти категориям с учетом показателей относительной прочности, качества керна, контакта «крепь – массив»,

обводненности и срока службы ствола, что обеспечивает ранжированный выбор необходимых управляющих воздействий.

5. Усовершенствована программа обследования глубоких вертикальных стволов с большим сроком эксплуатации, предусматривающая применение визуальных методов обследования крепи, комплекс инструментальных методов, отбор кернов и определение прочности бетонной крепи, геофизическое и геомеханическое изучение околоствольного массива, расчеты и статистическую обработку данных с последующим определением категории технического состояния.

6. Представлены примеры апробации методики оценки технического состояния глубоких вертикальных стволов Норильского промышленного района, включающие результаты визуального обследования с построением карты дефектов, трехуровневого инструментального обследования, включая изучения нарушенности околоствольного массива пород, расчеты остаточной несущей способности крепи и определение категории технического состояния выработок.

7. Разработаны технологические схемы реконструкции шахтных стволов, обеспечивающие снижение геотехнических рисков и повышение безопасности работ в сложных горно-геологических условиях, предусматривающие устройство на аварийных участках внутренней колонны крепи с ее опиранием на анкерных элементах с высокой несущей способностью.

8. Установлены закономерности взаимодействия системы «новая крепь – существующая крепь – дезинтегрированный породный массив», формируемой в процессе реконструкции ствола, в том числе на искривлённых участках стволов, с учетом которых определены параметры анкерных опорных систем и компенсационных элементов для тубинговой крепи.

9. Выявлены негативные факторы, приводящие к возникновению концентраций напряжений в тубинговой крепи, искривленных в процессе эксплуатации стволов, и обоснованы технологические решения по их минимизации.

10. Выполнена оценка технико-экономической эффективности предложенной технологической схемы реконструкции стволов по сравнению с традиционными решениями, которая показала, что при ее применении обеспечивается сокращение сроков реконструкции ствола на 1,2 года и экономический эффект в размере 1 млрд. 140 млн. руб.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Пестрикова В.С., Тарасов В.В., Загвоздкин И.В. Жизненные циклы системы комплекса шахтных стволов на Верхнекамском месторождении // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. 2021. № 3. С. 213-221.
2. Плешко М.С., Давыдов А.А., Сильченко Ю.А., Каледин О.С. Эффективные решения по креплению сверхглубокого ствола СКС-1 рудника "Скалистый" в сложных геомеханических условиях // Горный журнал. 2020. № 6. С. 57-62.
3. Манец И. Г., Грядущий Б. А., Левит В. В. Техническое обслуживание и ремонт шахтных стволов: Научно-производственное издание/ Под общ. ред. Сторчака С. А. – Донецк: «Юго-Восток, Лтд», 2008. 586 с.
4. Прокопов А.Ю., Саакян Р.О., Павлинов П.А. Классификация схем и способов реконструкции вертикальных стволов // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2006. № 3. С. 90-94.
5. Ягодкин Ф.И., Прокопов А.Ю., Прокопова М.В. Ремонт крепи вертикальных шахтных стволов // Известия ТулГУ. Науки о Земле. 2017. Вып. 3. С. 195-208.
6. Прокопов А.Ю., Прокопова М.В. Оценка необходимости реконструкции вертикальных стволов по фактору критических отклонений проводников от вертикали // Инженерный вестник Дона. 2013. № 4 (27). С. 224.
7. Бокий Б.В., Шейко А.В., Алабьев В.Р. Совершенствование реконструкции стволов центрального района Донбасса // Вестник Забайкальского государственного университета. 2015. № 1 (116). С. 4-13.
8. Пшеничный Ю.А., Иванов А.Ю. Проявления горного давления в процессе крепления стен вертикальных стволов монолитным бетоном и меры по предотвращению их негативного воздействия // Проблемы горного давления. 2021. № 1-2 (40-41). С. 41-48.
9. Южанин И.А., Колдунов И.А., Терлецкий А.М. Инструментальные исследования проявления горного давления в шахтных стволах // Наукові

праці Донецького національного технічного університету. Серія: Гірничо-геологічна. 2014. № 1 (20). С. 49-56.

10. Иудин М.М. Трещинообразование в бетонной крепи вертикальных стволов рудников севера // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2007. № S6. С. 301-308.

11. РД 03-422-01 «Методические указания по проведению экспертных обследований шахтных подъемных установок». Дата введения 2002-01-01. Утвержден постановлением Госгортехнадзора России от 26.06.01 № 23.

12. Тарасов В.В., Афанасьев И.А., Пестрикова В.С. Методические положения оценки технического состояния вертикальных шахтных стволов после длительной консервации // Известия ТулГУ. Науки о Земле. 2015. Вып. 3. С. 77-86.

13. Шмелев Г. Д., Кононова М.С., Малева Н.А. Методика оценки технического состояния, прогнозирования и обоснования остаточного срока службы строительных конструкций // Жилищное хозяйство и коммунальная инфраструктура. № 2(9). 2019. С. 34-42.

14. Urbaev D.A., Ivanov D.G. Determination of causes of lining instability in vertical shafts and justification of additional measures in terms of reliability. Scientific journal. Modern problems of science and education. Issue №6 in 2012. Pages 126-126.

15. Qing Yu. Vertical Shaft Support Improvement Studies by Strata Grouting at Aquifer Zone. June 2018. Advances in Civil Engineering 2018(7): 1-10. DOI:10.1155/2018/5365987.

16. M Jendryś. Analysis of stress state in mine shaft lining, taking into account superficial defects. IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 261 (2019) 012016. doi:10.1088/1755-1315/261/1/012016.

17. Балек А.Е. Особенности формирования напряжений в крепи вертикальных выработок в условиях запредельного напряженно-деформированного состояния скальных породных массивов // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2014. № 11. С. 202-212.

18. Yuezheng Zhang, Hongguang Ji, Hanhua Xu. Study on the Law of Rock Anelastic Recovery and the Characteristics of In Situ Stress Field of 2000 m Deep Stratum in Metal Mines of Coastal Area. Hindawi Advances in Materials Science and Engineering Volume 2022, Article ID 2152814, 11 pages <https://doi.org/10.1155/2022/2152814>.

19. Xiaoming Sun, Gan Li, Chengwei Zhao, Yangyang Liu, Chengyu Miao. Investigation of Deep Mine Shaft Stability in Alternating Hard and Soft Rock Strata Using Three-Dimensional Numerical Modeling. Processes 2019, 7(1), 2; <https://doi.org/10.3390/pr7010002>.

20. Киброев И.С., Манжосов А.С., Алексеев А.А., Ханина И.А. Методы неразрушающего контроля при оценке состояния бетонной крепи и закрепного пространства в шахтных стволах рудников Талнаха // Горный журнал. 2022. №10. С. 77-82.

21. Бабкин А.И., Санфиоров И.А. Геофизический мониторинг затюбингового пространства // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2011. № 11. С. 202-212.

22. ГОСТ 31937-2011 «Здания и сооружения. Правила обследования и мониторинга технического состояния».

23. ГОСТ Р 57208-2016 Тоннели и метрополитены. Правила обследования и устранения дефектов и повреждений при эксплуатации.

24. СП 13-102-2003 Правила обследования несущих строительных конструкций зданий и сооружений.

25. ОДМ 218.4.001-2009 "Методика оценки транспортно-эксплуатационного состояния горных автодорожных тоннельных переходов".

26. РД 22-01.97 Требования к проведению оценки безопасности эксплуатации производственных зданий и сооружений поднадзорных промышленных производств и объектов (обследование строительных конструкций специализированными организация-ми).

27. РД 06-565-03 Методические указания о порядке продления срока службы технических устройств, зданий, сооружений с истекшим норматив-

ным сроком эксплуатации в горнорудной промышленности. Утверждены постановлением Госгортехнадзора России от 05.06.2006 №66.

28. РД 03-606-03 Инструкция по визуальному и измерительному контролю. Утверждена постановлением Госгортехнадзором России от 11.06.2003 № 92.

29. Методика оценки остаточного ресурса несущих конструкций зданий и сооружений. М.: Федеральный центр нормирования, стандартизации и оценки соответствия в строительстве, 2018. 50 с.

30. Руководство по безопасности «Методические рекомендации по проведению анализа опасностей и оценки риска аварий на угольных шахтах». Утверждены приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору № 276 от 25 июля 2023 г.

31. Плешко М.С., Сильченко Ю.А., Панкратенко А.Н., Насонов А.А. Совершенствование расчетно-экспериментальных методов проектирования шахтных стволов // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2019. С. 55-66.

32. Бушков В.К., Шеметов Р.С. Определение устойчивости и обоснование систем крепления горных выработок при переходе к отработке Олимпиадинского месторождения подземным способом // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2020. № 9. С. 40 - 54.

33. Barton N. Rock quality, seismic velocity, attenuation and anisotropy. Taylor & Francis Group, London, UK, 2007. 756 p.

34. Bieniawski Z.T. Engineering rock mass classifications. New York: Wiley, 1989, 251 p.

35. Meshram V.M., Dahale P.P., Tiwari M.S., Ramteke S.B. Advancement of support system for underground drift excavation – a review // International Journal of Civil Engineering and Technology. 2018. Vol. 9. No 6. Pp. 332 - 339.

36. Руководство по креплению горных выработок подземного рудника «Юбилейного» месторождения. Екатеринбург: АО «Уралмеханобр», 2019 г.

37. СП 91.13330.2012 Подземные горные выработки. Актуализирован-

ная редакция СНиП II-94-80 (с Изменением N 1).

38. Руководство по проектированию подземных горных выработок и расчету крепи / ВНИМИ, ВНИИОМШС Минуглепрома СССР. М.: Стройиздат. 1983. 272 с.

39. Войнов И.В. Геомеханическая оценка и прогноз технического состояния транспортных тоннелей с большим сроком эксплуатации: дис. ... канд. техн. наук: 25.00.20 / Войнов Иван Вячеславович. Тула, 2021. 155 с.

40. Миронова И.С. Баширов М.Х., Касимова Э.Ф. Интегральные параметры для оценки технического состояния двигателей электропривода машинных агрегатов нефтегазовых производств // Современные проблемы науки и образования: электронный научный журнал. 2011. № 3. - URL: <https://science-education.ru/ru/article/view?id=4667>.

41. Улицкий В.М., Лисюк М.Б. Оценка риска и обеспечение безопасности в транспортном строительстве // Техносферная и экологическая безопасность на транспорте (ТЭБТРАНС-2012). Материалы III Международной научно-практической конференции. 2012. С. 245-254.

42. Pleshko, M.S., Pankratenko, A.N., Pleshko, M.V., Nasonov, A.A. Assessment of stress–strain behavior of shaft lining in bottomhole area during sinking by real-time monitoring and computer modeling data. Eurasian Mining this link is disabled, 2021, 35(1), pp. 25 - 30.

43. Pleshko, M., Meskhi, B., Pleshko, M. A new method for calculating the combined anchor-concrete support of underground structures. MATEC Web of Conferences 170, 03023 (2018). <https://doi.org/10.1051/matecconf/201817003023>.

44. Zhishu Yao, Chen Wang, Weipei Xue, Ping Zhang, Yu Fang. Experimental study on the dynamic mechanical properties of high-performance hybrid fiber-reinforced concrete of mine shaft lining. Journal of Materials Research and Technology. Volume 14, September–October 2021, Pages 888-900.

45. Niedbalski, Z., Małkowski, P. Difficulties in maintaining shaft lining – testing methods and repair methods – a case study. E3S Web of Conferences 201, 01016 (2020).

46. Галкин В.И., Махоткин А.М. Оценка эффективности систем разгрузки головных канатов при реконструкции шахтных подъемных установок // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2012. № 6. С. 228-233.

47. Агафонов А.А., Васильева М.А., Талеров К.П. Актуальные направления модернизации шахтных подъемных установок горных предприятий // Транспортное, горное и строительное машиностроение: наука и производство. 2023. № 19. С. 144-154.

48. Прокопова М.В., Ткачева К.Э. Моделирование работы бетонной крепи реконструируемых вертикальных стволов // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2012. № 4. С. 213-216.

49. Тарасов В.В., Иванов О.В. Реконструкция бетонной крепи шахтного ствола № 3 рудника БКПРУ-2 ПАО «Уралкалий» в условиях непрерывно действующего производства // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2016. № 9. С. 303-315.

50. Pleshko, M.S., Sil'chenko, Yu.A., Pankratenko, A.N., Nasonov, A.A. Improvement of the analysis and calculation methods of mine shaft design. Mining Informational and Analytical Bulletin. 2019 (12). Pp. 55 - 66.

51. Баклашов, И.В. Геомеханика. Т.1. Основы геомеханики: учеб. для вузов. М.: Изд-во Московского государственного горного университета, 2004. 208 с.

52. Баклашов И.В. Геомеханика. Т.2. Геомеханические процессы: учебник для вузов: В 2 т. / И.В. Баклашов [и др.]. М.: Издательство Московского государственного горного университета, 2004. 249 с.

53. Булычев Н.С. Механика подземных сооружений в примерах и задачах. М.: Недра, 1989. 272 с.

54. Геомеханика: учеб. пособие / Э.В. Каспарьян, А.А. Козырев, М.А. Иофис, А.Б. Макаров. М.: Высш. шк., 2006. 503 с.

55. Борщ Компониец В.И. Практическая механика горных пород. М.: Горная книга, 2013. 322 с.

56. Казикаев Д.М., Сергеев С.В. Диагностика и мониторинг напряженного состояния крепи вертикальных стволов. М.: Издательство «Горная книга», 2011. 244 с.
57. Булычев Н.С., Фотиева Н.Н., Стрельцов Е.В. Проектирование и расчет крепи капитальных выработок. М.: Недра, 1986. 288 с.
58. Марков Г.А., Савченко С.Н. Напряженное состояние пород и горное давление в структурах гористого рельефа. Л.: Наука, 1984. 140 с.
59. Макаров А.Б. Практическая геомеханика: пособие для горных инженеров. М.: Горная книга, 2006. 391 с.
60. Литвинский Г.Г. Аналитическая теория прочности горных пород и массивов. Донецк: Норд-Пресс, 2008. 207 с.
61. Заславский Ю.З., Мостков В.М. Крепление подземных сооружений. – М.: Недра, 1979. 325 с.
62. Козел А.М., Борисовец В.А., Репко А.А. Горное давление и способы поддержания вертикальных стволов. М.: Недра, 1976. 293 с.
63. Кравченко Г.И. Облегченные крепи вертикальных выработок. – М.: Недра, 1974. 208 с.
64. Баклашов И.В., Картозия Б.А. Механика подземных сооружений и конструкций крепей. Учебник для вузов. М., Недра. 1992. 543 с.
65. Руппенейт К.В. Некоторые вопросы механики горных пород. – М.: Углетехиздат, 1956. 384 с.
66. Шашенко О.Н., Пустовойтенко В.П. Механика горных пород: Підручник для ВУЗів. К.: Новий друк, 2004. 400 с.
67. Амусин Б.З., Череменин В.Г. Статистический подход к определению момента появления разрушения в стенках незакрепленных выработок / Сб. тр. ВНИМИ, 1976. № 99. С. 85 - 89.
68. Влох Н.П., Зубков А.В., Боликов В.Е. Формирование напряжений в крепи вертикальных стволов. // Шахтное и подземное строительство. 1986. №1. С. 21 - 22.
69. Левит В.В. Влияние свойств пород и типа крепи на взаимодействие

системы «крепь – массив» в вертикальных стволах // Геотехническая механика, 1997. № 3. С. 32 - 39.

70. Озорнин Т.Ф., Харисов Т.Ф. Формирование напряжений в крепи при строительстве вертикальных стволов в тектонически напряженном горном массиве // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. 2013. № 6. С. 60 - 67.

71. Харисов Т.Ф., Антонов В.А. Исследование деформаций горных пород в процессе проходки вертикального ствола // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2015. № 3. С. 146 - 150.

72. Фадеев А.Б. Метод конечных элементов в геомеханике. М.: Недра, 1987. 221 с.

73. Норри Д., де Фриз Ж. Введение в метод конечных элементов. М.: Мир, 1981. 304 с.

74. Пособие по расчетам. Midas GTS NX. 2021. Электронный ресурс. Код доступа: <https://workdrive.zohoexternal.com/external/c233dcad3fe28fa87593a9bc0bea0dc56126f7fdb4817ad7ee9bc8b273ae0bf?layout=list>.

75. PLAXIS 2D CE V22.01. Учебное пособие. ООО «НИП- Информатика», 2022. 240 с.

76. Выбор математической модели грунта для геотехнических расчетов в PLAXIS: специальный курс. С-Пб.: ООО «НИП-Информатика», 2010. 56 с.

77. Маковский Л.В., Динь Т.В. Математическая модель системы «грунтовый массив – два параллельных тоннеля» с использованием про-граммного комплекса «Plaxis 3D TUNNEL» // Вестник Московского авто-мобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ). 2017. № 2 (49). С. 70-76.

78. Кузьмин Е.В., Узбекова А.Р. Рейтинговые классификации массивов горных пород и их практическое применение // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2005. № 5. С. 181 - 185.

79. Положение (инструкция) по выбору типа и параметров крепи капитальных, подготовительных, нарезных и очистных выработок в предельно

напряжен-ном (или ослабленном) блочном массиве рудников Талнаха. Норильск, 2019.

80. Указания по безопасному ведению горных работ на Талнахском и Октябрьском месторождениях, склонных и опасных по горным ударам. Норильск-Санкт-Петербург 2015 год.

81. ГОСТ 28570-2019 Бетоны. Методы определения прочности по образцам, отобраным из конструкций.

82. ГОСТ 17624-2012 Бетоны. Ультразвуковой метод определения прочности.

83. ГОСТ 18105-2018 «Бетоны. Правила контроля и оценки прочности».

84. Панкратенко А.Н., Машин А.Н., Насонов А.А., Паринов Д.С. Особенности оценки технического состояния шахтных стволов с большим сроком эксплуатации // Горный журнал. 2023. № 1. С. 20 - 26.

85. Машин А.Н. Методика оценки устойчивости эксплуатационных вертикальных стволов // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. 2023. № 8. С. 156 - 163.

86. Машин А.Н. Совершенствование технологии реконструкции шахтных стволов в сложных горнотехнических условиях: Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2023. № 8 (специальный выпуск 9). 20 с.

87. Машин А.Н. Концепция комплексной оценки технического состояния шахтных стволов // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2023. № 10. С. 31 - 42.

88. Клебанюк Д.Н., Пойта П.С., Шведовский П.В., Худинский С.В. К вопросу оптимизации конструктивно-технологических параметров процесса уплотнения и контроля характера и степени уплотнения грунтов георадарными технологиями // Вестник Брестского государственного технического университета. 2016. № 1. С. 140-143.

89. Кульбаев Б.Б., Хомяков В.А., Жамек Н.А., Шокбаров А.М. Эффективность технического обследования с применением георадара // Вестник АО «КАЗНИИСА». 2020. № 3. С. 50-61.

90. Капустин В.В., Денисов Р.Р. Обработка георадарных данных в автоматическом режиме // Геофизика, №4, 2010. С.76 - 80.

91. Капустин В.В., Кувалдин А.В. Применение комплекса геофизических методов при исследовании фундаментных плит // Технологии сейсморазведки. 2015. №1. С. 99-105.

92. Колбенков А.В., Черныш Е.М., Капустин В.В., Чуркин А.А. Опыт 3D геоэлектрического картирования межскважинного пространства для оценки зон повышенной закарстованности при инженерном освоении // Инженерная геология. 2022. Т. 17. № 3. С. 64-75.

93. Истратов В.А., Колбенков А.В., Лях Е.В., Перекалин С.О. Радиоволновой метод мониторинга технологических процессов в межскважинном пространстве // Вестник КРАУНЦ. Науки о земле. 2009. № 2. Вып. 14. С. 59-68.

94. Истратов В.А., Колбенков А.В., Лях Е.В., Перекалин С.О. Радиоволновой метод мониторинга технологических процессов в межскважинном пространстве // Вестник Камчатской региональной ассоциации Учебно-научный центр. Серия: Науки о Земле. 2009. № 2 (14). С. 59-68.

95. Hoek E., Carter T.G, Diederichs M.S. Quantification of the Geological Strength Index Chart. 2013.

96. Хажыылай Ч.В., Еременко В.А., Косырева М.А., Янбеков А.М. Горный информационно-аналитический бюллетень. 2018. № 12. С. 92 - 101.

97. Фоменко И.К., Пендин В.В., Горобцов Д.Н. Оценка устойчивости бортов карьеров в скальных грунтах // Горные науки и технологии. 2016. № 3. С. 10 - 21.

98. Паньков И.Л. Изучение механизма бокового распора гравитационного поля напряжений в горных породах // Стратегия и процессы освоения георесурсов. ГИ УрО РАН. Пермь, 2016. Вып. 14. С.110 - 112.

99. Паньков И.Л. Физическое моделирование и теоретическая оценка бокового распора в горных породах под действием силы тяжести // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2016. № 5. С.68-75.

100. Неверов А.А. Развитие научных основ подземных комбинированных технологий разработки мощных пологопадающих рудных залежей в сложных геомеханических условиях. : дис. ... д-ра техн. наук: 25.00.22 / Неверов Александр Алексеевич. Новосибирск, 2020. 359 с.

101. Сильченко Ю.А., Плешко М.С. О проблеме учета технологии работ при определении параметров крепи вертикальных стволов // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2020. № 11. С. 96-107.

## ПРИЛОЖЕНИЕ А. АКТ ВНЕДРЕНИЯ

АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО  
«УПРАВЛЕНИЕ СТРОИТЕЛЬСТВА №30»  
(АО «УС-30»)



ул. Советская, д. 17, г. Межгорье, Республика Башкортостан, 453571  
Тел. 8 (34781) 2-21-45; 8 (34781) 2-32-00. Факс: 8 (34781) 2-12-44, e-mail: [us30@us30.ru](mailto:us30@us30.ru)  
ИНН 0279998391, КПП 027901001, ОКВЭД 41.20, ОГРН 1210200056406

УТВЕРЖДАЮ

Начальник ОП АО «УС-30»

Г.В. Мирошниченко

«11» сентября 2023 г.

### АКТ

об использовании результатов диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук Машина Алексея Николаевича на тему «Обоснование методики оценки технического состояния и технологических схем реконструкции глубоких вертикальных стволов» по специальности 2.8.8 «Геотехнология, горные машины»

Комиссия в составе:

Председатель – Заместитель главного инженера ОП АО «УС-30» –  
Петров Денис Васильевич

Члены комиссии:

1. Начальник блока ПИР – Ахтырцев Сергей Анатольевич;
2. Главный инженер ОП АО «УС-30»/заместитель начальника блока ПИР –  
Рижук Виктор Викторович;
3. Начальник филиала АО «УС-30» ШСУ Норильск –  
Гартиг Виктор Эрихович

составили настоящий Акт о том, что результаты диссертации Машина Алексея Николаевича на тему «Обоснование методики оценки технического состояния и технологических схем реконструкции глубоких вертикальных стволов»,

представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.8.8 «Геотехнология, горные машины» использованы при разработке проектных решений и производстве работ по реконструкции ствола ВС-5 рудника «Таймырский» ПАО «ГМК «Норильский никель».

Основные положения диссертации Машина А.Н. использованы при оценке фактического технического состояния ствола ВС-5 рудника «Таймырский» ПАО «ГМК «Норильский никель», а также выборе и обосновании параметров новой тюбинговой крепи при разработке проекта реконструкции ствола.

С учетом рекомендаций, приведённых в главах 2-4 диссертационной работы, разработана и реализована технологическая схема реконструкции ствола ВС-5 рудника «Таймырский», предусматривающая выполнение работ в направлении сверху вниз с сохранением целостности существующей крепи и возведением внутренней тюбинговой колонны с ее опиранием на анкерных элементах с высокой несущей способностью.

Оценка технико-экономической эффективности предложенной технологической схемы по сравнению с традиционными решениями показала, что при ее применении обеспечивается сокращение сроков реконструкции ствола на 1,2 года и экономический эффект в размере 1 млрд. 140 млн. руб.

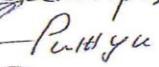
Подписи:

Председатель комиссии

 Петров В.В.

Члены комиссии:

 Артюхин С.А.

 Рыжук В.В.

 В.А. Васюков

Подписи председателя и членов комиссии заверяю:

 Е.А. Каргин  
Начальник отдела кадров

