

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Пермский национальный исследовательский политехнический университет»

*На правах рукописи*

Лебедева Олеся Олеговна



ПРОГНОЗ ДЕФОРМАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ МЕЖДУШАХТНЫХ  
ЦЕЛИКОВ КАЛИЙНОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ НА ОСНОВЕ КОМПЛЕКСА  
НАТУРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Специальность 2.8.6. Геомеханика, разрушение горных пород, рудничная  
аэрогазодинамика и горная теплофизика

Диссертация на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель:  
доктор технических наук, профессор  
Кашников Юрий Александрович

Пермь – 2023

## ОГЛАВЛЕНИЕ

<b>ВВЕДЕНИЕ.....</b>	<b>5</b>
<b>ГЛАВА 1 СУЩЕСТВУЮЩИЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ О РАЗВИТИИ ДЕФОРМАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ МАССИВА ГОРНЫХ ПОРОД И ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ ПРИ ОСТАВЛЕНИИ МЕЖДУШАХТНЫХ ЦЕЛИКОВ .....</b>	<b>13</b>
1.1 Общие принципы определения размеров междушахтных целиков. Теоретические решения и нормативные документы, регламентирующие построение междушахтных целиков при отработке запасов ВКМКС .....	13
1.2 Существующие математические модели соляных пород, используемые при расчете параметров НДС при отработке ВКМКС .....	16
1.3 Опыт использования комплекса натуральных исследований массива горных пород для решения проблем оценки НДС массивов горных пород при их подработке...	20
1.4 Геомеханическая и технологическая характеристика в районе целиков между шахтными полями СКРУ-1–СКРУ-2 и СКРУ-2–СКРУ-3 .....	25
1.4.1 Физико-механические свойства и исходное напряженное состояние соляных пород.....	25
1.4.2 Геологическая, геомеханическая и технологическая характеристики целиков между шахтными полями СКРУ-1 – СКРУ-2 и СКРУ-2 – СКРУ-3.....	28
1.4.3 Опыт использования геофизических методов для решения проблем сохранности ВЗТ при разработке ВКМКС .....	35
1.5 Цели и задачи исследования .....	37
1.6 Выводы по Главе 1 .....	38
<b>ГЛАВА 2 РАЗВИТИЕ ДЕФОРМАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ ПО ДАННЫМ МАРКШЕЙДЕРСКО-ГЕОДЕЗИЧЕСКИХ НАБЛЮДЕНИЙ В РАЙОНЕ ЦЕЛИКОВ МЕЖДУ ШАХТНЫМИ ПОЛЯМИ СКРУ-1 – СКРУ-2 И СКРУ-2 – СКРУ-3.....</b>	<b>40</b>

2.1 Характеристика наблюдательной станции за сдвижением земной поверхности в районе междушахтных целиков СКРУ-1 – СКРУ-2 и СКРУ-2 – СКРУ-3 .....	40
2.2 Результаты инструментальных наблюдений по линии нефтепровода .....	42
2.3 Результаты наблюдений по данным ПАО «Уралкалий» .....	48
2.4 Расчёт сдвижений и деформаций земной поверхности на основании действующих нормативных документов при оставлении целиков между шахтными полями СКРУ-1 – СКРУ-2 и СКРУ-2 – СКРУ-3 .....	54
2.5 Выводы по Главе 2 .....	57
<b>ГЛАВА 3 ПОСТРОЕНИЕ ГЕОЛОГО-ГЕОМЕХАНИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ МАССИВА ГОРНЫХ ПОРОД В РАЙОНЕ ЦЕЛИКОВ МЕЖДУ ШАХТНЫМИ ПОЛЯМИ СКРУ-1 – СКРУ-2 И СКРУ-2 – СКРУ-3.....</b>	<b>59</b>
3.1 Основные принципы создания геолого-геомеханической модели .....	59
3.2 Анализ геологической информации в районе целиков между шахтными полями СКРУ-1 – СКРУ-2 и СКРУ-2 – СКРУ-3.....	63
3.3 Обработка данных ГИС в районе междушахтных целиков.....	70
3.4 Зависимости между статическими и динамическими физико-механическими свойствами соляных пород.....	73
3.5 Построение геолого-геомеханической модели массива горных пород в районе целиков между шахтными полями .....	83
3.6 Выводы по Главе 3 .....	92
<b>ГЛАВА 4 ОЦЕНКА И ПРОГНОЗ НДС МАССИВА ГОРНЫХ ПОРОД И МЕЖДУШАХТНЫХ ЦЕЛИКОВ СКРУ-1 – СКРУ-2 И СКРУ-2 – СКРУ-3....</b>	<b>93</b>
4.1 Конечно-элементные схемы и особенности расчетов параметров НДС массива горных пород в районе междушахтных целиков. Параметрическое обеспечение моделей.....	93

4.2 Расчеты параметров НДС массива горных пород и земной поверхности при оставлении целиков между шахтными полями СКРУ-1 – СКРУ-2 и СКРУ-2 – СКРУ-3. Сравнение результатов расчетов с результатами наблюдений .....	99
4.3 Прогноз развития деформационных процессов массива горных пород и земной поверхности при оставлении целиков между шахтными полями СКРУ-1 – СКРУ-2 и СКРУ-2 – СКРУ-3 .....	109
4.4 Выводы по Главе 4 .....	114
<b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....</b>	<b>116</b>
<b>СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ .....</b>	<b>118</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ А Акт об использовании результатов кандидатской диссертации .....</b>	<b>129</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ Б Заявка на патент .....</b>	<b>131</b>

## ВВЕДЕНИЕ

### **Актуальность темы исследования**

Многолетний опыт разработки калийных месторождений, в частности, Верхнекамского месторождения калийно-магниевых солей (ВКМКС), показал, что самым неблагоприятным и пагубным последствием является затопление всего шахтного поля или его участка. Как правило, причиной затоплений является формирование и развитие техногенных водопроводящих трещин или развитие существующих трещин в массиве, которые, чаще всего, приурочены к зонам с ослабленными физико-механическими свойствами, выделить которые весьма сложно.

К основным влияющим факторам, определяющим развитие деформационных процессов подрабатываемой толщи пород при разработке ВКМКС, следует отнести геологические особенности строения Соликамской впадины, различные техногенные события, которые проявили себя в связи с отработкой промышленных запасов месторождения, физико-механические свойства вмещающих пород и продуктивных пластов, а также развитие горных работ и их текущее положение.

Опыт геомеханического анализа произошедших техногенных аварий на территории ВКМКС показывает, что для прогноза деформационных процессов определяющим фактором являются физико-механические свойства горных пород. Получить надежное распределение свойств в массиве и в продуктивных пластах пытаются, прежде всего, комбинированием натуральных методов исследований. В связи с этим предлагается комплексирование натуральных исследований, а именно геологических, геофизических и геомеханических подходов при создании геолого-геомеханической модели участка водозащитной толщи (ВЗТ) для прогноза деформационных процессов междушахтных целиков рудников на территории ВКМКС. В качестве исходных данных используется геологическое описание колонок скважин, геофизические исследования в скважинах, физико-механические свойства пород, результаты маркшейдерских наблюдений за сдвижением земной

поверхности. Обработка имеющихся данных по скважинам позволяет создать трёхмерную модель распределения скорости продольной волны, а, в свою очередь, статистические зависимости для двух основных параметров физико-механических свойств (модуль упругости и предел прочности на сжатие) от скорости продольной волны позволяют получить значения данных свойств в любой точке модели.

На основе созданной геолого-геомеханической модели производится моделирование и прогноз напряженно-деформированного состояния междушахтных целиков рудников калийного месторождения.

### **Степень разработанности темы исследования**

Моделированием деформационных процессов массива горных пород и земной поверхности при разработке месторождений калийно-магниевых руд занимались и занимаются различные учёные и специалисты – Нестеров М. П., Барях А. А., Проскуряков Н. М., Протосеня А. Г., Ержанов Ж. С., Оловянный С. Г., Константинова С. А., Журавков М. А., Кашников Ю. А., Тенисон Л. О., а также зарубежные специалисты – Wittke W., Kiehl J. R., Doering T., Fenk J., Hou Z., Lux K., Uhlenbecker W., Menzel W. и другие.

Геофизические методы исследования широко используются для описания геологического строения массива. Методы отлично зарекомендовали себя на месторождениях углеводородов. На сегодняшний день они активно применяются для изучения массивов при разработке твёрдых полезных ископаемых открытым и подземным способами. Результаты исследований широко представлены в работах Санфирова И. А., Жукова А. А., Мельника В. В., Еременко А. А., Козырева А. А., Бахаевой С. П. и другие.

При этом, отсутствует опыт совместного использования геомеханических и геофизических методов для параметрического обеспечения геомеханических расчетов.

В последние годы развивается метод построения геолого-геомеханической модели массива пород ВЗТ, разработанный специалистами ПНИПУ под руководством проф. Кашникова Ю. А. Метод основан на комплексном применении геофизических и геомеханических исследований.

При использовании такого подхода решается актуальная задача – получение дополнительной информации об особенностях строения массива горных пород и распределении их геомеханических свойств, что позволяет выполнить расчет напряженно-деформированного состояния массива пород ВЗТ с использованием их реальных значений.

### **Предмет, объект исследования**

В качестве предмета исследования выступают деформационные процессы, происходящие в массиве горных пород, а именно в водозащитной толще, а также на земной поверхности в районе междушахтных целиков между шахтными полями СКРУ-1 – СКРУ-2 и СКРУ-2 – СКРУ-3 (Соликамское калийное рудоуправление № 1, № 2, № 3). В качестве объекта исследования выбран массив горных пород и земная поверхность в районе междушахтных целиков между СКРУ-1 – СКРУ-2 и СКРУ-2 – СКРУ-3.

### **Цель работы**

Цель работы заключается в анализе и прогнозе напряженно-деформированного состояния массива горных пород и оседаний земной поверхности в районе междушахтных целиков СКРУ-1 – СКРУ-2 и СКРУ-2 – СКРУ-3 ПАО «Уралкалий» с использованием комплекса натуральных исследований, под которыми понимается совокупность геологических, геомеханических и геофизических исследований и маркшейдерских наблюдений.

**Идея работы** состоит в использовании для расчета напряженно-деформированного состояния массива горных пород комплекса натуральных исследований, в основе которых лежат зависимости между статическими и динамическими геомеханическими параметрами соляных пород, результаты обработки геолого-геофизических параметров солеразведочных скважин и результаты маркшейдерских наблюдений за оседаниями земной поверхности.

### **Задачи исследования**

Поставленная в диссертационной работе цель достигается посредством решения следующих задач:

1. Анализ существующих теоретических и практических основ создания геолого-геомеханических моделей.

2. Проведение испытаний образцов соляных пород, обработка результатов, получение статистических зависимостей между статическими и динамическими геомеханическими параметрами соляных пород.

3. Обработка результатов измерений оседаний земной поверхности в районе междушахтных целиков.

4. Обработка данных акустического каротажа солеразведочных скважин.

5. Создание геолого-геомеханической модели массива горных пород в районе междушахтных целиков.

6. Численное моделирование процессов оседаний земной поверхности в районе междушахтных целиков на основе созданной геолого-геомеханической модели массива горных пород.

### **Научная новизна работы**

Впервые получены математические зависимости между статическими и динамическими геомеханическими характеристиками соляных пород ВКМКС.

На основе комплексного использования геологической информации, данных акустического каротажа скважин, результатов определений статических и динамических геомеханических характеристик образцов горных пород получено распределение физико-механических свойств массива горных пород исследуемого участка ВКМКС.

Выполнено численное решение задачи расчета напряженно-деформированного состояния массива горных пород в районе междушахтных целиков, основанный на комплексном использовании результатов натурных исследований.

### **Теоретическая и практическая значимость работы**

1. Полученные зависимости между статическими и динамическими геомеханическими характеристиками соляных пород могут быть использованы для прогноза параметров напряженно-деформированного состояния массива горных



пород как в окрестности одиночных выработок, так и при создании крупных моделей.

Разработанный алгоритм получения распределения физико-механических свойств в массиве пород ВЗТ, основанный на комплексном использовании геологической, геофизической и геомеханической информации, может быть распространен на всю территорию ВКМКС.

Выполненное геомеханическое моделирование напряжённо-деформированного состояния массива пород ВЗТ и земной поверхности на основе созданной геолого-геомеханической модели районе междушахтных целиков между шахтными полями СКРУ-1 – СКРУ-2 и СКРУ-2 – СКРУ-3 позволило выявить развитие зон разрушения в массиве пород ВЗТ.

Исследование выполнено при финансовой поддержке ФГБУ РФФИ в рамках выполнения научного проекта № 20-35-90031 (договор от 01.09.2020).

Результаты и рекомендации диссертационной работы приняты к использованию в процессе проектирования и выполнения научно-технических и проектных работ деятельности АО «ВНИИ Галургии», оформлены актом использования результатов, утверждённый 13.12.2023 г. техническим директором АО «ВНИИ Галургии» Ванком В. В. (Приложение А).

### **Методология и методы исследования**

Методология и методы исследований включали проведение лабораторных испытаний образцов соляных пород на специализированном оборудовании с использованием комплексных методик и подходов, анализ инструментальных наблюдений за оседаниями земной поверхности, обработку данных акустического каротажа солеразведочных скважин, использование математических моделей механики сплошных сред, численных расчетов и верификации их на натурных данных.

### **Положения, выносимые на защиту**

1. Доказано, что для условий Верхнекамского месторождения калийно-магниевых солей прочностные и деформационные характеристики соляных пород в массиве могут быть установлены на основании измеренных в лабораторных

условиях скоростей прохождения продольных волн в диапазоне 3750 м/сек до 4600 м/сек.

2. Для получения распределения физико-механических свойств горных пород в массиве необходимо комплексное использование полученных зависимостей, результатов геофизических исследований скважин и геологической информации, что позволяет создать основу для численного моделирования напряженно-деформированного состояния массива горных пород.

3. Математическое моделирование процессов деформирования массива пород ВЗТ и земной поверхности основано на полученном распределении физико-механических свойств горных пород в массиве.

**Степень достоверности результатов исследования** обусловлена использованием общепризнанных моделей механики сплошных сред, верификации численных расчетов на результатах испытаний образцов соляных пород, хорошей сходимостью результатов моделирования с данными натурных наблюдений за оседанием земной поверхности на ВКМКС.

**Апробация результатов.** Основные положения и результаты работы докладывались на следующих семинарах и конференциях: XV Международный форум-конкурс студентов и молодых учёных «Актуальные проблемы недропользования», 13-17 мая 2019 г., г. Санкт-Петербург, Санкт-Петербургский Горный университет; XVII Международный форум-конкурс студентов и молодых учёных «Актуальные проблемы недропользования», 31 мая - 6 июня 2021 г., г. Санкт-Петербург, Санкт-Петербургский Горный университет; Международная конференция «EUROCK 2021», 21-24 сентября 2021 г., г. Турин, Италия (online формат); XXI Уральская горнопромышленная декада «Разрушение горных пород и минералов», 4-7 апреля 2023 г. Екатеринбург, Уральский государственный горный университет; XIX Международный форум-конкурс студентов и молодых учёных «Актуальные проблемы недропользования», 22-26 мая 2023 г., г. Санкт-Петербург, Санкт-Петербургский Горный университет.

**Личный вклад автора** заключается в постановке цели и задач диссертационного исследования; анализе зарубежной и отечественной научной

литературы по теме исследования; участии в проведении испытаний соляных пород; получении статистических зависимостей между статическими и динамическими геомеханическими характеристиками соляных пород; анализе и обработке геологической информации; анализе и обработке данных ГИС; анализе и обработке результатов измерений оседаний земной поверхности; создании геолого-геомеханической модели массива горных пород; проведении численного моделирования для определения деформационных процессов в массиве и процессов оседаний земной поверхности в районе междушахтных целиков; прогнозировании деформационных процессов в массиве и процессов оседаний земной поверхности в районе междушахтных целиков.

### **Публикации**

Результаты диссертационного исследования в достаточной степени освещены в 8 печатных работах (пункты списка литературы № 39, 40, 41, 62, 82, 88, 92, 99), в том числе, в 4 статьях – в изданиях из перечня рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук, в 2 статьях – в изданиях, входящих в международную базу данных и систему цитирования Scopus. Подана 1 заявка на патент (Приложение Б).

### **Структура работы**

Диссертация состоит из оглавления, введения, четырёх глав с выводами по каждой, заключения, списка литературы, включающего 106 наименований. Диссертация изложена на 131 странице машинописного текста, включает 56 рисунков и 5 таблиц.

### **Благодарности**

Автор выражает благодарность доктору технических наук, профессору Кашникову Юрию Александровичу и сотрудникам ПНИПУ за помощь, оказанную при работе над диссертацией, сотрудникам кафедры строительства горных предприятий и подземных сооружений Санкт-Петербургского горного университета имени императрицы Екатерины II за проявленное внимание к работе

и высказанные критические замечания, которые существенно улучшили её качество.

## **ГЛАВА 1 СУЩЕСТВУЮЩИЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ О РАЗВИТИИ ДЕФОРМАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ МАССИВА ГОРНЫХ ПОРОД И ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ ПРИ ОСТАВЛЕНИИ МЕЖДУШАХТНЫХ ЦЕЛИКОВ**

### **1.1 Общие принципы определения размеров междушахтных целиков. Теоретические решения и нормативные документы, регламентирующие построение междушахтных целиков при отработке запасов ВКМКС**

Междушахтные целики при разработке ВКМКС носят исключительно предохранительный характер. Целики разделяют всё месторождение на отдельные шахтные поля, которые разрабатываются разными предприятиями. Оставление междушахтных целиков относится к мерам защиты сопряжённых рудников от затопления при нарушении допустимых условий подработки водозащитной толщи.

В соответствии с п. 211 приказа № 505 Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 08.12.2020 г. «Об утверждении Федеральных норм и правил в области промышленной безопасности «Правила безопасности при ведении горных работ и переработке твердых полезных ископаемых» раздела «Требований безопасности к разработке месторождений калийно-магниевой и каменной солей»: вскрытие и отработка месторождения должны вестись гидроизолированными участками с оставлением предохранительных гидроизолирующих целиков и определением мест сооружения водонепроницаемых перемычек при аварийных рассолопроявлениях<sup>1</sup>.

Вопрос определения ширины предохранительных целиков между соседними разрабатываемыми участками одного месторождения мало изучен. В общем случае, при определении размеров предохранительного целика необходимо учитывать размер и положение выработанного пространства в вертикальной плоскости. Влияние горных работ распространяется в массиве на земную поверхность в виде деформаций и сдвижений под угловыми параметрами процесса

---

<sup>1</sup> Об утверждении федеральных норм и правил в области промышленной безопасности «Правила безопасности при ведении горных работ и переработке твердых полезных ископаемых»: приказ Ростехнадзора от 8 декабря 2020 г. № 505

сдвижений, в качестве которых, как правило, принимается угол сдвижений. Таким образом, в классическом варианте предварительно определяется размер оставляемого целика в зависимости от охраняемых объектов на земной поверхности – от крайней точки выработанного пространства под граничным углом сдвижения определяется точка на земной поверхности, где будет граничить мульда сдвижения или зона, где деформации не будут превышать требуемых допустимых или предельных значений. В свою очередь, при пересечении двух зон влияния от соседних шахтных полей формируется двойное влияние в массиве и возникает повышенный риск формирования или распространения водопроводящих трещин.

При условии, что при построении постоянных предохранительных целиков на ВКМКС используется значение угла  $55^\circ$  [69], то при средней глубине разработки 250-450 м ширина зоны влияния составит примерно 350-640 м. Тогда, для взаимного исключения влияния разработки двух смежных шахтных полей полученную величину необходимо удвоить, что приведёт к колоссальным потерям в целике. Тем не менее, возможно предположить, что при известной глубине разработки 250-450 м на ВКМКС и имеющемся опыте разработки месторождения, минимальная ширина целика выбрана таким образом, чтобы влияние от разработки двух соседних шахтных полей находилась выше глубины, для которой определяется минимально допустимая мощность ВЗТ.

По опыту разработки угольных и сланцевых шахт размер целика  $d$  определяется по формуле (1.1), предложенной Поляковым В.М. [45]:

$$d = 5m + 0.05H + 0.002L, \quad (1.1)$$

где  $m$  – выемочная мощность пласта, м,

$H$  – расстояние по вертикали от земной поверхности до барьерного целика, м,

$L$  – протяженность съемки по затопленным выработкам и действующим до точки, для которой определяется целик, м.

Так, если в качестве  $m$  задать высоту выемочного пространства при разработке двух сильвинитовых пластов АБ и Кр-II с междупластьем между ними,

то  $m$  составит от 10 м. Тогда, при глубине разработки 300 м согласно формуле Полякова В.М. ширина целика будет равна 65 м, а для двух соседних рудников величину необходимо удвоить, т.е. получится размер целика 130 м.

В существующих нормативных документах [69], регламентирующих разработку ВКМКС существует методика вычисления ширины предохранительного гидроизолирующего целика. Необходимая ширина целика определяется по формуле (1.2) на уровне подошвы обрабатываемого сильвинитового пласта:

$$B = \begin{cases} 2[ctg\delta(H_v + M_o) + B_o + \Delta B_o] \\ 200 \text{ м} \end{cases} \quad (1.2)$$

где  $\delta$  – угол сдвиговых нарушений,  $\delta = 60^\circ$ ,

$H_v$  – среднее значение суммарной мощности ВЗТ<sub>1</sub> и ВЗТ<sub>2</sub> в пределах рассматриваемого участка предохранительного целика, определяется по геологическим разрезам скважин,

$M_o$  – расчетная высота выработанного пространства,

$B_o$  – предохранительная берма, соответствующая части предохранительного целика, в пределах которого должна обеспечиваться водонепроницаемость пород,  $B_o = 25$  м,

$\Delta B_o$  – возможная погрешность определения кровли водозащитной толщи (в пределах ширины верхней части предохранительного целика),  $\Delta B_o = 6$  м.

Несмотря на все результаты расчета целиков, определенные по формуле (1.2), ширина целика на ВКМКС принимается не менее 200 м.

Размер междушахтных целиков в первую очередь зависит от высоты выработанного пространства, по сути, от суммарной мощности извлекаемых пластов с учётом оставляемых междупластий. Также необходимо учитывать минимальную допустимую мощность водозащитной толщи, поскольку её сохранность влияет на состояние выработанного пространства и земной поверхности. Суммарно высота выработанного пространства и минимально допустимой мощности водозащитной толщи определяет так называемую

охраняемую часть массива, в которой возможно распространение зоны сдвиговых нарушений при известной величине угла сдвиговых нарушений.

Одним из основных охраняемых объектов при разработке ВКМКС является водозащитная толща. И, если в ней не возникает деформационных процессов, которые влекут за собой проникновение воды в выработанное пространство и последующее затопление шахтного поля при разработке смежных участков, тогда ширина междушахтного целика считается подобранной верно. Это обуславливает то, что в формуле (1.2) учитывается исключительно сумма высоты выработанного пространства и среднее значение суммарной мощности  $VЗТ_1$  и  $VЗТ_2$  в пределах рассматриваемого участка предохранительного целика.

На сегодняшний день размер предохранительного целика составляет 200 м, поскольку регламентируется действующим нормативным документом.

## **1.2 Существующие математические модели соляных пород, используемые при расчете параметров НДС при отработке ВКМКС**

Опыт разработки соляных месторождений свидетельствует о том, что породы обладают заметными реологическими свойствами, т.е. процессы деформирования проявляются во времени в виде вязко-упруго-пластических деформаций. Соответственно, при расчёте параметров напряжённо-деформированного состояния горных пород при отработке ВКМКС необходимо использовать такую модель, которая бы максимально корректно отображала протекающие процессы как вблизи горных выработок, так и в массиве. Однако данные модели представляются достаточно сложными, поскольку при решении крупномасштабной задачи необходимо учитывать особенности геологического строения всего массива, и, соответственно, особенности деформирования всех вмещающих пород во времени под нагрузкой. До настоящего времени данная задача является до конца не решённой.

Разработкой моделей соляных пород занимались Ержанов Ж. С. [51, 19, 20], Оловянный С. Г. [49, 50], Константинова С. А. [31, 33, 34, 35, 36], а также



зарубежные специалисты Kiehl J. R. [89, 90, 91], Doering T. [1] и многие другие. Стоит отметить, что внимание авторов сконцентрировано на определении напряженно-деформированного состояния вокруг горных выработок.

Крупномасштабное моделирование напряженно-деформированного состояния массива горных пород можно встретить в работах Баряха А. А. [6, 7], Протосени А. Г. [55, 56, 79], Оловянного С. Г. [50], Журавкова М. А. [30, 22, 23], Кашникова Ю. А., Ашихмина С. Г. [28], Wittke W. [103, 104, 105], Fenk J., Hou Z. [83, 84, 85], Lux K. [93, 94, 95], Uhlenbecker W. [100], Menzel W. [96, 97] и др. Отличительной особенностью данных решений является то, что при моделировании массив имеет строго слоистое строение, каждый слой которого задан определёнными свойствами в соответствии с геологическим описанием толщи. Разделение, как правило, идёт на основные структурные разности, используемые для общепринятого описания геологического строения толщи. При этом, распределение физико-механических свойств горных пород в расчетных схемах принималось, чаще всего, либо на основе керновых испытаний, либо на основе обратных расчетов по смещениям земной поверхности либо по смещениям пород вокруг отдельных выработок.

При расчете напряженно-деформированного состояния массива пород ВКМКС для описания деформирования пород во времени с учётом истории нагружения весьма часто используется известная теория линейной наследственной ползучести. Данная теория основывается на трёх принципах: принцип наследственности говорит о том, что деформации пород продолжаются после приложения или снятия внешних нагрузок; принцип линейности – деформации пропорциональны действовавшим в разные моменты времени напряжениям; принцип суперпозиции – общая деформация равна сумме всех деформаций, возникших в разные моменты времени. Данная теория ползучести описывается интегральным уравнением Вольтера второго рода (формула (1.3)) [101]:

$$\varepsilon(t) = \frac{1}{E} \left( \sigma(t) + \int_0^t K(t - \tau) \sigma(\tau) d\tau \right), \quad (1.3)$$

где  $E$  – модуль упругости,

$K(t - \tau)$  – ядро ползучести, отражает влияние на деформацию в момент времени  $t$  нагрузки, приложенной в момент времени  $\tau$ .

В линейной теории вязкоупругости предполагается линейная связь напряжений и деформаций. Поэтому, интегральное уравнение можно заменить обычным алгебраическим суммированием.

Для описания процесса ползучести соляных пород широкое применение получило Абелево ядро (формула (1.4)) [4, 12, 19]:

$$K(t - \tau) = \delta(t - \tau)^{-\alpha}, \quad (1.4)$$

где  $\alpha$  и  $\delta$  – параметры Абелева ядра ползучести ( $0 < \alpha < 1$ ,  $\delta > 0$ ).

Согласно исследованиям Ержанова Ж.С. для горных пород ядро ползучести может принять следующий вид (формула (1.5)) [19, 20]:

$$\Phi = \frac{\delta \cdot t^{1-\alpha}}{1-\alpha}. \quad (1.5)$$

Параметр  $\alpha$  безразмерный,  $\delta$  имеет размерность  $c^{-1+\alpha}$ .

В реальных условиях проявление со временем деформационных процессов в горных выработках выражается в виде постепенного остлаивания пород стенок и кровли, пучения почвы выработки, проявлению микротрещин в целиках [82]. Описать математически природу процессов в таком случае представляется сложной задачей, поскольку необходимо подобрать параметры ядра ползучести. Реальное поведение горной породы под нагрузкой можно увидеть при прямых испытаниях на ползучесть.

Под руководством Баряха А. А., Асанова В. А., Паньков И. Л. проведено значительное количество испытаний соляных пород Верхнекамского месторождения [8]. Специалистами выявлено, что стадия затухающей ползучести фиксировалась при следующих уровнях нагружения: каменная соль –  $0,6 \cdot \sigma_{пр}$ , сильвинит –  $0,4 \cdot \sigma_{пр}$ , карналлит –  $0,2 \cdot \sigma_{пр}$ . Стадия установившейся ползучести, характеризующаяся постоянной скоростью деформирования, наблюдалась при уровнях нагрузки: каменная соль –  $0,7 \cdot \sigma_{пр}$  и  $0,8 \cdot \sigma_{пр}$ , сильвинит –  $0,5 \cdot \sigma_{пр}$ , карналлит –  $0,3 \cdot \sigma_{пр}$ . Полного разрушения образца не наступало, поскольку продолжительность эксперимента составила приблизительно 40 суток. Таким

образом, испытания пород говорят о необходимости учитывать нелинейное поведение, тем самым математические модели становятся более комплексными.

В действующих нормативных документах, регламентирующих вопросы безопасной разработки ВКМКС [69], существует методика оценки состояния ВЗТ методом математического моделирования. Методика предназначена для определения условий безопасной подработки ВЗТ на участках развития аномалий II и III группы.

Реологические свойства пород описываются линейно-наследственной средой с параметрами степенного ядра Абеля:  $\alpha = 0.7$ ,  $\delta = (5 \times 10^{-4} \div 5 \times 10^{-3}) c^{-1+\alpha}$ . В зависимости от поставленной задачи оценка безопасных условий подработки ВЗТ может быть проведена на основе различных критериальных соотношений. Для задач, в которых опасность нарушения водонепроницаемости ВЗТ связана с локальными неоднородностями строения подрабатываемого массива (открытые трещины, ослабленные зоны и т.д.), в качестве критерия возникновения и распространения трещин используется энергетический критерий механики разрушения. В этом случае определяется уровень горизонтальных, вертикальных и сдвиговых напряжений на потенциально опасных участках ВЗТ.

Критерием зарождения и развития трещин является скорость высвобождения энергии при росте трещин  $G$ . При отсутствии экспериментальной информации о критическом значении скорости высвобождения энергии её величина для соляных пород принимается равной  $G_c = 1000 \text{ Па} \times \text{м}$ . Условием распространения трещин является превышение рассчитанной скорости высвобождения энергии над критическим значением, т.е.  $G > G_c$ . В свою очередь, основными исходными данными для расчёта скорости высвобождения энергии является горизонтальные, вертикальные, сдвиговые напряжения и длина трещины, которая отклонена от вертикального направления.

На сегодняшний день выполнено многочисленное количество исследований по изучению деформационных процессов в окрестности горных выработок на ВКМКС, кроме этого, проведено большое количество испытаний горных пород,

изучены всевозможные физико-механические свойства. Крупномасштабное моделирование представляется трудоёмкой и трудозатратной работой. Однако до сих пор моделирование напряжённо-деформированного состояния сводится к послойному заданию свойств в массиве и замене реальной геометрии горных выработок на «эквивалентные» слои. В качестве параметрического обеспечения используют, чаще всего, либо результаты инструментальных наблюдений за сдвижением земной поверхности при расчете сдвижений земной поверхности, либо результаты натуральных наблюдений за смещениями массива соляных пород вокруг выработок. Одной из задач данной работы как раз является создание такой геолого-геомеханической модели, которая бы максимально подробно отображала реальные геомеханические свойства соляных пород, что позволит более точно определить протекающие процессы в массиве пород.

### **1.3 Опыт использования комплекса натуральных исследований массива горных пород для решения проблем оценки НДС массивов горных пород при их подработке**

Комплексное использование натуральных исследований для прогноза напряженно-деформированного состояния массива горных пород базируется на совокупности геологических, геофизических и геомеханических подходов при создании геолого-геомеханической модели участка водозащитной толщи. К геомеханическим методам относятся, прежде всего, испытания соляных пород с целью получения их физико-механических характеристик, проведение инструментальных наблюдений за сдвигами земной поверхности и массива горных пород, а также за деформациями пород вокруг отдельных выработок и математическое (численное) моделирование напряженно-деформированного состояния горных пород как вокруг выработок, так и в целом массива пород налегающей толщи.

К геофизическим методам относятся проведение сейсморазведки 2D или 3D на земной поверхности и последующее выделение зон различной плотности пород

в массиве и на основе этого представление вывода о степени опасности выделенных зон. В аналогичном аспекте используются также гравиметрические методы. В последние годы в стадии интенсивного развития находятся внутришахтные геофизические методы.

Ниже в кратком формате будут представлены основные особенности использования геофизических и геомеханических методов для прогноза напряженно-деформированного состояния массива горных пород Верхнекамского месторождения калийно-магниевых солей. В связи с тем, что в рамках диссертационной работы будет представлено практическое применение данных методов к прогнозу НДС массива пород ВЗТ в районе междушахтных целиков, будут также представлены геолого-геофизические и геомеханические аспекты, связанные с массивом в районе целиков между шахтными полями СКРУ-1 – СКРУ-2 и СКРУ-2 – СКРУ-3.

Косов В. Н. [37] отмечает, что основным источником информации о структуре массива горных пород всегда было керновое описание, получаемое в результате бурения разведочных скважин. Однако возникает проблема извлечения керна, так как процедура его выборки и извлечения на поверхность может привести к потере или искажению исходного геологического материала. Изучение геологического ствола скважины с использованием геофизических данных заключается в определении последовательности и глубины расположения слоев горных пород, их литолого-петрографических и коллекторских свойств, наличия полезных ископаемых и оценке их наполнения нефтью, газом или водой. Геофизические исследования скважин (ГИС) позволяют определить количественные параметры, необходимые для оценки запасов нефти и газа, такие как эффективная мощность коллекторов, коэффициенты пористости  $K_p$  и коэффициенты насыщения нефтью  $K_n$  в продуктивных пластах и другие. В настоящее время ГИС являются неотъемлемой частью геологических, буровых и эксплуатационных работ при разведке и разработке нефтегазовых месторождений.

Активно используются геофизические методы исследования и при разработке твердых месторождений полезных ископаемых. Показательными

являются геофизические исследования, выполняемые Институтом горного дела Уральского отделения Российской академии наук (ИГД УрО РАН). Были выполнены исследования структурно-геомеханического состояния призабойного массива в угольной шахте с целью определения условий миграции подземных вод. Для определения структурно-тектонического строения массива горных пород и выявления наиболее обводненных зон на площадке изысканий проводились исследования методом спектрального сейсмопрофилирования. Аппаратурно-методический комплекс позволяет выявлять зоны тектонических нарушений, а также зоны повышенной трещиноватости [47].

Также специалисты ИГД УрО РАН [46] используют геофизические методы для картирования зон структурных нарушений на карьерах и в подземных горных выработках, выбора мест расположения скважин водопонижения и водоснабжения, выявления поверхностей сдвижения на подработанных горными работами и закарстованных территориях, обследования закрепного пространства стволов, определения мощности образовавшейся «пробки» из горной массы и металлоконструкций в стволе шахты, исследования подработанных территорий. Серьезные результаты имеются для прогнозирования развития деформационных процессов на Джетыгаринском карьере в Республике Казахстан. Применяемый метод является оптимальным с точки зрения изучения массива прибортовых данных благодаря высокой мобильности в процессе осуществления измерений и информативности получаемых результатов. Получение информации о распространении нарушенного участка как по площади, так и в глубину позволяет предположить о возможном формировании деформационного участка в ближайшем будущем. Это, в свою очередь, дает возможность принять меры для предотвращения аварийных ситуаций или минимизации последствий деформации уступов или борта в целом. Зная площадь распространения нарушенного массива, можно с высокой степенью уверенности оценить охват количества уступов, подверженных деформации, и своевременно изменить схему движения транспорта, перенести коммуникации и осуществить другие необходимые меры.

Широко известен также опыт использования геофизических методов для прогноза и предотвращения горных ударов на железорудных месторождениях Сибири и Кольского полуострова (Еременко А. А. [18], Козырев А. А. [29] и др.). Кроме того, специалисты Кемеровского технического университета используют геофизические методы для контроля и прогнозирования опасных деформационных процессов на карьерах и отвалах (Бахаева С. П. [9, 54]). Однако в их трудах также отсутствует переход от геофизических параметров массива к геомеханическим.

Как уже отмечалось, наибольшую информацию о массиве несёт анализ данных бурения скважин. При этом, благодаря геофизическим исследованиям разрез скважины можно представить комплексом физическим характеристик, в зависимости от того, какой комплекс применён. Наиболее распространённые комплексы ГИС при разработке месторождений полезных ископаемых включают в себя электрические методы, радиоактивные (гамма-каротаж, гамма-гамма-каротаж, нейтрон-гамма каротаж), акустические (акустический каротаж), кавернометрию.

Косов В. Н. [37] также отмечает, что акустический каротаж (АК) представляет большой интерес. Он основан на изучении характеристик упругих волн ультразвукового и звукового диапазона в горных породах. В процессе АК в скважине возбуждаются упругие колебания, которые распространяются в ней и в окружающих породах, а затем воспринимаются приемниками, размещенными в той же скважине. Скорость распространения упругих волн в горных породах является важным показателем и зависит от их минералогического состава, пористости и формы порового пространства. Поэтому результаты акустического каротажа позволяют делать выводы о литологических и петрофизических свойствах пород. АК позволяет получить информацию о таких параметрах, как скорость поперечных и продольных волн, коэффициент поглощения звука, плотность породы и её проницаемость для жидкости или газа. Эти данные необходимы для определения геологического строения и предварительной оценки нефтегазоносности и перспективы промышленной эксплуатации месторождения. АК широко используется в геофизических исследованиях в нефтегазовой

промышленности, а также в горном деле и инженерии. Он помогает оценить качество и свойства горных пород, а также их устойчивость и продуктивность. Кроме того, результаты АК могут использоваться при планировании и контроле бурения скважин, определении зон разрушения и опасных зон, а также в процессе гидрогеологических и инженерно-геологических исследований. Таким образом, акустический каротаж является незаменимым инструментом для изучения горных пород и получения информации о их свойствах, что способствует успешному проведению различных геологических и инженерных работ.

Широкое применение нашли геофизические методы исследования, в первую очередь, при получении информации о горных породах при разработке месторождений углеводородного сырья. Сегодня в нефтяной и газовой промышленности проектирование, контроль и анализ разработки месторождений повсеместно осуществляется не только по данным гидродинамических исследований и сейсмике 3D, но и по данным геофизических исследований в скважинах. Широко распространен метод оценки динамического модуля упругости и коэффициента Пуассона по скорости продольной волны. В последующем, имея корреляционную связь между статическими и динамическими геомеханическими параметрами, легко найти значения упругих и прочностных характеристик массива горных пород. На этой основе строится геолого-геомеханическая модель продуктивного объекта, которая широко используется для решения задач оптимизации разработки месторождения, проектирования ГРП, оптимизации заводнения и других проблем [28, 1]. Данный подход практически не используется при решении задач геомеханики при разработке месторождений твердых полезных ископаемых. В связи с этим, данная работа посвящена внедрению именно таких подходов в практику создания геолого-геомеханических моделей месторождений твердых полезных ископаемых.



## **1.4 Геомеханическая и технологическая характеристика в районе целиков между шахтными полями СКРУ-1–СКРУ-2 и СКРУ-2–СКРУ-3**

### **1.4.1 Физико-механические свойства и исходное напряженное состояние соляных пород**

Изучением физико-механических свойств пород ВКМКС занимаются в основном такие институты, как Горный институт Уральского отделения Российской академии наук (ГИ УрО РАН), ФГАОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет» (ПНИПУ), АО «ВНИИ Галургии» и др. Наколенный опыт обработки результатов испытаний говорит о высокой вариативности механических свойств, что обусловлено значительной изменчивостью состава и строения пород. Кроме этого, к основным факторам, влияющим на физико-механические свойства пород следует отнести структурные особенности, наличие глинистых прослоек, влажность, условия залегания, скорость нагружения, контактные условия, масштабный фактор.

Согласно исследованиям Баряха А. А. и др. [8] прочность сильвинитовых пород продуктивных пластов изменяется в значительном диапазоне от 10 до 36 МПа, среднее значение для пласта Кр-II составляет 26 МПа, а для пласта АБ – 23 МПа. Средний коэффициент вариации превышает 30 %, что указывает на значительное разнообразие в прочности данных пород. Физико-механические свойства межпластовой каменной соли, как правило, близки к свойствам сильвинитовых пород. Например, средний предел прочности для каменной соли межпластий на одноосное сжатие составляет 25,8 МПа, и среднее значение разрушающей деформации составляет 4 %, что соответствует аналогичным показателям для красного сильвинита. Проведенные исследования показывают, что более высокие значения механических свойств соли межпластий по сравнению с покровной и подстилающей каменной солью связаны с преобладанием в них высокопрочных разностей темного перистого галита.

В рамках тех же исследований [8] была получена информация о механических свойствах различных типов горных пород, таких как каменная соль,

сильвиниты и карналлиты. Среднее значение предельной разрушающей деформации для каменной соли и сильвинитов варьируется от 3,7 % до 4,9 %, что говорит о том, что эти материалы обладают сопоставимой прочностью, в то время как карналлиты имеют более низкую предельную деформацию на уровне около 2,0 %. Значение модуля упругости изменяется в более чем 30 раз (от 1 до 38 ГПа), что свидетельствует о значительных различиях в упругих свойствах этих пород. Средние значения модуля упругости для сильвинитов и каменной соли составляют 13,8 ГПа, что также указывает на сходство их упругих свойств. Средняя величина модуля спада для сильвинитов (0,35 ГПа), каменной соли (0,43 ГПа) и карналлита (0,60 ГПа) показывает их различную способность к пластичному деформированию, причем коэффициент вариации данных показателей около 50 % указывает на значительную вариабельность этих материалов.

Такой разброс данных ещё раз свидетельствует о том, что при проектировании параметров системы разработки, а также при проверке условия безопасной подработки водозащитной толщи необходимо учитывать физико-механические свойства пород конкретного участка проведения горных работ.

Несмотря на это, существуют утверждённые усреднённые физико-механические свойства пород, принятые в действующих нормативных документах и используемые для математических расчётов (таблица 1.1-1.2).

Таблица 1.1 – Физико-механические свойства горных пород ВКМКС [69]

Порода	E, МПа	$\nu$	$\gamma$ , МН/м <sup>3</sup>
Мергели	600	0,3	0,022
Каменная соль	1500	0,3	0,022
Карналлит	500	0,4	0,020
Сильвинит	800	0,2	0,021

Таблица 1.2 – Стандартная прочность горных пород ВКМКС [69]

Наименование породы	Стандартная прочность, тс/м <sup>2</sup>
Каменная соль пластов В, А'Б, КрII, КрIII, а также пластов В-Г, Б-В, А'-КрI, КрI-КрII и КрII-КрIII	2150
Сильвинит пластов КрIIIи КрIII	2300
Сильвинит пластов В. АБ и КрI	1900
Карналлит пластов В и Б	1150

Основной причиной исследования реологических свойств соляных пород является то, что полученные результаты могут быть использованы для обоснования нормативных значений допустимой степени нагружения междукамерных целиков при различных параметрах системы разработки на ВКМКС. Так, анализ полученных результатов позволил определить величину длительной прочности: каменная соль – 0,60-0,65, сильвинит – 0,35-0,40, карналлит – 0,20-0,25 [8].

Из проведенных исследований, описанных в работах Баряха А. А. и др. [8] и сотрудников ГИ УрО РАН [2], были получены результаты, связанные с измерением напряжений в ненарушенном массиве и коэффициентом бокового распора. Согласно работе Баряха А. А. и др. [8], натурные исследования напряжений методами гидроразрыва, электрометрии и измерениями на большой базе показали, что начальное поле напряжений на ВКМКС близко к гидростатическому состоянию, то есть распределение напряжений близко к равномерному во всех направлениях. В результате испытаний, проведенных сотрудниками ГИ УрО РАН [1] с использованием акустоэмиссионного эффекта памяти горных пород, было установлено, что среднее значение коэффициента бокового распора составляет 0,71. Этот результат согласуется с результатами, полученными методом щелевой разгрузки. Таким образом, результаты этих исследований указывают на то, что в ненарушенном массиве начальное поле напряжений близко к гидростатическому и подтверждают согласованность значений коэффициента бокового распора, полученных разными методами.

В последующем в геомеханическом моделировании было принято гидростатическое распределение напряжений в калийных пластах.

### 1.4.2 Геологическая, геомеханическая и технологическая характеристики целиков между шахтными полями СКРУ-1 – СКРУ-2 и СКРУ-2 – СКРУ-3

Геологическое строение Соликамской впадины в районе междушахтных целиков СКРУ-1 – СКРУ-2 и СКРУ-2 – СКРУ-3 является характерным для всей территории ВКМКС. Основными толщами, входящими в разрез, являются: четвертичные отложения, пестроцветная толща, терригенно-карбонатная толща, соляно-мергельная, переходная пачка, покровная каменная соль, карналлитовая зона, сильвинитовая зона, подстилающая каменная соль. На рисунке 1.1 показано положение целиков между шахтными полями СКРУ-1 – СКРУ-2 и СКРУ-2 – СКРУ-3.

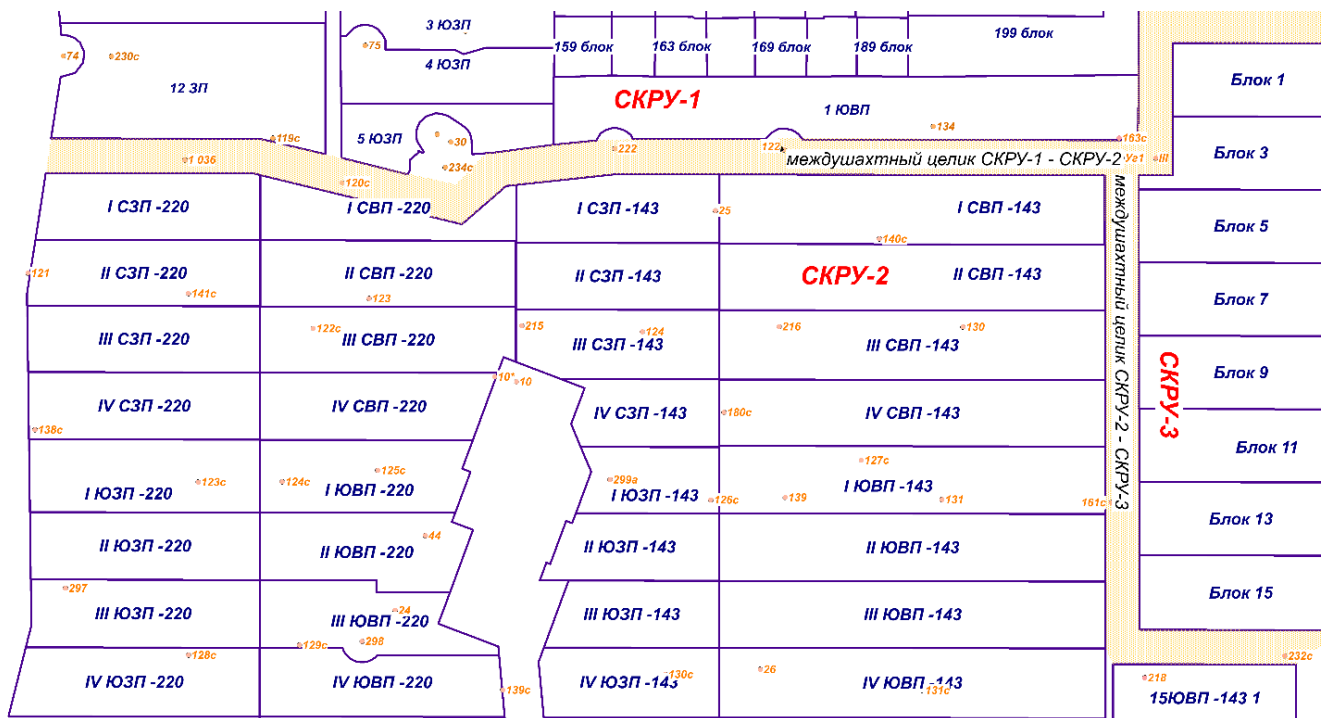


Рисунок 1.1 – Положение целиков между шахтными полями СКРУ-1 – СКРУ-2 и СКРУ-2 – СКРУ-3

Разрывные дислокации в соляном массиве, сформировавшиеся в геологическом прошлом, относятся к природным аномальным особенностям строения и состояния пород ВЗТ.

Согласно данным [38] «главными элементами разрывной тектоники ВКМКС являются три субмеридиональных региональных надвига – Усольский, Соликамский и Троицкий. В свою очередь, Соликамский надвиг пересекает шахтное поле СКРУ-1 и СКРУ-2» (рисунок 1.2).

Региональные надвиги рассматриваются авторами гипотезы (Джиноридзе Н. М., и др.) как сквозные системы разрывных дислокаций, которые развиты в подсолевом, солевом и надсолевом комплексах пород и имеют протяженность в несколько десятков километров. Они имеют восточное погружение, которое в интервале соляной толщи составляет  $2-10^\circ$  [38].

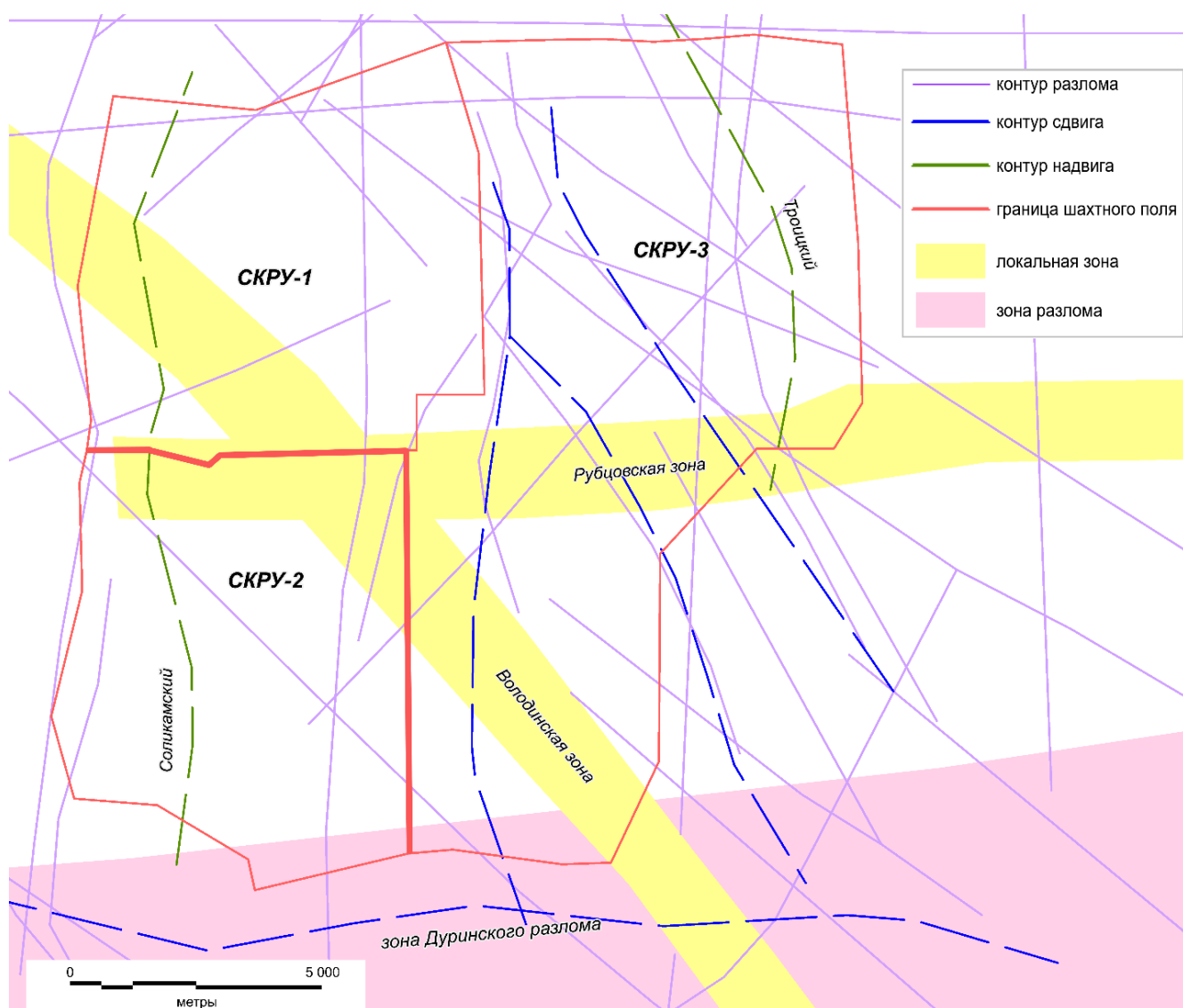


Рисунок 1.2 – Положение основных геологических структур в пределах соликамской части калийной залежи ВКМКС по данным [58]

Образование региональных надвигов авторы гипотезы [52] «связывают с тектоническим давлением со стороны Урала, а «...причиной возникновения тангенциального давления и надвигов в Предуральском краевом прогибе (включая ВКМКС) в раннемезозойскую эпоху явилось растяжение молодой континентальной коры Урала. В результате этого давления соляная толща была смята в линейные западно-вергентные складки (флексурные, флексурино-дробные, продольного изгиба) и формировались разрывные дислокации (надвиг, листрический сброс, сдвиг)».

Также, авторами [58] составлена сводная схема разломов (рисунок 1.2). Стоит отметить, что у каждого разлома имеется номер и характеристика. Схема даёт возможность оценить разломы и их влияние на геологическую структуру калийной залежи. Благодаря этому можно проводить дальнейшие исследования, а также планировать строительство и эксплуатацию калийных месторождений с учетом возможных геологических рисков.

Авторы [58] отмечают, что в рамках классификации крупных разрывных нарушений ВКМКС на шесть групп, разломы отличаются определенными характеристиками, такими как масштаб, степень проявления в геолого-геофизических полях и глубина заложения. К третьей группе относятся разломы Рубцовской и Володинской зон, которые территориально совмещены с междушахтными целиками СКРУ-1 – СКРУ-2 и СКРУ-2 – СКРУ-3.

На схеме разломов можно увидеть, что они имеют различные характеристики и направления, что указывает на сложное тектоническое строение данной зоны. Вероятно, они были образованы в разные исторические периоды и под воздействием различных геодинамических процессов. Детализация разломов обусловлена степенью изученности геофизическими методами. Изучение и понимание данных разломов имеет важное значение для прогнозирования возможных землетрясений и других геологических явлений в данном регионе. Также это позволяет более точно определить границы и структуру калийных залежей, что важно для разработки и освоения природных ресурсов. Протяжённость Рубцовской зоны составляет 24 км, а её ширина варьируется в

пределах 1,6-2,0 км. Территориально Рубцовская зона захватывает северную часть шахтного поля СКРУ-2, едва касаясь южной границы СКРУ-1, пересекает в широтном направлении площадь шахтного поля СКРУ-3 и уходит далее на восток вплоть до границы калийной залежи. Входящие в состав зоны разломы (№ 44, 65, 109, 134) были выделены различными методами исследования. В частности, «разломы № 44 и 65 затрагивают только отложения осадочного чехла, разлом № 109 расценивается как разлом кристаллического фундамента, а разлом № 134 – как долгоживущий разлом фундамента, постоянно обновляющийся с докембрия по настоящее время» [58]. Также, в районе междушахтных целиков проходит Володинская зона, которая пересекает Рубцовскую зону. Протяжённость Володинской зоны составляет 42 км, а её ширина варьируется в пределах 1,5-2,0 км. Входящие в состав зоны разломы № 16, 77, 129, 130 были выделены различными методами исследования. В частности, «разломы № 16 и 77 проявлены только в фундаменте, а разломы № 129 и № 130, выявленные по комплексу дистанционных и морфометрических методов, т.е. проявленные в верхних горизонтах осадочного чехла, характеризуются как палеозойские, обновившиеся в условиях альпийского тектогенеза» [58].

Из геомеханических и геодинамических факторов, влияющих на состояние междушахтных целиков СКРУ-1 – СКРУ-2 и СКРУ-2 – СКРУ-3, следует остановиться на развитии деформационных процессов земной поверхности и на землетрясении, произошедшем 5 января 1995 года и на событиях 2014-2018 гг. Данные геодинамические события весьма подробно представлены в соответствующей научно-технической литературе, поэтому представим их весьма кратко.

#### *События 1995 года*

5 января 1995 года в 12:46 многими сейсмическими станциями земного шара зафиксировано землетрясение с магнитудой  $M_s = 4,2$ . Согласно макросейсмическому обследованию Маловичко А. А., Маловичко Д. А., Кустова А. К. [42] «эпицентральная зона в плане совпадает с северо-восточным

краем шахтного поля СКРУ-2 ВКМКС. С землетрясением связаны массовые обрушения кровли рабочих пластов на глубинах 300-320 м на большом участке (600х600 м) отработанного шахтного поля (в пределах 1-2СВП)» [42].

Авторы [42] пишут: «Зона, оконтуриваемая 3-балльной изосейстой, вытянута примерно на 40 км в меридиональном направлении и 25 км в широтном и занимает площадь около 790 км<sup>2</sup>. В эпицентральной области (микрорайон «Совхоз» г. Соликамск и район садоводческого кооператива «Ключики») интенсивность сотрясений оценивается в 5-6 баллов. В годы, предшествовавшие землетрясению, на участке обрушения были отработаны два и частично третий продуктивные пласты. Суммарная вынутая мощность при двухпластовой выемке составила 10 м, при трехпластовой – 16 м. Одновременно с землетрясением произошло оседание земной поверхности на 4,5 м и образование мульды размером 650х850 м, в краевой части которой на поверхности образовались открытые трещины». В последующем оседания земной поверхности захватили в плане южную границу целика СКРУ-1 – СКРУ-2 (рисунок 1.3).

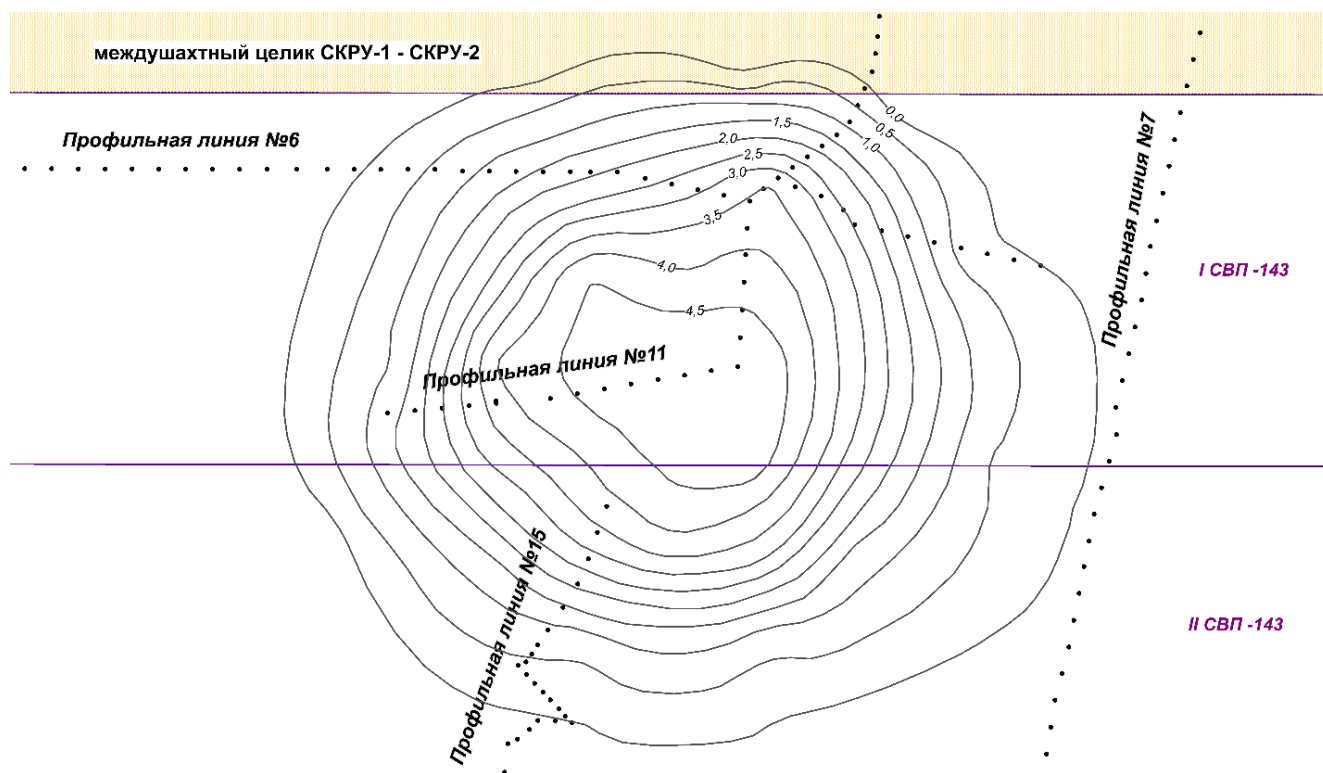


Рисунок 1.3 – Карта зоны массовых обрушений на руднике СКРУ-2



В заключении специально созданной правительственной комиссии отмечалось [42], что явление имеет «сложную геомеханическую и геотектоническую природу» и вызвано «...сильным, глубинным землетрясением техногенного характера с гипоцентром на глубине около 3 км».

Также, в источнике [42] поясняется, что «данный участок до аварии был разбурен с земной поверхности пятью скважинами, четыре из которых – глубокие 122, 130, 134, 216, вскрывающие подстилающую каменную соль, и одна структурная скважина 140с, вскрывает верхи соляного комплекса пород. Скважина 216 расположена на склоне Поповского поднятия по кровле соляного комплекса пород, над которым наблюдается понижение рельефа и уменьшение мощности терригенно-карбонатной толщи (ТКТ). В районе аварии по пласту В наблюдается смена состава пород от сильвинитового на севере (шахтное поле СКРУ-1) к карналлитовому на 1СВП (1 северно-восточная панель) и снова к сильвинитовому на 2СВП (2 северно-восточная панель). Подобная смена состава пород на ВКМКС характеризуется наличием переходных зон, которые отличаются повышенной газоносностью и пониженной прочностью пород во всей толще калийно-магниевых солей. Аварийный участок расположен на северном продолжении крупной зоны замещения, находящейся в районе скважины 130. К северу от зоны замещения в горных выработках на 2СВП в процессе визуальных наблюдений фиксировали открытые трещины, свидетельствовавшие о действии растягивающих напряжений. При вскрытии скважинами соляных пород установили в его кровле залегание бесструктурных вязких глинистых пород, представляющих собой образования гипсово-глинистой «шляпы», формирующейся на соляном зеркале в надсоляных породных отложениях. Видимо, 20-метровая толща глин и «спасла» СКРУ-2 от затопления».

Последствия массового обрушения пластов в 1995 году проявились в образовании провалов в 2014 и 2018 годах и до сих пор имеют отголоски в настоящем. Не исключено, что такого рода разрушения могут повториться, о чем свидетельствуют исследования сотрудников ГИ УрО РАН, которые прогнозируют появление новых провалов в 400-450 м к северо-западу от существующих

провалов. Об этом свидетельствует совокупность негативных параметров. Однако также можно считать, что провал 2018 года не является ослабляющим фактором для оценки безопасного и устойчивого состояния междушахтного целика, т.к. он сформировался на значительном удалении от междушахтного целика СКРУ-1 – СКРУ-2 (порядка 800 м).

#### *Наличие сбойки через междушахтный целик СКРУ-1 – СКРУ-2*

В начале 1970-х годов с целью скорейшего ввода в эксплуатацию Южного участка со стороны СКРУ-1 на него пройдена сбойка по пласту КрII (вдоль границы между 1СЗП и 1СВП (гор. –143 м), по ней на СКРУ-2 прошли калийные комбайны. Еще в Советское время эта сбойка была перекрыта тремя бетонными перемычками шириной 20 м и заложена гидрозакладкой. Вдоль сбойки на земной поверхности проходит профильная линия №1, наблюдения на которой ведутся с 1977 года.

#### *Параметры системы разработки и текущее положение горных работ*

Отработка промышленных пластов на территории СКРУ-2 вблизи междушахтных целиков происходила в период с 1974 по 2007 гг. Отставание закладочных работ составляет в среднем около 10 лет, а на юго-восточных панелях (гор. –143 м) – может достигать 20 лет и более.

Порядок ведения очистных работ, в большинстве случаев, восходящий, т.е. вначале проведена отработка по нижнему пласту КрII, а потом по верхним – по пласту АБ и Вс. Такой порядок отработки, как правило, приводит к неблагоприятной горнотехнической обстановке. Также, наблюдается значительное отставание во времени и пространстве закладочных работ. Кроме этого, в связи с провалами 2014 и 2018 года в проведении закладочных работ был перерыв. Присутствуют единичные случаи, когда проводилась дозакладка очистных камер в 2019-2020 гг.

На сегодняшний момент очистные и закладочные работы со стороны СКРУ-1 выполнены полностью. Горные работы на СКРУ-2 сконцентрированы лишь в юго-восточной части (15ЮВП гор. –143 м). Со стороны СКРУ-3 проведены очистные работы в 11, 13, 15 блоках 15 панели.

### **1.4.3 Опыт использования геофизических методов для решения проблем сохранности ВЗТ при разработке ВКМКС**

В настоящее время на территории ВКМКС постоянно проводятся геофизические методы исследования. На земной поверхности полевые сейсморазведочные работы выполняются методом общей глубинной точки (МОГТ) сотрудниками ГИ УрО РАН под руководством Санфирова И. А [1, 43, 61, 98]. На поверхности формируется сеть мониторинговых профилей, равномерно покрывающих участки шахтных полей, находящихся в разработке или планируемых в ближайшее время к отработке. Целью данных работ является изучение строения и состояния соляной и надсоляной толщ и степени возможного влияния особенностей геологического строения разреза на безопасность отработки.

В качестве результата работ строятся структурные, скоростные, амплитудные разрезы и интерпретационные схемы, отражающие строение надсоляной и соляной толщ. Выявляются зоны, отличающиеся по упругим свойствам (по мнению специалистов ГИ УрО РАН) от основного массива пород. На основании полученных данных формулируются предположения о природе возникновения выделенных зон [1, 43, 61, 98].

В целом, результаты полевых сейсморазведочных работ носят качественный характер и не могут быть использованы при моделировании и прогнозе деформационных процессов в районе междушахтных целиков. Это обусловлено тем, что отсутствуют конкретные параметры перехода от геофизических характеристик массива пород к физико-механическим свойствам в породах ВЗТ. При этом, в качестве интерпретации указаны, по сути, причины генезисного характера, а не геомеханического или техногенного.

Шахтные сейсморазведочные работы показали хорошую достоверность результатов и нашли в наши дни широкое применение в области моделирования деформационных процессов [64, 74]. Целью проводимых геофизических исследований является получение полевых сейсморазведочных материалов способом поперечных волн с разделением отражения (ПВРО) для дальнейшего

определения формы залегания пород ВЗТ и их динамических характеристик. Способ основан на МОВ МОГТ.

Основными отражающими границами, по которым производится привязка шахтных сейсморазведочных данных способом ПВРО, являются: соляное зеркало или кровля покровной каменной соли (кПКС), кровля карналлитовой пачки (кКП), пласт маркирующих глин (МГ) и кровля нижней пачки подстилающей каменной соли (кНППдКС).

В последние годы развивается метод построения геолого-геомеханической модели массива пород ВЗТ, разработанный специалистами ПНИПУ под руководством проф. Кашникова Ю.А. [27, 62, 99]. Суть метода заключается в получении на соответствующем оборудовании корреляционных зависимостей между статическими и динамическими геомеханическими параметрами, корректировании полученных зависимостей по результатам геофизических исследований скважин, получении на основании обработки данных сейсмики 2D и 3D распределения скорости продольной волны и акустического импеданса и, наконец, выделении в массиве ВЗТ и калийных пластах зон с различной степенью уплотнения. Фактически возникает возможность получить в любом слое (в любой точке) массива распределенные значения таких геомеханических параметров, как прочность на одноосное сжатие, модуль упругости, коэффициент Пуассона и ряд других. Последующее решение задачи геомеханического моделирования напряженно-деформированного состояния ВЗТ предполагает использование уже конкретных значений физико-механических свойств пород, слагающих ВЗТ.

Предложенный в данной работе комплексный подход является одним из ветвей предложенного специалистами ПНИПУ метода и основан на использовании данных каротажа солеразведочных скважин. На основе обработки данных геофизических исследований скважин также строится геолого-геомеханическая модель массива пород ВЗТ и последующее решение задачи геомеханического моделирования напряженно-деформированного состояния ВЗТ предполагает использование уже конкретных значений физико-механических свойств пород, слагающих ВЗТ.

Таким образом, комплексное использование геофизических и геомеханических методов обеспечивает получение дополнительной информации об особенностях строения массива горных пород и распределении их геомеханических свойств, что позволяет решать задачу расчета НДС массива пород ВЗТ с использованием их реальных значений.

### **1.5 Цели и задачи исследования**

Проведенный анализ совместного использования геомеханических и геофизических методов для расчета параметров НДС массива соляных пород применительно к целикам между шахтными полями СКРУ-1 – СКРУ-2 и СКРУ-2 – СКРУ-3 позволяет выделить следующие цели и задачи исследований.

**Целью работы** является анализ и прогноз напряженно-деформированного состояния массива горных пород и оседаний земной поверхности в районе междушахтных целиков СКРУ-1 – СКРУ-2 и СКРУ-2 – СКРУ-3 ПАО «Уралкалий» с использованием комплекса натуральных исследований, под которыми понимается совокупность геологических, геомеханических и геофизических исследований и маркшейдерских наблюдений.

**Идея работы** состоит в использовании для расчета напряженно-деформированного состояния массива горных пород комплекса натуральных исследований, в основе которых лежат зависимости между статическими и динамическими геомеханическими параметрами соляных пород, результаты обработки геолого-геофизических параметров солеразведочных скважин и результаты маркшейдерских наблюдений за оседаниями земной поверхности.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие **задачи исследований**:

1. Анализ существующих теоретических и практических основ создания геолого-геомеханических моделей.
2. Проведение испытаний образцов соляных пород, обработка результатов, получение статистических зависимостей между статическими и динамическими геомеханическими параметрами соляных пород.

3. Обработка результатов измерений оседаний земной поверхности в районе междушахтных целиков.

4. Обработка данных акустического каротажа солеразведочных скважин.

5. Создание геолого-геомеханической модели массива горных пород в районе междушахтных целиков.

6. Численное моделирование процессов оседаний земной поверхности в районе междушахтных целиков на основе геолого-геомеханической модели массива горных пород.

## **1.6 Выводы по Главе 1**

1. Общие принципы определения размеров междушахтных целиков основаны, преимущественно, на эмпирических подходах и опыте отработки запасов вблизи целиков и редко основаны на расчетах непосредственно напряженно-деформированного состояния целиков. Согласно действующим нормативным документам ширина целика на ВКМКС принимается не менее 200 м. Данная величина обоснована опытом разработки ВКМКС и основывается на таких параметрах как угол сдвиговых нарушений, предохранительная берма, возможная погрешность определения кровли водозащитной толщи. Научно-технические работы, основанные на геомеханическом анализе ширины междушахтных целиков на территории ВКМКС, практически отсутствуют.

2. Существующие математические модели соляных пород, используемые при расчете параметров НДС при отработке ВКМКС, в качестве параметрического обеспечения используют, чаще всего, либо результаты инструментальных наблюдений за сдвижением земной поверхности при расчете сдвижений земной поверхности, либо результаты натурных наблюдений за смещениями массива соляных пород вокруг выработок. При этом, отсутствует опыт совместного использования геомеханических и геофизических методов для параметрического обеспечения геомеханических расчетов.

3. Существующий опыт использования геофизических методов при обеспечении безопасной эксплуатации ВКМКС основан на проведении сейсмики

2D на земной поверхности и последующем выделении аномалий в строении ВЗТ. При этом отсутствуют переходные методы от геофизических к геомеханическим параметрам массива.

4. Значительный интерес для решения проблем сохранности ВЗТ при разработке ВКМКС с позиций использования геофизических методов представляет акустический картаж солеразведочных скважин. Совместно с поверхностными и шахтными сейсморазведочными работами данные методы в их комплексном использовании с геомеханическими подходами показали хорошую перспективу в области моделирования деформационных процессов.

5. Таким образом, на данный момент остается открытым вопрос создания геолого-геомеханических моделей месторождений твердых полезных ископаемых, основанных на комплексировании натуральных исследований, включающих геологические, геомеханические и геофизические исследования характеристик массива горных пород. Непосредственно для ВКМКС решение данной задачи позволит улучшить вопрос безопасной разработки месторождения, а также повысить эффективность проведения горных работ. При этом, актуальным является непосредственный учёт фактических физико-механических свойств массива горных пород, чтобы получить наиболее адекватное распределение деформационных процессов в массиве горных пород и на земной поверхности.

## **ГЛАВА 2 РАЗВИТИЕ ДЕФОРМАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ ПО ДАННЫМ МАРКШЕЙДЕРСКО-ГЕОДЕЗИЧЕСКИХ НАБЛЮДЕНИЙ В РАЙОНЕ ЦЕЛИКОВ МЕЖДУ ШАХТНЫМИ ПОЛЯМИ СКРУ-1 – СКРУ-2 И СКРУ-2 – СКРУ-3**

### **2.1 Характеристика наблюдательной станции за сдвижением земной поверхности в районе междушахтных целиков СКРУ-1 – СКРУ-2 и СКРУ-2 – СКРУ-3**

Наблюдательная станция предназначена за наблюдениями за сдвигами и деформациями земной поверхности. Закладка профильных линий производится в соответствии с «Инструкцией по наблюдению за сдвижением земной поверхности и за подработанными зданиями и сооружениями на калийных рудниках ПАО «Уралкалий» [25] и с учётом научных рекомендаций.

В районе междушахтных целиков со стороны СКРУ-2 основными задачами наблюдательной станции являются: выявление закономерностей процесса сдвига земной поверхности в различных горно-технических условиях для определения фактических деформаций земной поверхности и оценки эффективности реализованных горнотехнических мер охраны, а также принятия решения о необходимости их корректировки; а также, выявление связи закономерностей деформирования земной поверхности во времени и пространстве с закономерностями деформирования подрабатываемых объектов, зданий и сооружений, для своевременного принятия мер по обеспечению безопасной эксплуатации подрабатываемых объектов, зданий и сооружений.

Опорная маркшейдерская сеть наблюдательной станции представлена пунктами полигонометрии 1, 2 разряда, триангуляции 4 класса ГГС, а также опорными реперами, специально заложенными рядом с профильными линиями. Опорные пункты находятся вне зоны влияния горных работ, исходные реперы находятся относительно на небольшом расстоянии от рабочих реперов профильных линий.



Профильные линии представляют собой группы грунтовых реперов, закладываемых на земной поверхности. Для наблюдений за зданиями (сооружениями) используются стенные реперы.

Опорные реперы закладываются за зоной влияния горных работ по три репера с каждой стороны профильной линии в вершинах равностороннего треугольника со стороной 50 м (опорный треугольник) или в створе профильной линии на расстоянии 45-60 м между ними. В виде исключения допускается закладка опорных реперов (в количестве не менее трёх) на одном конце профильной линии, если по условиям рельефа, заболоченности или водных препятствий на местности невозможно заложить опорные реперы с обеих сторон.

Рабочие реперы расположены в зоне влияния горных работ и служат для определения показателей сдвижения земной поверхности в зависимости от положения и интенсивности горных работ.

Грунтовыми реперами служат обрезки рельс (на ранее заложенных профильных линиях), металлические штыри диаметром не менее 20-25 мм, длиной не менее 2 м – забивные или с бетонными якорями, заложенные на глубину ниже промерзания грунта. Для данной территории глубина промерзания составляет 1,75 м. Центры грунтовых реперов в лесных массивах расположены до 0,2 м выше земной поверхности, на полях и застроенной местности, как правило, углублены до 0,4 м. В верхней части репера, на глубину 3 мм высверливается отверстие диаметром 2 мм.

Стенной репер для проведения наблюдений посредством геодезических инструментов (нивелиров, теодолитов, тахеометров) представляет собой знак, жёстко укреплённый на конструкции здания (сооружения), обеспечивающий однозначность установки на него нивелирной рейки.

При выполнении наблюдательных работ на ВКМКС принято, что при скорости оседания до 20 мм/год следует производить не менее одного наблюдения в три года, при скорости оседания от 20 до 50 мм/год – не менее одного наблюдения в два года, при скорости оседания от 50 до 100 мм/год – не менее одного наблюдения в год, при скорости оседания от 100 до 200 мм/год – два раза в год, при

скорости оседания от 200 до 400 мм/год – не менее трёх наблюдений в год, при скорости оседаний от 400 до 800 мм/год – шесть раз в год, при скорости оседаний более 800 мм/год – ежемесячно.

По разным профильным линиям проводится как сокращённая, так и полная серия инструментальных наблюдений. Полная серия наблюдений включает в себя определение вертикальных и горизонтальных смещений реперов профильных линий, сокращённая – только вертикальных смещений.

Геометрическое нивелирование проводят исправными и поверенными высокоточными электронными нивелирами со средней квадратической ошибкой измерения превышения на 1 км двойного хода не более 1 мм и инварными штрих-кодowymi не складными трёхметровыми рейками.

Измерение длин линий между реперами осуществляется с использованием тахеометра по трёхштативной системе или металлической рулеткой в комплексе с «жёсткими отвесами». Измерения длин линий выполняются с точностью не более 1 : 10 000.

## **2.2 Результаты инструментальных наблюдений по линии нефтепровода**

Наблюдательная станция за высотными смещениями высотными смещениями земной поверхности на участке ПК77+50 до ПК238 нефтепровода «Логовское – НГСП Чашкино» представлена тремя профильными линиями реперов, проложенными параллельно продольной оси подрабатываемого нефтепровода. Профильная линия № 3 проходит в районе междушахтного целика СКРУ-2 – СКРУ-3 (рисунок 2.1).

Профильная линия № 3 заложена в 2011 г. на участке нефтепровода от ПК127+50 до ПК238, попадающего с 2003 г. в зону влияния горных работ СКРУ-2 и СКРУ-3. Линия на наблюдаемом участке закреплена 443 реперами забивного типа из круглого проката диаметром 25 мм, длиной 2 м. Интервал закладки 25 м. Южная часть профильной линии от ПК238 уходит из зоны влияния подработки по рабочим реперам (№ 668, 674, 679, 684, 689, 695) Юрчукского полигона.

Линия представляет собой одиночный нивелирный ход, опирающийся северной частью на группу реперов №№ IV, V и VI, расположенную на барьерном целике под техническую границу шахты, а на юге на опорные реперы № 700, 701 и 702 Юрчукского и Чашкинского техногенных полигонов. Реперы № 84 и 506 совмещены с пунктами GPS-сети. В 2015 г. в районе нефтепровода наиболее близко находящегося к месту провала и имеющего удовлетворительные условия для выполнения спутниковых наблюдений планово-высотная геодинимическая сеть усилена пунктом № 507. Данный участок трассы нефтепровода по результатам мониторинга является наиболее активным с точки зрения протекания современных геодинимических процессов и в большей мере будет подвержен влиянию опасных деформаций в случае новых обрушений подработанного массива горных пород на СКРУ-2. Кроме того, проекции горизонтальных смещений пункта №507 на ось нефтепровода служат исходными данными при уравнивании линейных измерений и тем самым повышают надежность определения горизонтальных смещений реперов по оси нефтепровода.

На участке охраняемого нефтепровода № 3 (ПК128-ПК238) выделено четыре зоны сдвижения земной поверхности. Первая мульда оседаний протяженностью в 1 км, образовалась над шахтным полем СКРУ-3: над Блоком 1 и Блоком 3 пятнадцатой панели, отработанной по двум пластам АБ и КрII сильвинитового состава без закладки выработанного пространства в 2011 г. Вторая мульда оседаний (0,5 км) развивается в границах барьерного (предохранительного) целика между СКРУ-3 и СКРУ-2. Третья, большая по протяженности мульда оседаний (3 км), по интенсивности сдвижений условно поделенная на два участка, образовалась над шахтным полем СКРУ-2 в пределах девяти юго-восточных панелей, отрабатываемых с 2003 г. по двум пластам АБ и КрII сильвинитового состава и по пласту Вк+с.

Наличие горизонтальных смещений земной поверхности сантиметрового порядка на трассе нефтепровода, направленных в сторону провала, подтверждены GPS-наблюдениями на пункте № 507, расположенном над барьерным целиком в 1,36 км от провала и в 0,38 км от его проекции на ось нефтепровода, включенном в

процесс мониторинга в 2015 г. Плановое смещение указанного репера за период 2015-2020 гг. составляет 79 мм при смещении его по оси нефтепровода на 23 мм.

Величины оседаний над межшахтным барьерным целиком, превышающие надежность измерений (сопоставимы с оседаниями над очистными выработками), возможно, инициированы обрушением грунта, произошедшим 18.11.2014 над 2СВП второго рудника, в 1,3 км северо-западной от рассматриваемого участка нефтепровода. Отмечу, что на этом же отрезке профильной линии № 3 в период 2014-2015 гг. был зарегистрирован пик абсолютных величин горизонтальных смещений.

По сглаженным данным высотных наблюдений по профильной линии № 3 построена диаграмма суммарных вертикальных и горизонтальных смещений реперов, а также горизонтальных деформаций интервалов (рисунки 2.2-2.3). Можно видеть, что величины оседаний и горизонтальных сдвижений реперов весьма невелики и за все время наблюдений над целиком СКРУ-2 – СКРУ-3 не превышают 90 мм и 35 мм соответственно. Величины горизонтальных деформаций также не велики и не превышают 0,3 мм/м.

Столь незначительные величины сдвижений и деформаций земной поверхности объясняются практически отсутствием очистных работ на СКРУ-3 в этом районе. Блоки 5, 7, 9 еще не отрабатываются, по сути дела, профильная линия находится в краевой части мульды сдвижения. В связи с вышеизложенным, оснований для опасений за сохранность целика между СКРУ-2 и СКРУ-3 на данном участке шахтного поля ПАО «Уралкалий» не имеется.

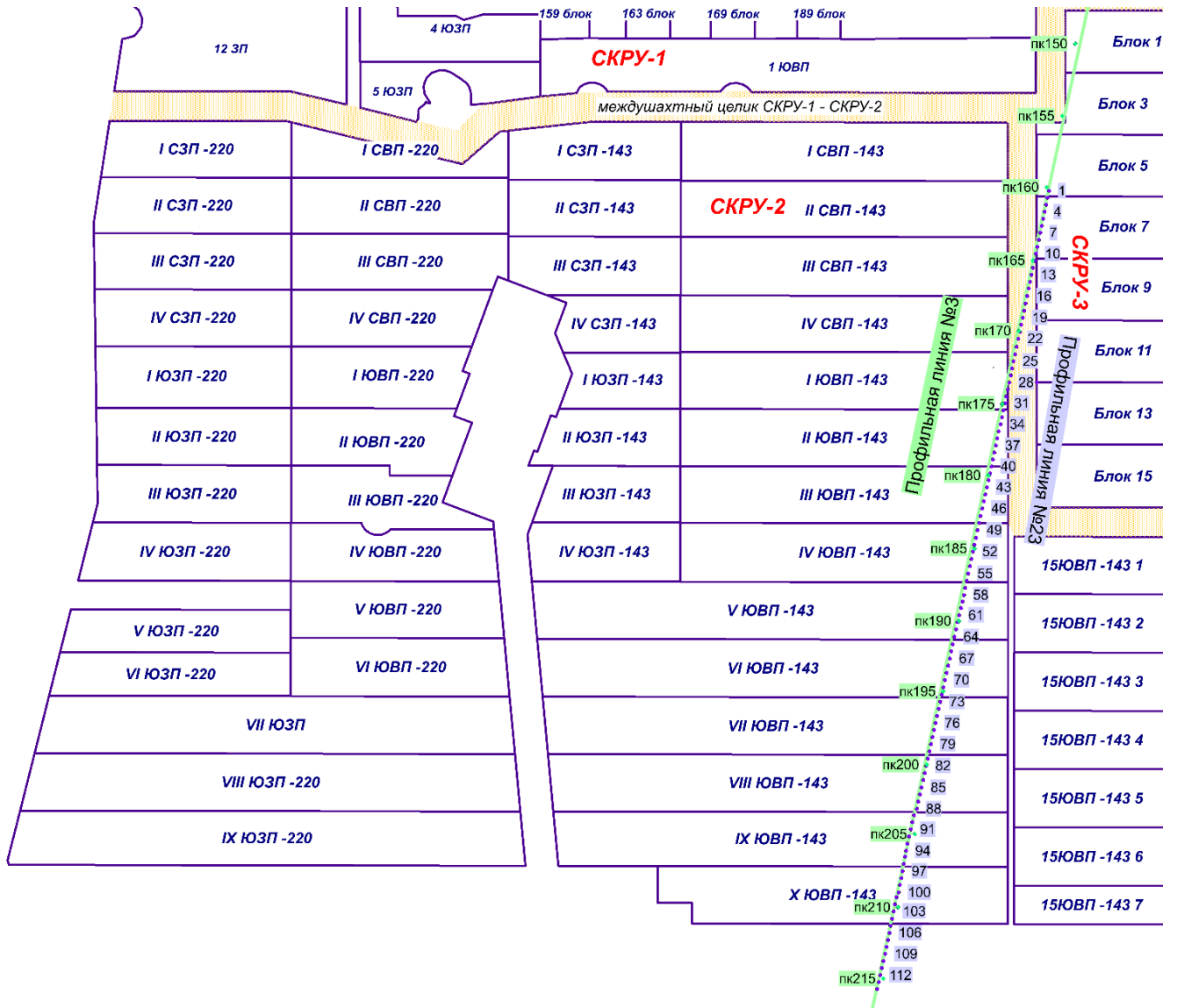


Рисунок 2.1 – Совмещенный план профильных линий № 3 (ПНИПУ) и № 23 (ПАО «Уралкалий») и шахтных полей с актуальным положением горных работ

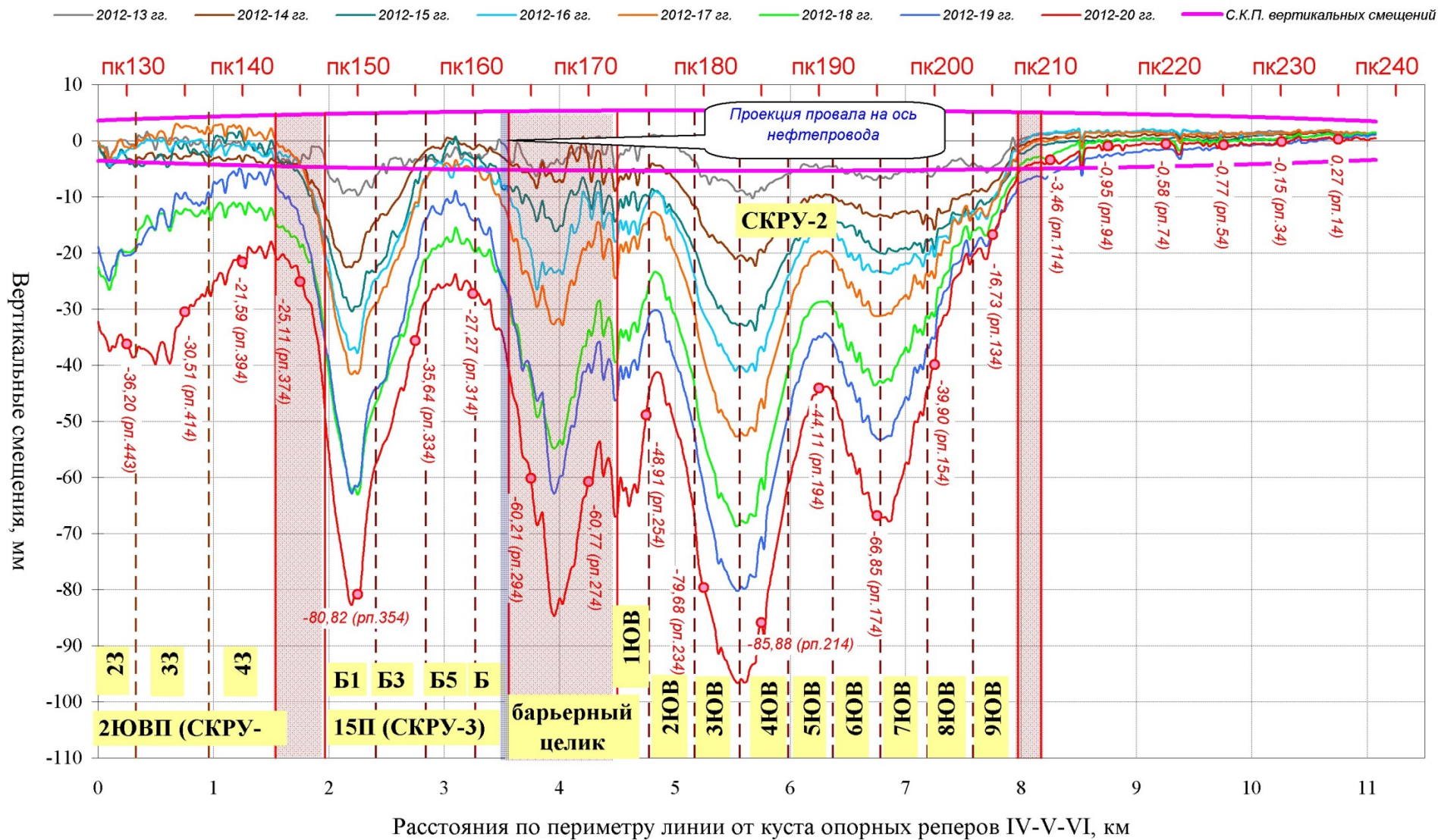


Рисунок 2.2 – Графики вертикальных смещений реперов по профильной линии № 3

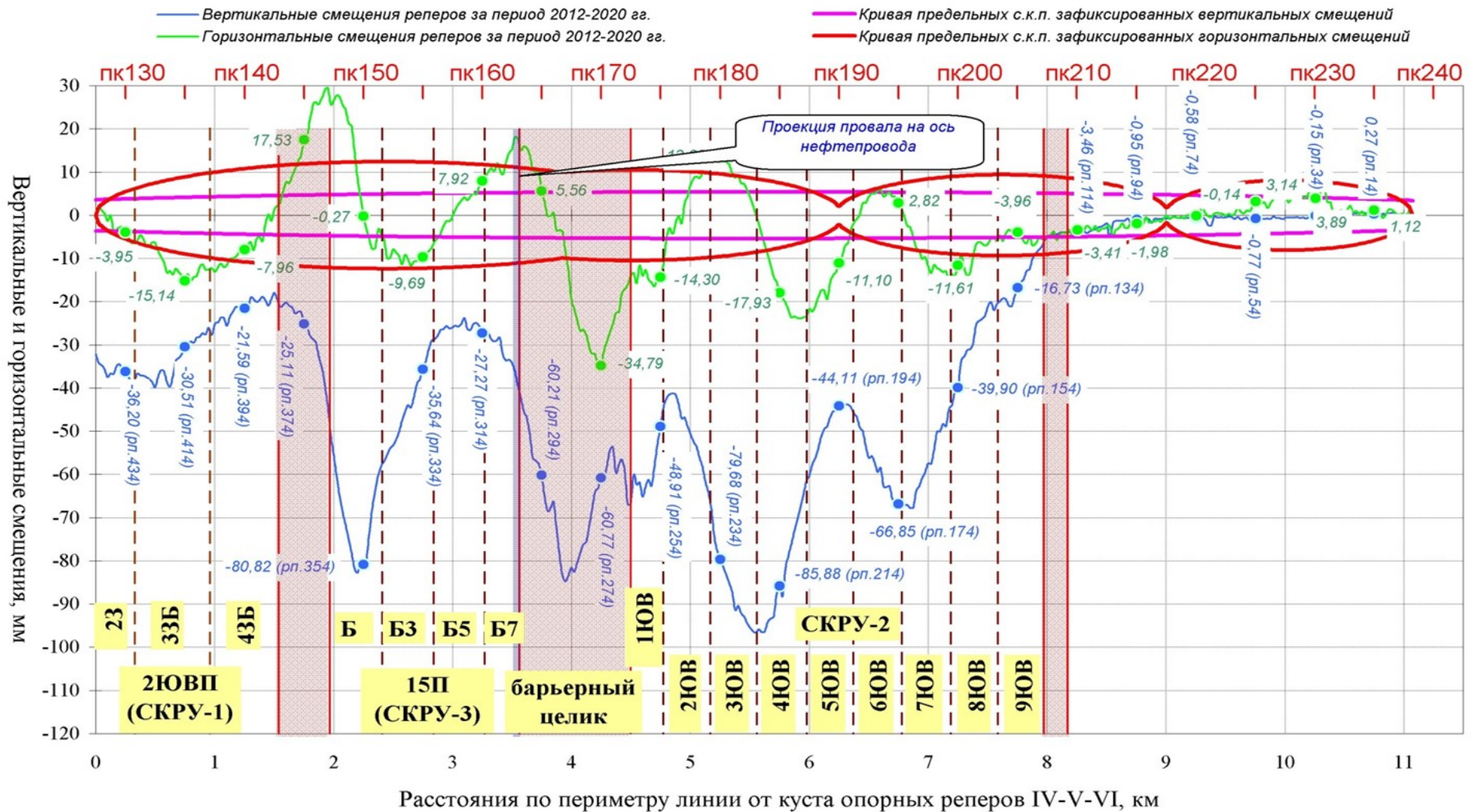


Рисунок 2.3 – Графики вертикальных и горизонтальных смещений реперов по линии № 3 наблюдательной станции участка нефтепровода «Логовское – НГСП Чашкино»

### 2.3 Результаты наблюдений по данным ПАО «Уралкалий»

На территории СКРУ-2 развёрнута достаточно обширная база по наблюдениям за оседаниями земной поверхности. Как правило, чем профильная линия старше, тем меньше реперов осталось в сохранности. Достаточно большое количество профильных линий было заложено в 2017 году на разных участках СКРУ-2. Положение профильных линий представлено на рисунке 2.4.

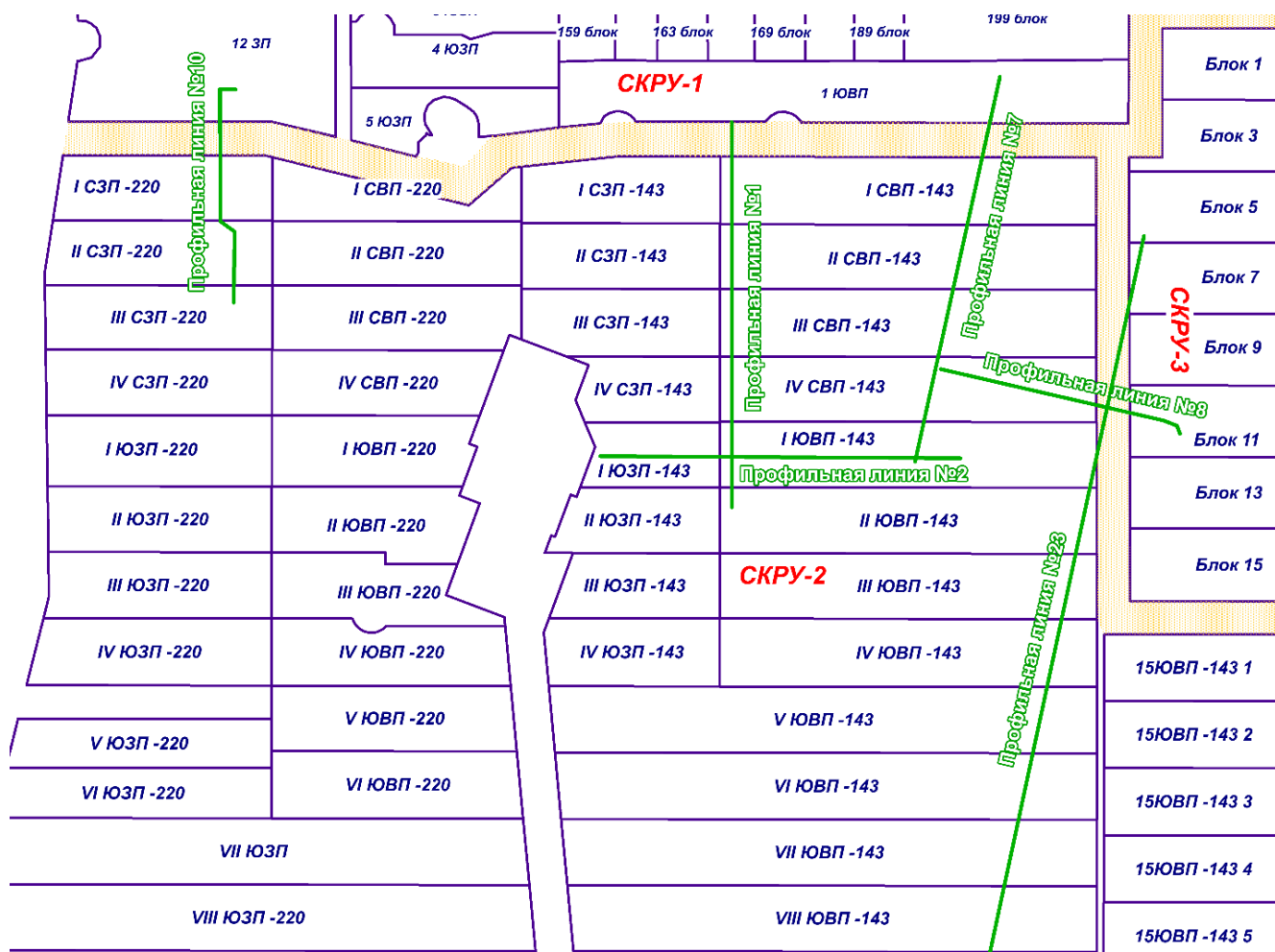


Рисунок 2.4 – Положение профильных линий в районе междушахтных целиков

Профильная линия № 23 (ПАО «Уралкалий») совпадает с положением профильной линии № 3 (ПНИПУ). Согласно данным наблюдений сотрудников ПНИПУ в районе междушахтного целика СКРУ-2 – СКРУ-3 в течение 8 лет (2012-2020 гг.) было зафиксировано оседание величиной около 85 мм. А согласно



наблюдениям ПАО «Уралкалий» в период с 2009-2020 гг. максимальные оседания в районе целика составили 82 мм. Можно отметить практически полное соответствие результатов измерений.

График оседаний по профильной линии № 23 представлен на рисунке 2.5. Совмещённые графики оседаний по профильной линии № 23 (ПАО «Уралкалий») и № 3 (ПНИПУ) представлены на рисунке 2.6.

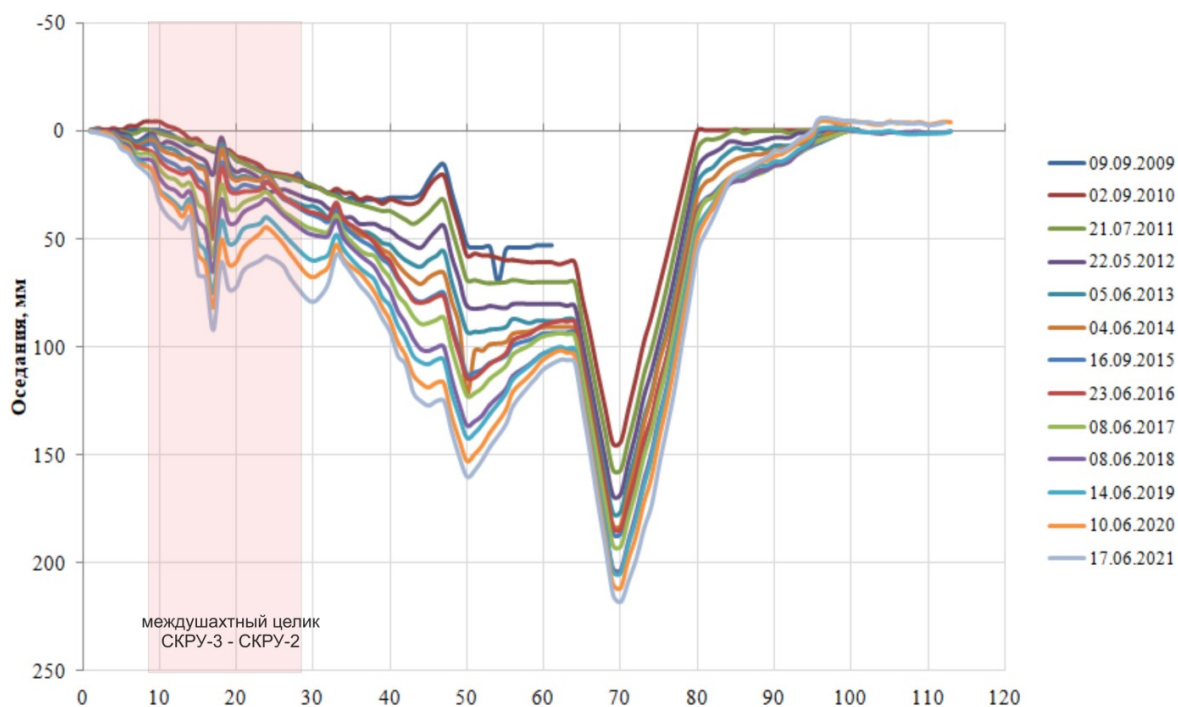


Рисунок 2.5 – Оседания по профильной линии №23 в период с 2009-2021 гг.

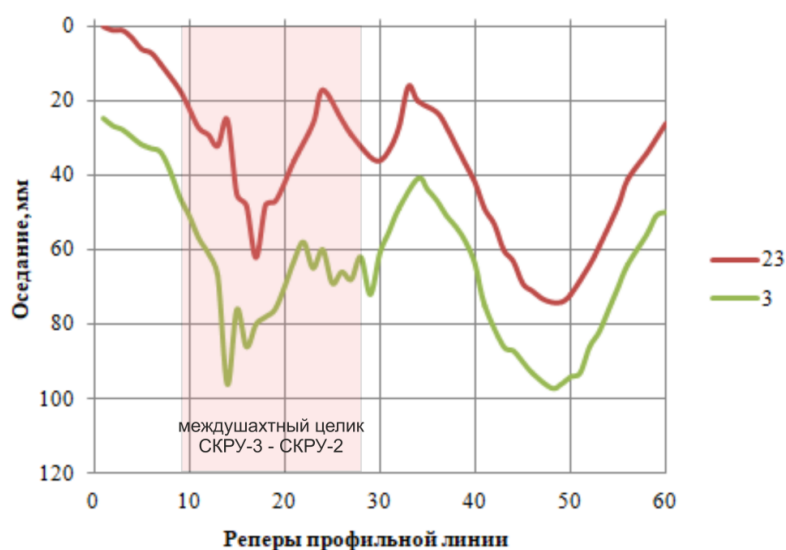


Рисунок 2.6 – Совмещённый график по профильным линиям № 23 (ПАО «Уралкалий») и № 3 (ПНИПУ) в период с 2012-2020 гг.

Можно увидеть, что совмещённые мульды имеют одинаковый характер оседаний, однако в среднем отличаются на 20 мм: по данным ПАО «Уралкалий» оседания меньше.

Многолетний опыт наблюдений показывает, что оседания земной поверхности непосредственно над барьерными, гидроизолирующими или междушахтными целиками уменьшаются по сравнению с теми же в районе выработанного пространства. По-видимому, оседания, образованные вследствие отработки участков на смежных шахтных полях (Блок 7 СКРУ-3 и 2ЮВП СКРУ-2), повлияли суммарно и, тем самым, привели к резкому увеличению оседания в центре междушахтного целика на 50-70 % относительно оседаний непосредственно на границе междушахтного целика.

Маркшейдерские наблюдения по стороны междушахтных целиков СКРУ-1 – СКРУ-2 и СКРУ-2 – СКРУ-3 были проведены по профильным линиям № 10, 1, 7, 8. Мульды оседаний по рассматриваемым профильным линиям представлены на рисунках 2.7-2.10.

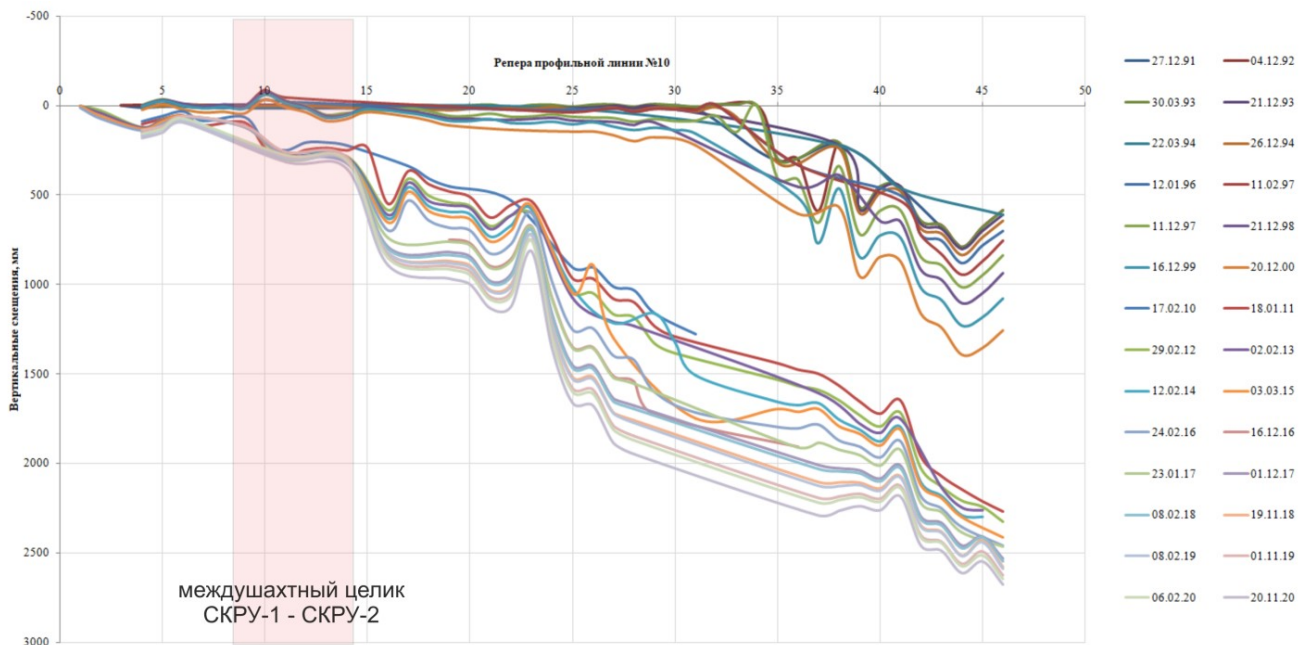


Рисунок 2.7 – Оседания по профильной линии № 10

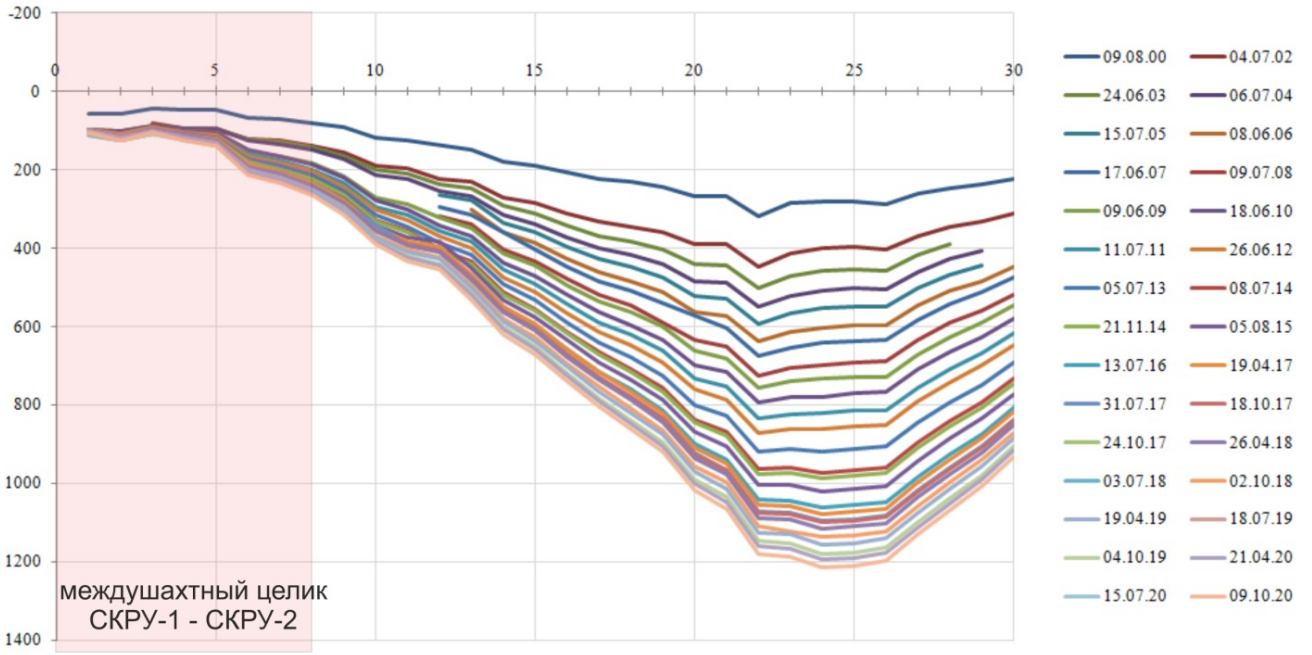


Рисунок 2.8 – Оседания по профильной линии № 1

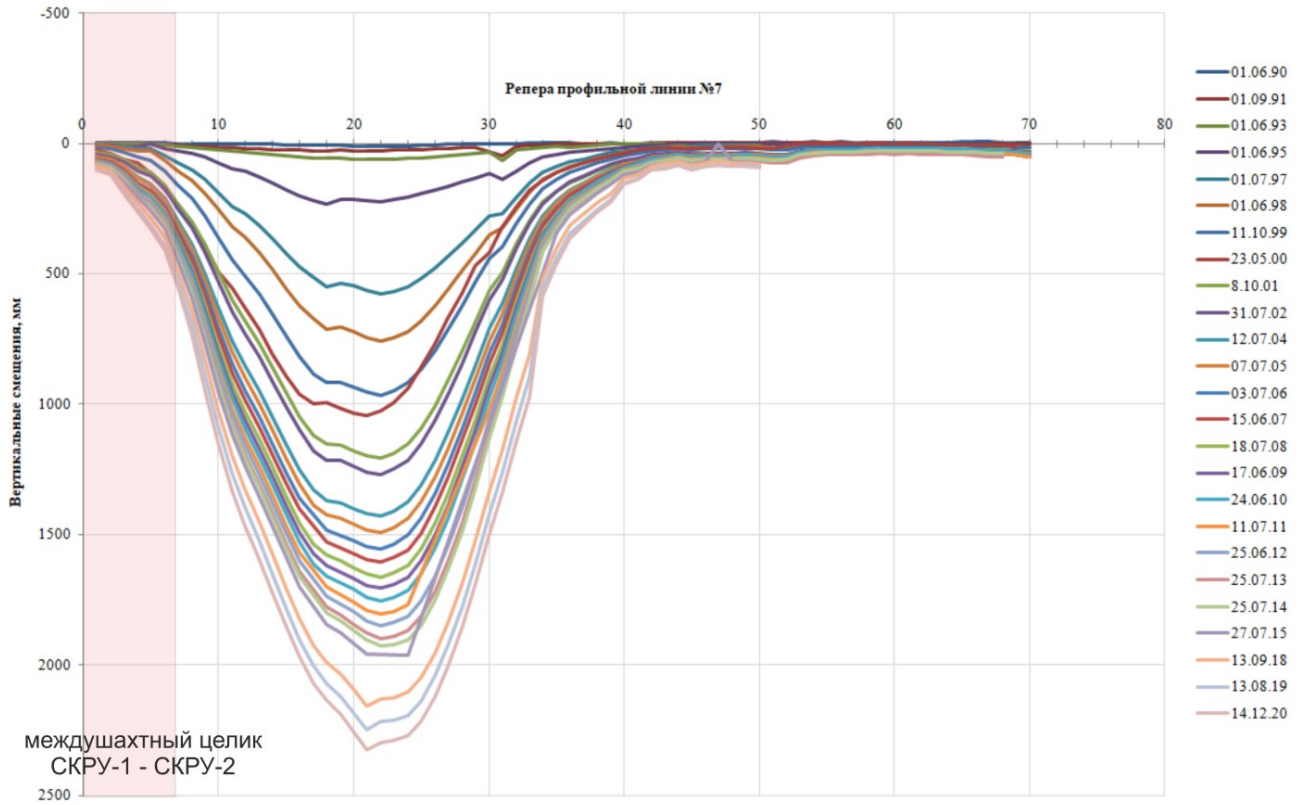


Рисунок 2.9 – Оседания по профильной линии № 7

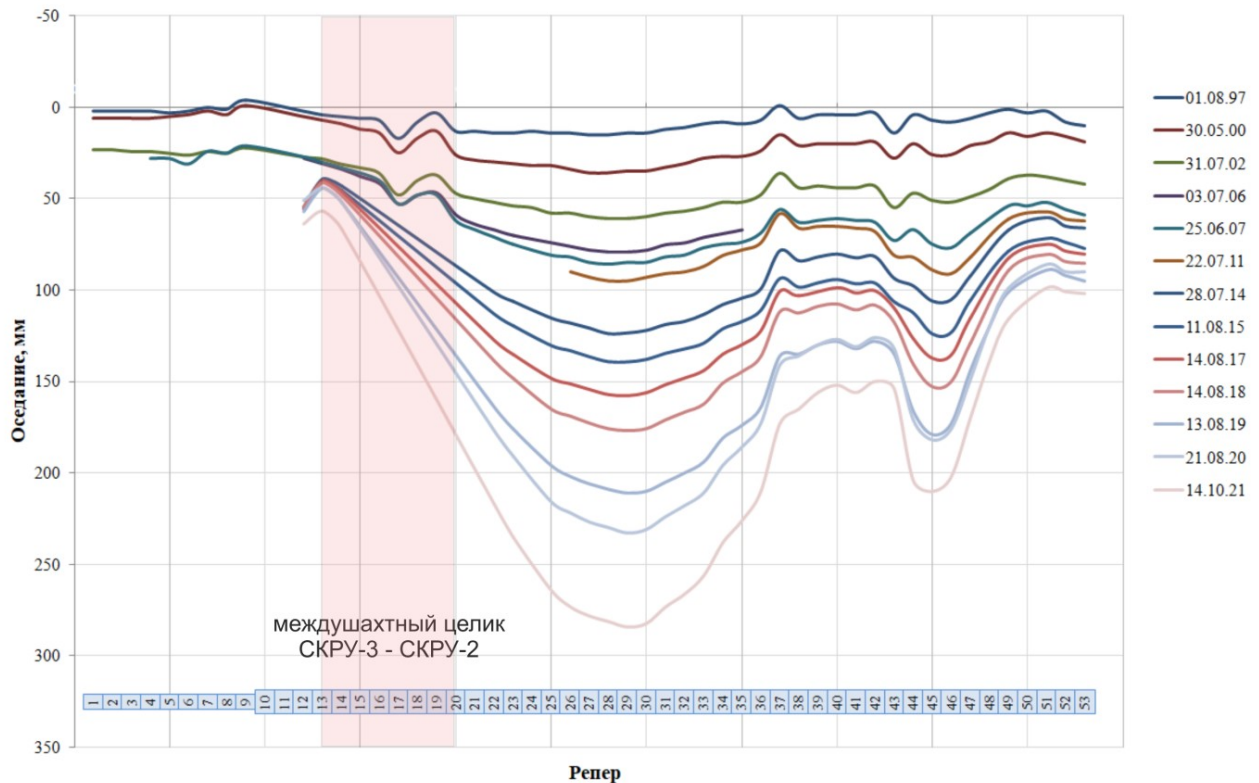


Рисунок 2.10 – Оседания по профильной линии № 8

По графикам оседаний можно увидеть, что к границам междушахтного целика СКРУ-1 – СКРУ-2 оседания земной поверхности в пределах каждой профильной линии уменьшаются.

По каждой профильной линии можно увидеть резкий рост оседаний на самой границе целика в сторону выработанного пространства СКРУ-2 и последующее увеличение оседаний до максимума. Ни по одной профильной линии характерного плоского дна не наблюдается, лишь на небольшом участке по профильной линии № 1 в районе реперов 22-26 можно наблюдать сформированное «плоское дно», которое плавно оседает, но уже с меньшей скоростью, чем в начале. Однако, как таковой стабилизации оседаний не произошло, процессы оседаний земной поверхности не достигли своей конечной стадии.

Таким образом, для последующего геомеханического моделирования и оценки состояния междушахтного целика в районе СКРУ-1 – СКРУ-2 будут использованы результаты наблюдений по профильной линии № 1.

При обработке ведомости нивелирования по профильной линии №8 было отмечено, что имеется необоснованно большое количество наблюдений – порядка 106 измерений в период с 01.08.1991 по 14.10.2021. При этом, между первым и вторым циклом наблюдений прошло 6 лет. До 2015 года измерения проводились не регулярно и не каждый год. А с 2015 года наблюдения проводятся почти каждый месяц или чаще. На рисунке 2.10 представлена лишь часть результатов наблюдений без потери общего характера проявления оседаний по данной профильной линии. Часть профильной линии (до 13 репера) территориально совмещена с Блоком 11 Панели 15 шахтного поля СКРУ-3. Очистные работы были пройдены лишь по пласту АБ в 2019-2020 годах, а по результатам наблюдений на 2007 год процесс оседаний уже имел место: репера равномерно осели примерно на величину около 25 мм (протяжённость участка примерно 350 м). Это свидетельствует о том, что очистные работы на соседнем шахтном поле влияют на состояние земной поверхности другого шахтного поля, однако благоприятным является то, что резкие перепады оседаний со стороны СКРУ-3 отсутствуют.

Накопленные оседания у границ предохранительного целика со стороны шахтного поля СКРУ-2 в среднем составляют 200-500 мм. Таким образом, за весь период многолетних наблюдений оседания земной поверхности доходят до 0,5 м на границе междушахтных целиков.

Стоит отметить, что профильная линия № 8 проходит под углом к меридиональному направлению камер, поэтому для последующего геомеханического моделирования будет использована ближайшая к ней профильная линия №2, которая пересекается с профильной линией № 1 в районе 1ЮВП (гор. –143 м) и её условное продолжение будет служить основой для анализа состояния целика в районе СКРУ-2 – СКРУ-3.

Таким образом, для последующего геомеханического моделирования и анализа состояния земной поверхности и массива горных пород в районе междушахтных целиков будут использованы результаты наблюдений по профильной линии № 1 и № 2.

## 2.4 Расчёт сдвижений и деформаций земной поверхности на основании действующих нормативных документов при оставлении целиков между шахтными полями СКРУ-1 – СКРУ-2 и СКРУ-2 – СКРУ-3

Расчёт сдвижений и деформаций при отработке ВКМКС регламентируется действующим нормативным документом, в основе которого лежит метод типовых кривых [69].

На участках, сопряжённых с междушахтными целиками выполняется условие полной подработки, т.к. их относят к постоянным границам выработанного пространства. При этом, граничный угол составляет  $55^\circ$ . Также, в условиях полной подработки значения угла полных сдвижений принимается равным  $55^\circ$ .

За начало процесса сдвижения земной поверхности принимается, как правило, дата, соответствующая началу очистной выемки на рассматриваемом участке шахтного поля.

За окончание процесса сдвижения принимается дата, после достижения которой максимальная скорость оседания земной поверхности становится менее 2 мм/год при условии, что достигнутая или прогнозируемая величина максимального оседания  $\eta_m(t)$  превышает 90 % от конечного оседания  $\eta_o$ , т.е. при  $\eta_m(t) > 0.9\eta_o$ .

В общем случае величина максимального оседания земной поверхности на период окончания процесса сдвижения при отработке одного сильвинитового пласта определяется по формулам (2.1)-(2.2) в зависимости от величины степени нагружения:

– при степени нагружения междукамерных целиков  $C < 0.32$

$$\eta_{ок} = 0.9m_o\omega p \left\{ \frac{C}{0.32} \right\}^2; \quad (2.1)$$

– при степени нагружения междукамерных целиков  $C \geq 0.32$

$$\eta_{ок} = 0.9m_o\omega p, \quad (2.2)$$

где  $m_o$  – вынимаемая мощность при отработке пласта,

$\omega$  – расчетный коэффициент извлечения,

$p$  – параметр, характеризующий влияние закладки очистных камер.

Величина максимального оседания земной поверхности на период окончания процесса сдвижения при отработке пласта В карналлитового состава вне зависимости от степени нагружения междукамерных целиков при механическом способе внесения закладочного материала определяется по формуле (2.2).

При отработке нескольких пластов суммарная величина максимального оседания земной поверхности определяется, как сумма рассчитанных оседаний от отработки одиночных пластов.

Зависимость между горизонтальным сдвижением и суммарной величиной максимального оседания земной поверхности устанавливается по данным инструментальных наблюдений за вертикальными и горизонтальными перемещениями реперов наземных профильных линий.

При отсутствии необходимых данных инструментальных наблюдений значение горизонтального сдвижения в рассматриваемый период времени определяется из приближенной зависимости (2.3):

$$\xi_m(t) = m_\xi \cdot \eta_m(t), \quad (2.3)$$

где  $\xi_m(t)$  – горизонтальное сдвижение земной поверхности в пределах рассматриваемой полумульды сдвижения,

$m_\xi$  – коэффициент перехода от вертикальных перемещений к горизонтальным сдвижениям. При степени нагружения междукамерных целиков  $C \leq 0.45$  коэффициент  $m_\xi = 0.4$ .

В качестве примера проведён расчёт прогнозных оседаний вдоль разреза, соответствующего профильной линии № 1. Оседания земной поверхности вычислены с учётом года отработки панелей, т.е. в зависимости от временного коэффициента. В таблице 2.1 представлены исходные данные для выполнения аналитического решения.

Таблица 2.1 – Прогнозный расчёт оседаний земной поверхности на 2020 год вдоль профильной линии № 1

Панель	Пласт	Год отработки	Вынимаемая мощность $m_o$ , м	Коэффициент извлечения $\omega$	Влияние закладки очистных камер $p$	Оседание на 2020 год, мм
I СПВ -143	Кр-II	1983	4,8	0,59	1,000	662
II СПВ -143	Вс	1974	5,9	0,48	0,590	868
	АБ	1974	4,3	0,48	0,524	
	Кр-II	1974	6,6	0,59	0,549	
III СПВ -143	Вс	1974	4,7	0,48	1,000	1072
	АБ	1974	3,8	0,48	1,000	
	Кр-II	1983	4,7	0,59	1,000	
IV СПВ -143	Вс	1982	5,5	0,48	1,000	1224
	АБ	1982	3,9	0,48	1,000	
	Кр-II	1987	8,4	0,57	1,000	
I ЮВП -143	Кр-II	1977	7,6	0,59	1,000	902

На рисунке 2.11 представлено сопоставление фактических и прогнозных оседаний вдоль профильной линии № 1.

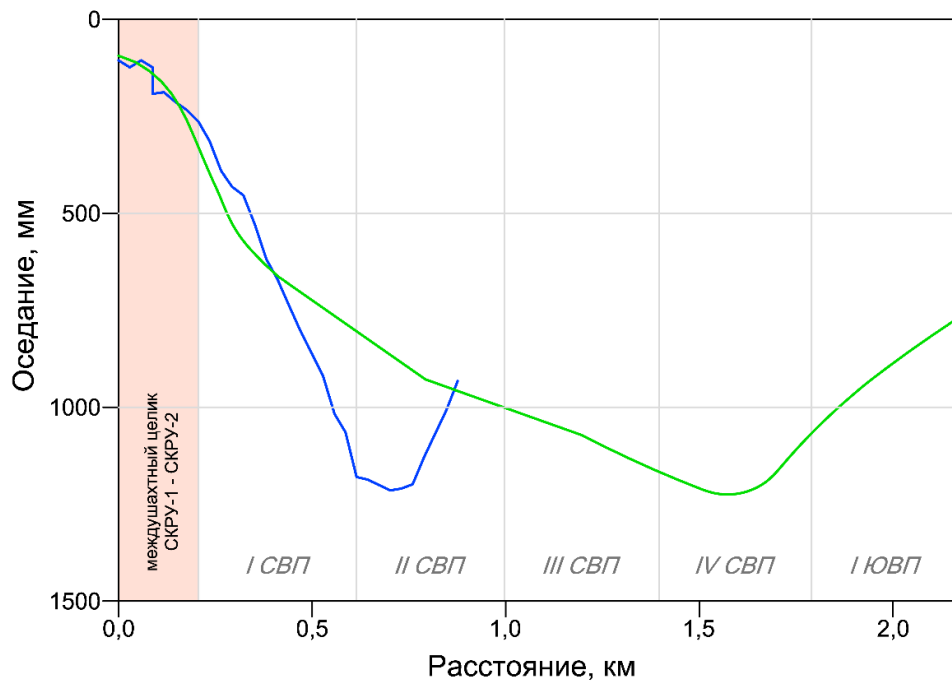


Рисунок 2.11 – Сопоставление фактических (синий цвет) и прогнозных (зелёный цвет) оседаний вдоль профильной линии № 1



Начиная с 2003 года фактические данные имеются только для 30 реперов профильной линии № 1, поэтому график ограничен II СВП –143. Результаты расчетов оседаний по действующему нормативному документу и сопоставление их с результатами мониторинга показывают их несоответствие на удалении от границ междушахтного целика СКРУ-1 – СКРУ-2 уже на границе I СВП и II СВП. Однако в районе самого целика прогнозные расчёты достаточно соответствуют фактическим оседаниям.

Таким образом, аналитические методики предлагают определение величин оседаний и сдвижений по нескольким параметрам, а именно: вынимаемая мощность при отработке пласта, расчетный коэффициент извлечения, параметр, характеризующий влияние закладки очистных камер. При этом, при степени нагружения больше 0.32 она перестаёт влиять на окончательную величину оседания. В данном случае влияют исключительно горнотехнические показатели, в то время как геологические особенности строения массива и особенности деформирования пород никак не учитываются.

## **2.5 Выводы по Главе 2**

1. Инструментальные наблюдения за деформированием земной поверхности в районе целиков между шахтными полями СКРУ-1 – СКРУ-2 и СКРУ-2 – СКРУ-3 выполняются как специалистами маркшейдерской службы ПАО «Уралкалий», так и специалистами ПНИПУ. При этом специалисты ПНИПУ с 2010 г. выполняют по профильной линии, которая проходит вдоль нефтепровода между целиками СКРУ-2 – СКРУ-3, как нивелирование II класса, так и измерение горизонтальных деформаций интервалов между реперами с относительной точностью 1 : 20 000. Специалисты маркшейдерской службы ПАО «Уралкалий» выполняют практически только нивелирование IV класса по целому ряду профильных линий между СКРУ-1 – СКРУ-2 и СКРУ-2 – СКРУ-3.

2. Результаты инструментальных наблюдений ПНИПУ по линии нефтепровода в районе междушахтного целика СКРУ-2 – СКРУ-3 показывают, что

величины оседаний и горизонтальных сдвижений реперов весьма невелики и за 10 лет наблюдений над целиком СКРУ-2 – СКРУ-3 не превышают 90 мм и 35 мм соответственно. Величины горизонтальных деформаций также не велики и не превышают 0,3 мм/м. Столь незначительные величины сдвижений и деформаций связаны с тем, что шахтное поле СКРУ-3 на данном участке пока не отрабатывается.

3. Результаты инструментальных наблюдений по данным ПАО «Уралкалий» свидетельствуют о том, что к границам междушахтного целика оседания земной поверхности в пределах каждой профильной линии уменьшаются, что вполне закономерно. Накопленные оседания у границ предохранительного целика со стороны шахтного поля СКРУ-2 в среднем составляют 200-500 мм.

4. Результаты расчетов оседаний по действующему нормативному документу и сопоставление их с результатами мониторинга показывают достаточно близкое их соответствие в районе междушахтного целика СКРУ-1 – СКРУ-2.

5. В целом, развитие оседаний земной поверхности по данным инструментальных наблюдений в районе целиков между шахтными полями СКРУ-1 – СКРУ-2 и СКРУ-2 – СКРУ-3 показывает их достаточно плавный характер, что свидетельствует о достаточно стабильном состоянии напряженно-деформированного состояния массива целиков и ВЗТ над ними. В то же время, в отдельных местах (профильная линия № 7) на границе целика СКРУ-1 – СКРУ-2 сформирована мульда сдвижения с оседанием свыше 2,3 м на удалении 450 м от границы целика со стороны СКРУ-2, что связано с образованием провала в результате произошедшего в 1995 году сейсмического события и требует отдельного углубленного анализа.

## **ГЛАВА 3 ПОСТРОЕНИЕ ГЕОЛОГО-ГЕОМЕХАНИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ МАССИВА ГОРНЫХ ПОРОД В РАЙОНЕ ЦЕЛИКОВ МЕЖДУ ШАХТНЫМИ ПОЛЯМИ СКРУ-1 – СКРУ-2 И СКРУ-2 – СКРУ-3**

### **3.1 Основные принципы создания геолого-геомеханической модели**

Идея выделения зон уплотнения и разуплотнения в породах ВЗТ (а также продуктивных пластах) является весьма плодотворной и позволяет не только существенно повысить безопасность добычи калийно-магниевых руд на территории ВКМКС, но и эффективность разработки месторождения за счет оптимизации параметров системы разработки. В основе этой идеи лежит геологическая информация по строению массива горных пород, геофизическая информация, зависимости, полученные в результате испытаний кернового материала. Все это в совокупности является геолого-геомеханической моделью ВЗТ и калийных пластов, которая является основой для достижения последующей цели – получению в результате геомеханического моделирования надежных, отражающих реальность данных о развитии деформационных процессов в ВЗТ и калийных пластах при различных параметрах системы разработки [27, 62, 41, 88, 92]. Следует отметить, что данный подход основан на широко используемых в нефтегазовой геологии и геомеханике подходах к созданию геолого-геомеханической модели продуктивных объектов [28].

Таким образом, авторами [62] под «геолого-геомеханической моделью» понимается модель, созданная в специализированном программном обеспечении, представляющая совокупность геологической, геофизической и геомеханической информации, ориентированной на решение конкретной геомеханической проблемы – оценки сохранности ВЗТ при заданных параметрах системы разработки».

При решении задачи, касающейся выбора эффективного способа разработки месторождения, а именно: определение конкретных параметров системы разработки, важно учитывать физико-механические свойства пород в массиве, и,

соответственно, распределение напряжений. Совместный учет таких факторов, включая геологические особенности, ведет к созданию геолого-геомеханической модели (ГГМ) месторождения. Необходимо отметить, что создание ГГМ невозможно без соответствующего современного программного обеспечения, которое позволяет определить НДС больших участков массивов горных пород.

Для исключения неопределённостей установим обозначения: модель, построенную в пакете геологического моделирования, на которой производится распространение свойств и в которую передаются результаты геомеханических расчетов будем называть геолого-геомеханической моделью, а модель, на которой производятся геомеханические расчеты – геомеханической. При этом геомеханическая модель непосредственно включает модель механических свойств, модель пластовых давлений и тензор исходных напряжений, а также собственно результаты геомеханических расчетов: тензор напряжений и деформаций и ряд сопутствующих параметров, которые могут отражать напряженно-деформированное состояние массива пород всего месторождения.

Создание геолого-геомеханической модели возможно для участка любых размеров: всего месторождения, шахтного поля, панели, блока или для отдельного пласта. В основе модели лежит геологическая модель, разрабатываемая в специализированном программном обеспечении для геологического моделирования, геомеханические параметры, такие как модуль упругости, коэффициент Пуассона, коэффициент Био, прочностные характеристики пород, полученные по керновым испытаниям и геомеханическая модель, разрабатываемая в специализированном программном комплексе для геомеханического моделирования (Ansys, Abaqus, FLAC3D, 3DEC и другие).

На рисунке 3.1 представлена принципиальная схема создания геолого-геомеханических моделей, ориентированных на решение проблемы обеспечения сохранности ВЗТ при разработке ВКМКС.

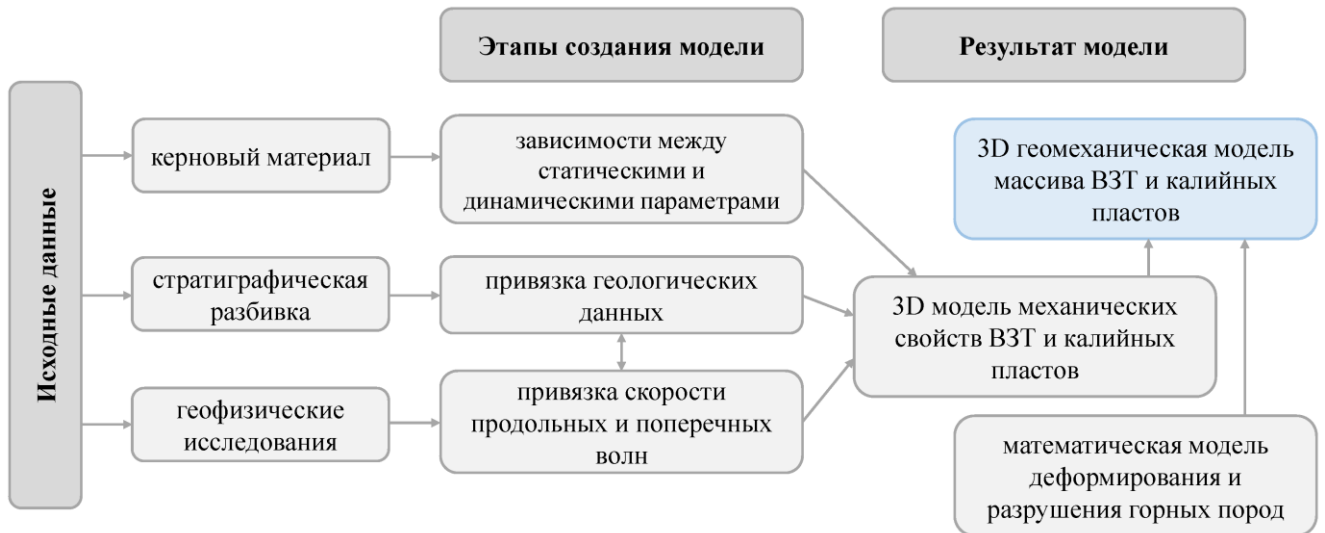


Рисунок 3.1 – Блок-схема создания геолого-геомеханической модели водозащитной толщи и калийных пластов

Алгоритм создания геолого-геомеханической модели следующий:

1. Вблизи участка исследования бурится скважина, из которой керновый материал подготавливается для определения упругих и прочностных свойств в соответствие с программой испытаний на установке, позволяющей определять статические и динамические геомеханические характеристики (ПИК-УИДК/ПЛ, AUTOlab1500 или аналоги).

2. При извлечении керна из скважины выполняется описание и его геологическая привязка.

3. В этой же скважине проводится акустический каротаж на всю глубину, в результате которого будет известна скорость распространения упругой волны.

4. По результатам испытаний горных пород на установке ПИК-УИДК/ПЛ по диаграммам деформирования определяются статические характеристики – модуль упругости и предел прочности на одноосное сжатие, а также по паспорту прочности – сцепление и угол внутреннего трения.

5. По результатам испытаний горных пород на установке ПИК-УИДК/ПЛ определяется скорость распространения продольных и поперечных волн  $V_p$ ,  $V_s$ .

6. Обработка результатов п. 4 и п. 5 позволяют получить статистические зависимости между статическими и динамическими параметрами.

7. Привязка по глубине полученных в результате испытаний скоростей упругой волны к данным акустического каротажа.

8. В районе исследования отдельно проводится шахтная сейсмика 2D для получения полевых сейсмограмм способом поперечных волн с разделением отражения. Профиль выбирается таким образом, чтобы он соответствовал положению будущего моделируемого разреза. В результате обработки полевых сейсмограмм имеется скоростной разрез на поперечных волнах.

9. В специализированном ПО подгружаются геологические отбивки, данные акустического каротажа в скважине и данные сейсмики 2D.

10. Строится геологическая модель на основе геологических отбивок всех геологоразведочных скважин вблизи участка исследования. Отбивки могут корректироваться в соответствии с данными акустического каротажа.

11. Отслеживаются характерные для ВКМКС горизонты в соответствии с данными сейсмики 2D.

12. Формируется куб распространения скорости упругой волны.

13. Создаётся 3D модель механических свойств ВЗТ и калийных пластов на основе имеющихся статистических зависимостей. Размер ячейки модели выбирается опытным путём. Таким образом, в любой точке модели определены упругие и прочностные свойства.

14. Формируется расчетный разрез, вдоль которого извлекаются данные о распространении упругих и прочностных свойств.

15. Учитывается фактическое положение горных выработок на расчетном разрезе.

16. Выбирается и обосновывается математическая модель деформирования и разрушения соляных пород, на основе которой проводится геомеханическое моделирование деформационных процессов массива ВЗТ и калийных пластов.

Можно видеть, что для создания геолого-геомеханической модели месторождения требуется практически вся основная геологическая, геофизическая

и геомеханическая информация по месторождению. В рамках настоящей работы представлена геолого-геомеханическая модель участка шахтного поля в районе целиков между шахтными полями СКРУ-1 – СКРУ-2 и СКРУ-2 – СКРУ-3. При этом при создании модели не участвовали данные сейсмоки 2D в силу их отсутствия.

### **3.2 Анализ геологической информации в районе целиков между шахтными полями СКРУ-1 – СКРУ-2 и СКРУ-2 – СКРУ-3**

Типовой геологический разрез на территории ВКМКС складывается из следующих толщ (сверху вниз): четвертичные отложения (Q), пестроцветная толща (ПЦТ), терригенно-карбонатная толща ТКТ), соляно-мергельная толща (СМТ), переходная пачка (ПП), покровная каменная соль (ПКС), сильвинито-карналлитовая зона (СКЗ), сильвинитовая зона (СЗ), подстилающая каменная соль (ПдКС). Внутри ПдКС также выделяют маркирующий горизонт (МГ), а ниже проходит глинисто-ангидритовая толща.

Геологическое описание представлено в виде таблиц, в которых указано разделение на основные толщи, описание пород по характерным слоям, указаны глубины, мощности и выход керна.

Первичная обработка данных геологического описания показала, что не все скважины пробурены до маркирующей глины, многие вскрывают лишь переходную пачку.

По результатам обработки геологических отбивок сформирована таблице 3.1, в которой зафиксированы глубины залегания почв основных слоёв. По таблице можно увидеть, что встречаются скважины, в которых отсутствует какая-либо из основных толщ. Например, во многих скважинах отсутствует пестроцветная толща, переходная пачка выделяется также не везде.

Таблица 3.1 – Результат обработки геологической информации по толщам

Скважина	Глубина залегания кровли, м										
	Пестроцветная толща	Терригенно-карбонатная толща	Соляно-мергельная толща	Гипсоносные глины и гипсы	Переходная пачка	Покровная каменная соль	Карналлитовая зона	Сильвинитовая зона	Подстилающая каменная соль	Маркирующий горизонт	Подстилающая каменная соль
23	-	6,32	64,58	107,22	-	174,46	207,45	294,3	322,26	-	-
25	-	1,3	104,1	130,38	-	198,91	-	-	-	-	-
30	-	5,15	35,0	119,1	-	157,05	183,13	259,33	293,81	-	-
74	-	24,45	213,9	-	-	260,05	315,15	374,95	395,1	-	-
75	-	3,2	117,95	-	-	171,95	212,15	295,5	314,8	339,55	342,35
120с	-	15,5	92,3	-	175,2	197,0	-	-	-	-	-
121	-	20,0	154,3	-	258,7	292,3	345,2	399,75	413,5	434,0	435,0
122	-	8,5	99,4	-	199,9	204,0	217,5	317,5	337,0	379,2	381,2
122с	-	20,3	106,4	-	187,6	207,8	-	-	-	-	-
123	-	20,0	91,4	-	174,8	187,2	203,4	259,6	285,2	316,5	319,0
124	-	2,0	70,2	-	-	152,0	168,0	262,5	288,0	316,2	318,4
127с	-	16,0	97,5	-	-	181,6	-	-	-	-	-
130	12,0	35,7	153,6	-	221,15	233,1	250,8	337,3	346,0	372,0	373,8
131с	12,6	29,0	133,2	-	223,0	230,4	245,85	326,2	341,0	369,6	372,0
134	-	5,0	110,0	-	211,5	223,0	234,9	312,7	337,7	372,4	374,0



Продолжение таблицы 3.1

Скважина	Глубина залегания кровли, м										
	Пестроцветная толща	Терригенно-карбонатная толща	Соляно-мергельная толща	Гипсоносные глины и гипсы	Переходная пачка	Покровная каменная соль	Карналлитовая зона	Сильвинитовая зона	Подстилающая каменная соль	Маркирующий горизонт	Подстилающая каменная соль
138с	25,0	59,0	164,0	-	285,4	-	-	-	-	-	-
139	-	14,0	61,0	-	-	-	131,7	219,2	254,6	303,0	306,2
140с	9,1	27,4	140,6	-	-	227,7	-	-	-	-	-
141с	-	19,0	138,6	-	227,95	-	-	-	-	-	-
161с	5,0	58,5	162,4	-	244,5	-	-	-	-	-	-
163с	39,0	52,0	164,8	-	256,6	-	-	-	-	-	-
180с	-	-	51,3	-	-	137,5	140,0	-	-	-	-
215	-	5,05	51,55	-	152,5	158,6	174,6	257,7	272,0	317,5	328,0
216	-	4,8	41,3	-	-	126,3	143,4	231,0	267,2	309,65	312,3
217	8,6	67,55	170,1	-	257,6	292,46	307,4	366,0	384,3	408,5	410,25
218	6,85	46,65	153,35	-	236,65	255,5	275,2	351,0	372,0	402,3	414,4
222	-	1,2	106,15	-	-	177,5	194,6	299,8	322,65	353,05	354,7
234с	-	11,1	62,8	-	150,6	157,0	176,3	-	-	-	-
1036	18,5	26,1	145,2	-	223,1	255,8	281,7	349,7	368,15	390,0	391,4

Таким образом, каждая скважина проанализирована отдельно, проверено выделение всех толщ, соответствие мощностей и глубин. Все отбивки были приведены в единую базу. Ниже представлены карты распределения мощностей по основным толщам в разрезе, которые использовались при построении геолого-геомеханической модели (рисунки 3.2-3.7).

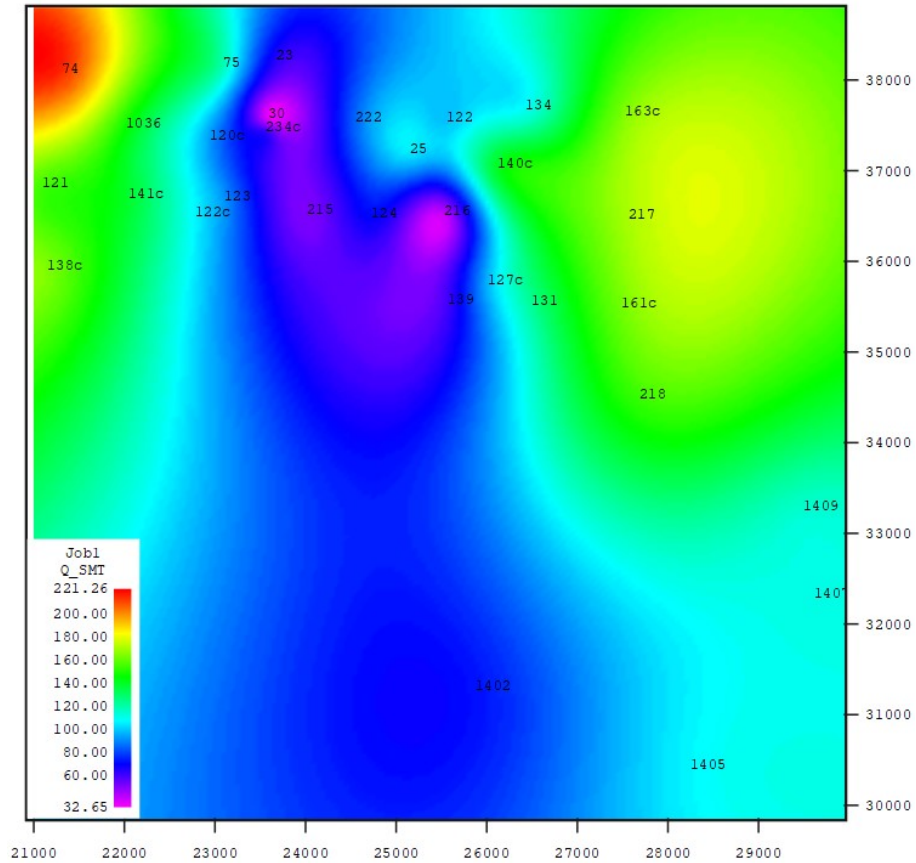


Рисунок 3.2 – Карта распределения мощности соляно-мергельной толщи

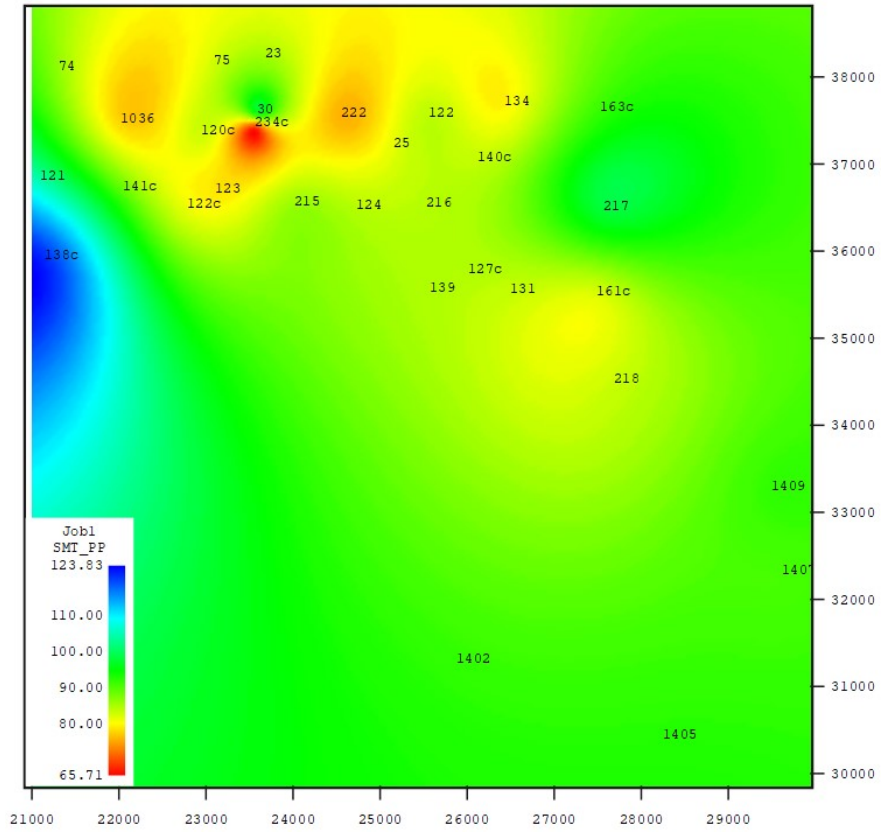


Рисунок 3.3 – Карта распределения мощности переходной пачки

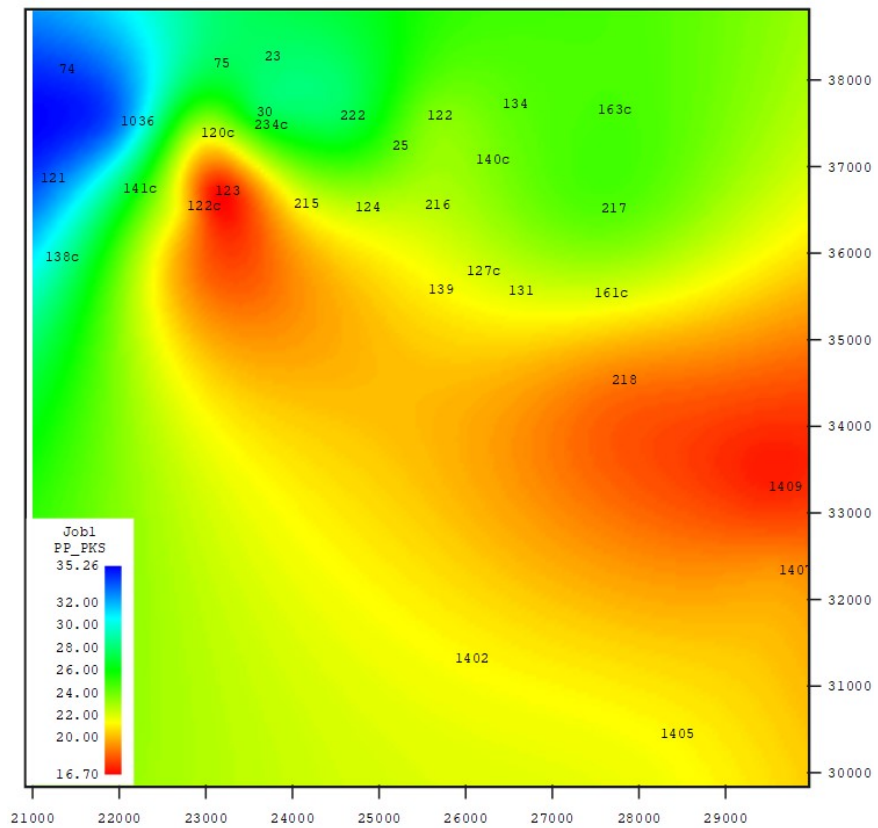


Рисунок 3.4 – Карта распределения мощности покровной каменной соли

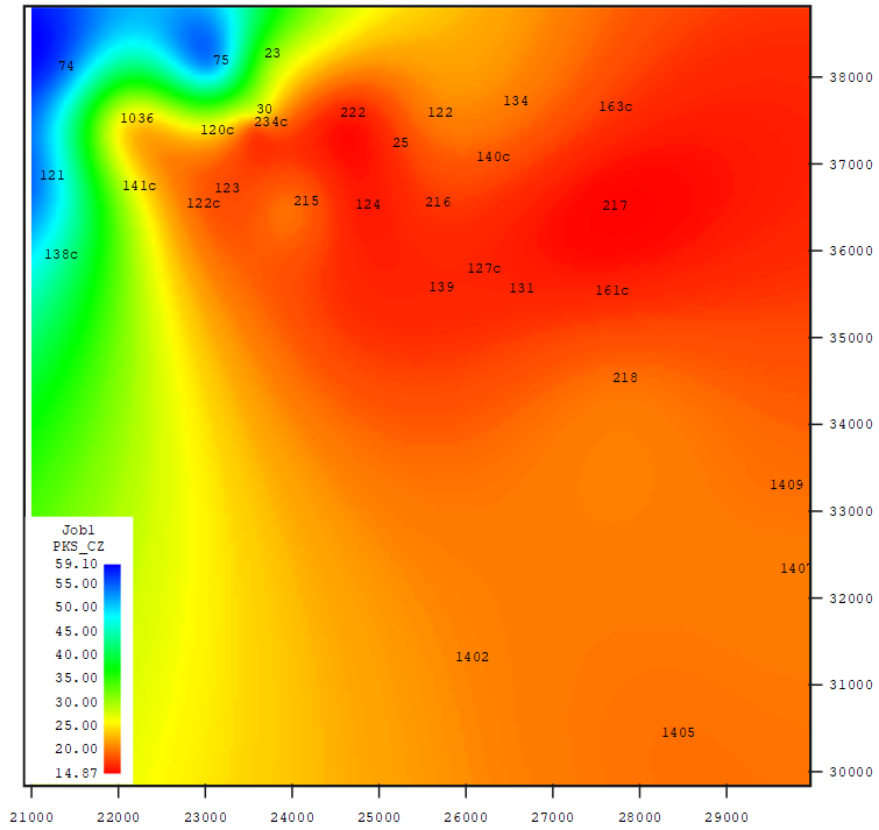


Рисунок 3.5 – Карта распределения мощности карналитовой зоны

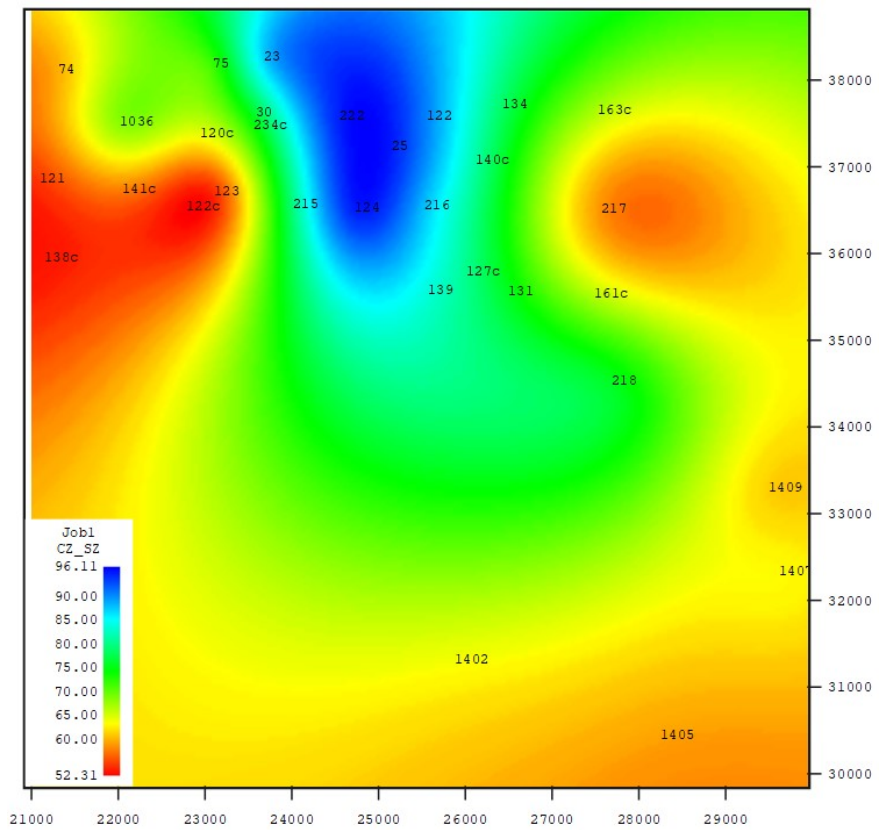


Рисунок 3.6 – Карта распределения мощности сильвинитовой зоны

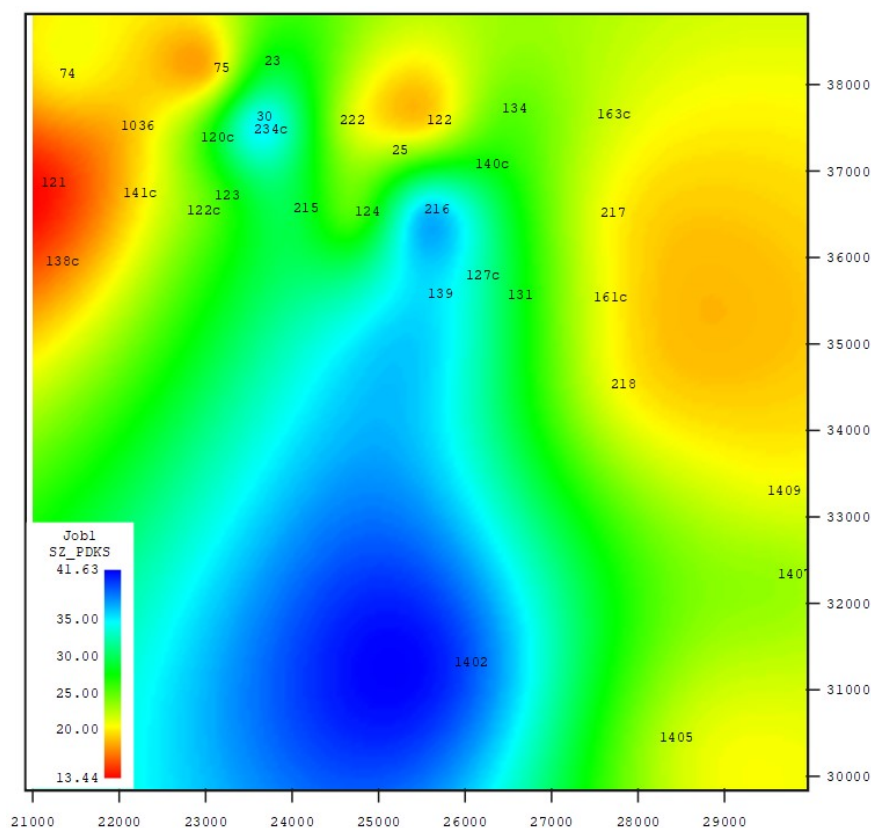


Рисунок 3.7 – Карта распределения мощности подстилающей каменной соли до маркирующего горизонта

Согласно картам распределения мощностей можно увидеть, что толщины колеблются в значительных диапазонах. Наибольшая разница по диапазону мощностей встречается в соляно-мергельной толще – 188 м. Максимальное значение соляно-мергельной толщи зафиксировано в скважине 74, которая находится в 500 м от границы междушахтного целика СКРУ-1 – СКРУ-2, а минимальное значение – в скважине 30.

Переходная пачка также маломощная в районе скважины 30 (рисунок 3.3).

Судя по карте распределения мощностей в карналитовой зоне, на территории СКРУ-2 преимущественно выдержанная мощность – до 20-25 м.

### 3.3 Обработка данных ГИС в районе междушахтных целиков

На участке исследования имеются скважины, в которых были проведены геофизические исследования. Данные акустического каротажа имеются лишь в шести скважинах: 234с, 1036, 1402, 1405, 1407, 1409.

Стоит отметить, что данные по исследованиям в скважинах 234с и 1036 имеются только в растровом виде, что осложняет обработку ГИС.

Так, во всех скважинах при перекрытии ГИС присутствует запись в цементе, что необходимо удалять для сшивки и дальнейшего использования, соответственно, интервал в кровле Переходной пачки оказывается неисследованным. В скважине 1403 запись ведет себя некорректно, отлично от остальных и эта скважина была исключена. В скважине 1402 некорректно откоррелирован горизонт маркирующей глины, что также было исправлено.

Использование кривых ГИС напрямую для распространения свойств по зависимостям является не корректным. Для каждого из методов ГИС причины свои: сглаженность параметра АК из-за эффекта базы, инерционность показаний ГК в связи с относительно высокой скоростью подъема прибора и т. д. Для геомеханического моделирования распределение свойств должно быть непрерывным с плавными переходами во избежание появления концентраторов напряжений, не соответствующих реальному положению дел.

В качестве коррекции исходных данных выступает их нормирование. Нормировка параметра производилась по граничным значениям, т.е. в диапазоне минимума и максимума, зафиксированного при формировании исходной каротажной кривой. С целью более корректной нормировки производилось сопоставление глубин одноименных интервалов разных скважин. Данная задача решалась путем поиска определенных закономерностей на кривой гамма-каротажа, что используется для автоматической межскважинной корреляции (рисунки 3.8-3.9). На основании откорректированных показателей ГИС производилась дальнейшая оценка упругих свойств пород и параметров исходного напряженного состояния массива горных пород.

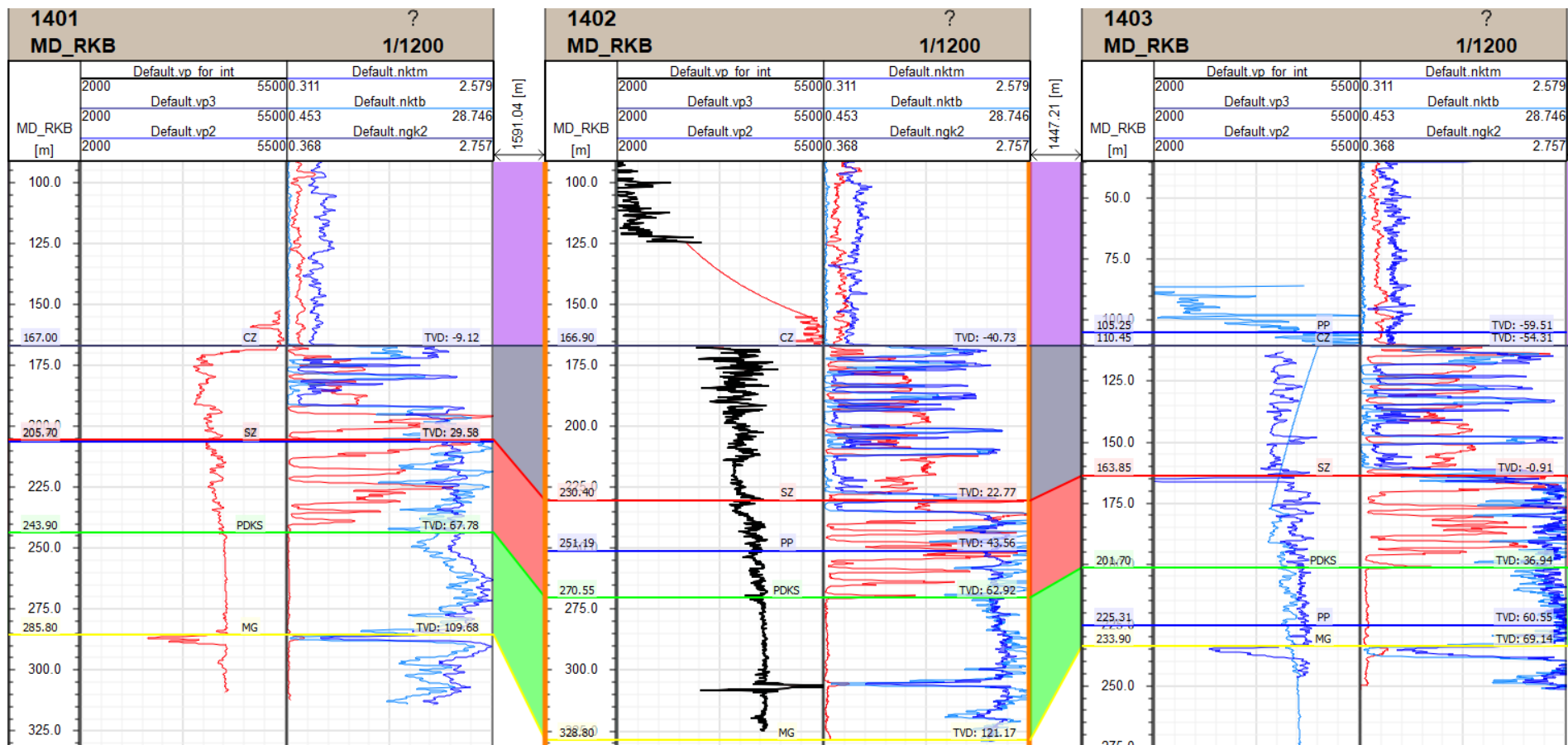


Рисунок 3.8 – Пример межскважинной корреляции горизонтов в геологической модели (скважины 1401, 1402, 1403)

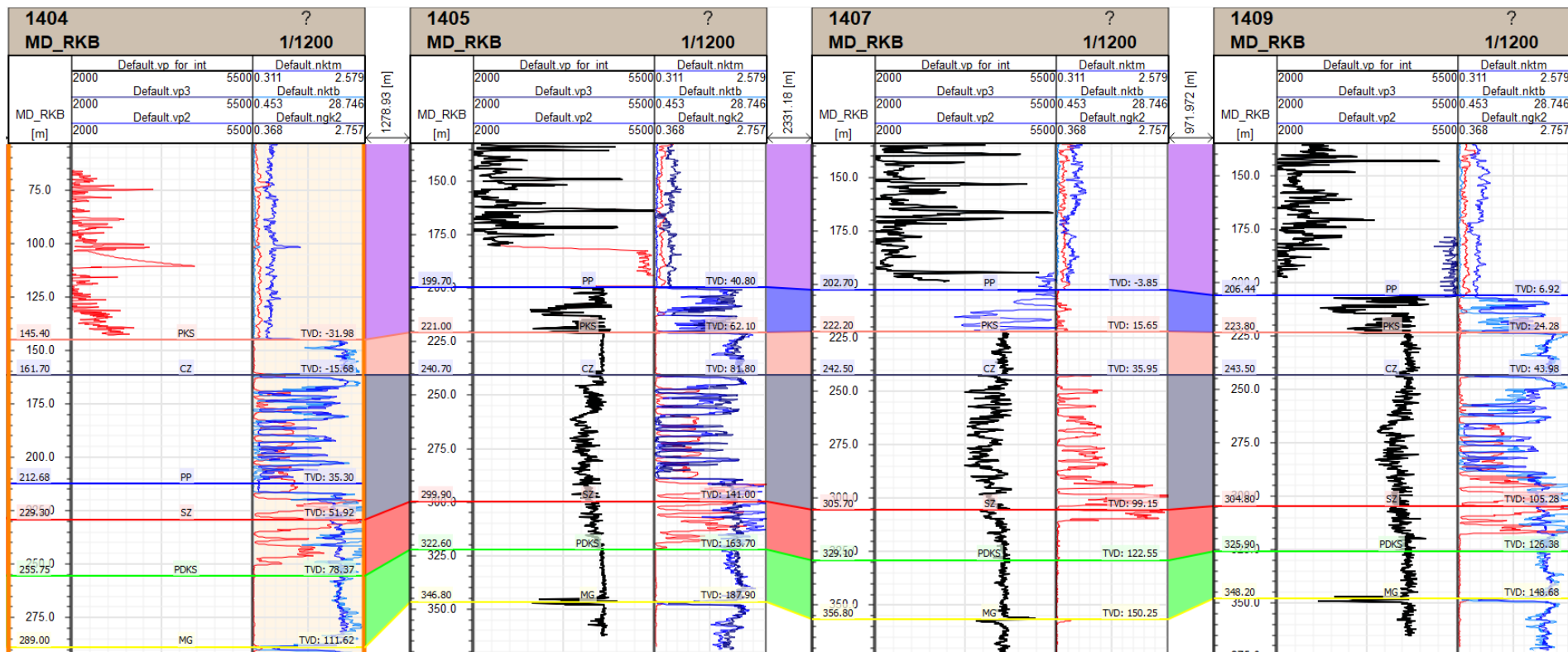


Рисунок 3.9 – Пример межскважинной корреляции горизонтов в геологической модели (скважины 1404, 1405, 1407, 1409)



В скважине 234с параметр  $V_p$  отнормирован согласно остальным скважинам, где присутствовал этот параметр (рисунок 3.10).

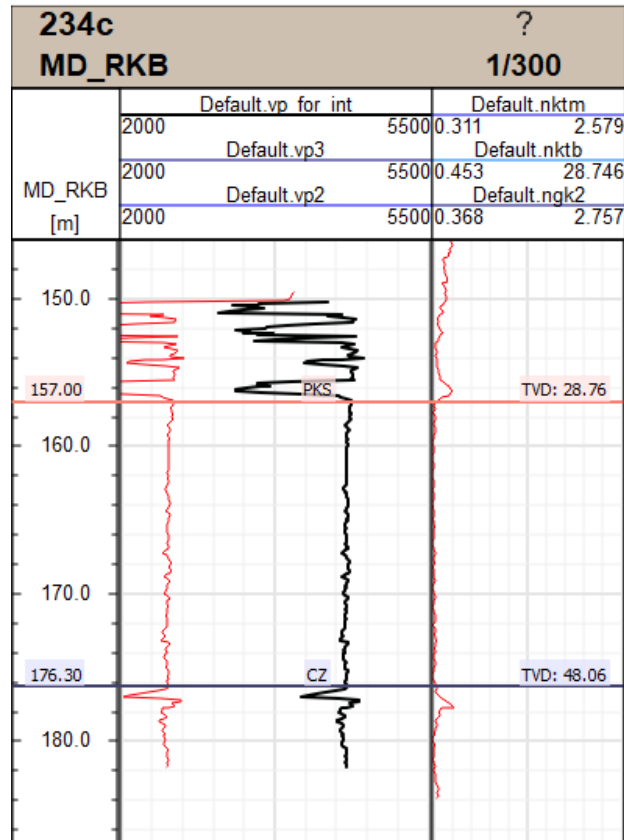


Рисунок 3.10 – Нормировка  $V_p$  в скважине 234с

Таким образом, совместно была обработана геологическая информация и имеющиеся данные ГИС.

### 3.4 Зависимости между статическими и динамическими физико-механическими свойствами соляных пород

Для установления статистических зависимостей между статическими и динамическими геомеханическими характеристиками пород используются испытания керна из геологоразведочных стволовых скважин. Предварительно из кернового материала скважин изготавливаются цилиндрические образцы с

отношением высоты к диаметру 1:2 (30x60 мм) и 1:1 (30x30 мм). Всего испытано 145 образцов. Образцы выбурены параллельно и перпендикулярно напластованию.

Испытания на статические и динамические геомеханические характеристики пород соляной толщи выполнялись в Центре Геомеханики и Геодинамики Недр при ПНИПУ.

Исследования физико-механических свойств кернового материала выполнялась на многофункциональной установке ПИК-УИДК/ПЛ, которая позволяет выполнять стандартные и нестандартные испытания для определения измерения механических и петрофизических свойств породы в пластовых условиях. Установка позволяет выполнять следующие виды измерений:

- скорость прохождения продольных и поперечных ультразвуковых волн в термобарических условиях при одноосном и анизотропном сжатии;
- проницаемость по жидкости при всестороннем обжиге с противодействием;
- непрерывное изменение пористости в зависимости от изменения давления;
- измерение механических свойств горных пород, включая гидростатическое сжатие, сдвиг, тест на неограниченное сжатие, трехосное анизотропное сжатие, модули упругости, статические и динамические модули;
- одновременное измерение скорости прохождения ультразвуковых волн, проницаемости, изменения порового объема и механических свойств горных пород.

Общий вид установки и блока камеры прочности показан на рисунке 3.11.



Рисунок 3.11 – Общий вид установки ПИК-УИДК/ПЛ

Испытания на упругие и прочностные свойства проводились по общей программе, которая приведена ниже:

1. Осевое нагружение образца до  $(0.30-0.35) \cdot \sigma_{сж}$  с постоянной скоростью осевой деформации ( $2 \cdot 10^{-5} \text{ с}^{-1}$ ). Разгрузка образца и определение упругих характеристик в условиях одноосного нагружения.

2. Нагружение образца до пластовых условий (создание всестороннего давления от 6 до 8 МПа).

3. Выдержка образца до стабилизации скоростей продольных и поперечных волн  $V_p$ ,  $V_s$  (2-3 часа).

4. Измерение скоростей продольных и поперечных волн  $V_p$ ,  $V_s$  в пластовых условиях.

5. Увеличение осевой нагрузки на  $(0.25-0.3) \cdot \sigma_{сж}$  с постоянной скоростью осевой деформации ( $2 \cdot 10^{-5} \text{ с}^{-1}$ ) в пределах упругого деформирования образца (при

поддержании бокового давлений на уровне пластовых условий) с целью дальнейшего определения упругих характеристик в пластовых условиях.

6. Измерение скоростей продольных и поперечных волн  $V_p$ ,  $V_s$  в условиях увеличения осевой нагрузки на  $(0.25-0.3) \cdot \sigma_{сж}$ .

7. Разгрузка до условий эксперимента.

8. Увеличение осевой нагрузки с постоянной скоростью осевой деформации ( $2 \cdot 10^{-4} \text{ с}^{-1}$ ) (при поддержании бокового давлений на уровне условий эксперимента) вплоть до разрушения образца.

Модуль упругости находился на прямолинейном участке ветви разгрузки образца на диаграмме «осевые напряжения – осевые деформации» в области упругих деформаций.

В качестве пластовых условий для данных образцов принято гидростатическое поле напряжений ( $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3 = \gamma H$ ).

Динамические значения модуля упругости и коэффициента Пуассона получают по следующим формулам (3.1):

$$\mu_{\text{дин}} = \frac{V_p^2 - 2V_s^2}{2(V_p^2 - V_s^2)}, \text{ д. ед}, \quad E_{\text{дин}} = \rho V_s^2 \frac{3V_p^2 - 4V_s^2}{V_p^2 - V_s^2}, \text{ ГПа}. \quad (3.1)$$

Используя данные соотношения можно напрямую получить корреляционную зависимость между статическим и динамическим модулем упругости. Однако, в целях упрощения задачи принято решение о нахождении зависимости между геомеханическими параметрами и основным геофизическим параметром – скоростью продольной волны  $V_p$ .

Имеются лабораторные исследования физико-механических свойств для соляных пород водозащитной толщи для пяти скважин, пробуренных на ВКМКС. В частности, в лаборатории ГИ УрО РАН испытывались цилиндрические образцы с отношением высоты к диаметру 1:1 (30x30 мм) из скважин 107Г-3, 604/1 и призматические образцы с отношением 1:1 (35x70 мм) из скважины 446/1, а также в лаборатории АО «ВНИИ Галургии» испытывались цилиндрические образцы с

отношением высоты к диаметру 1:1 (30x30 мм) и 1:2 (30x60 мм) из скважины 107Г-1. В данных скважинах также проводился акустический каротаж. Обобщая лабораторные испытания и акустический каротаж по скважинам были построены общие зависимости прочности на одноосное сжатие каменной соли и карналлита ВЗТ и скорости продольной волны (рисунок 3.12). При построении зависимостей проведенные ГИ УрО РАН и АО «ВНИИ Галургии» испытания усреднялись по физико-механической пробе.

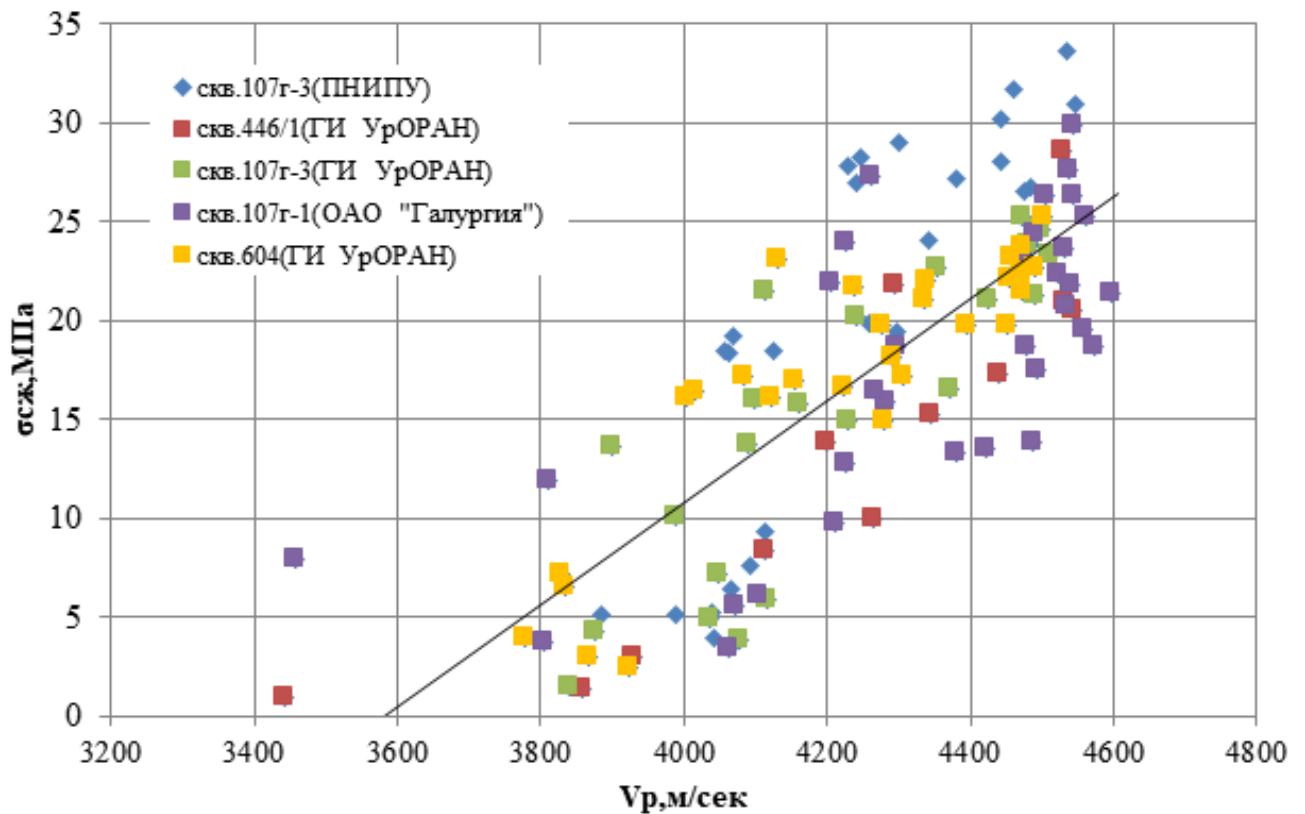


Рисунок 3.12 – Зависимость прочности на одноосное сжатие от скорости продольной волны, полученной из каротажных данных

Несмотря на то, что полученная зависимость имеет высокий разброс значений, она четко показывает, что зависимость между статическими и динамическими геомеханическими параметрами соляных пород, слагающих ВЗТ, существует даже для скважин, располагающихся в различных районах ВКМКС. Безусловно, значительная вариация прочности на сжатие может быть связана как с естественным разбросом, так и с тем, что испытания проводились на различном

оборудовании, на образцах различной формы и с различным соотношением высоты к диаметру. Кроме того, существенную погрешность вносит неточность привязки отбора образцов по высоте интервала.

На рисунках 3.13-3.14 представлены зависимости, полученные в результате испытаний кернового материала в ПНИПУ на установке ПИК-УИДК/ПЛ.

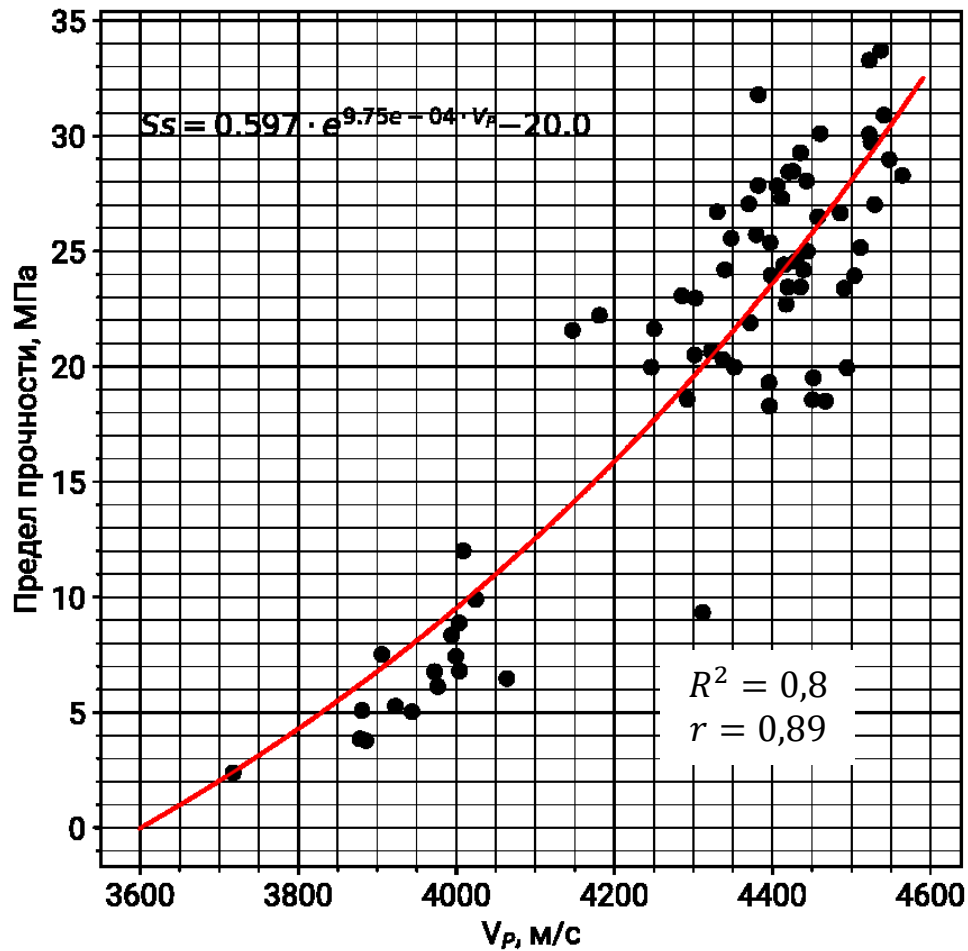


Рисунок 3.13 – Общая зависимость предела прочности на одноосное сжатие по результатам испытаний ПНИПУ от скорости продольной волны  $V_p$  [62]

Получить надежную зависимость между статическим и динамическим значением коэффициента Пуассона не удалось. Следует отметить, что до сих пор исследователи не могут получить такую зависимость практически для всех остальных типов пород, поэтому при создании геомеханических моделей чаще всего пользуются динамическим коэффициентом Пуассона.

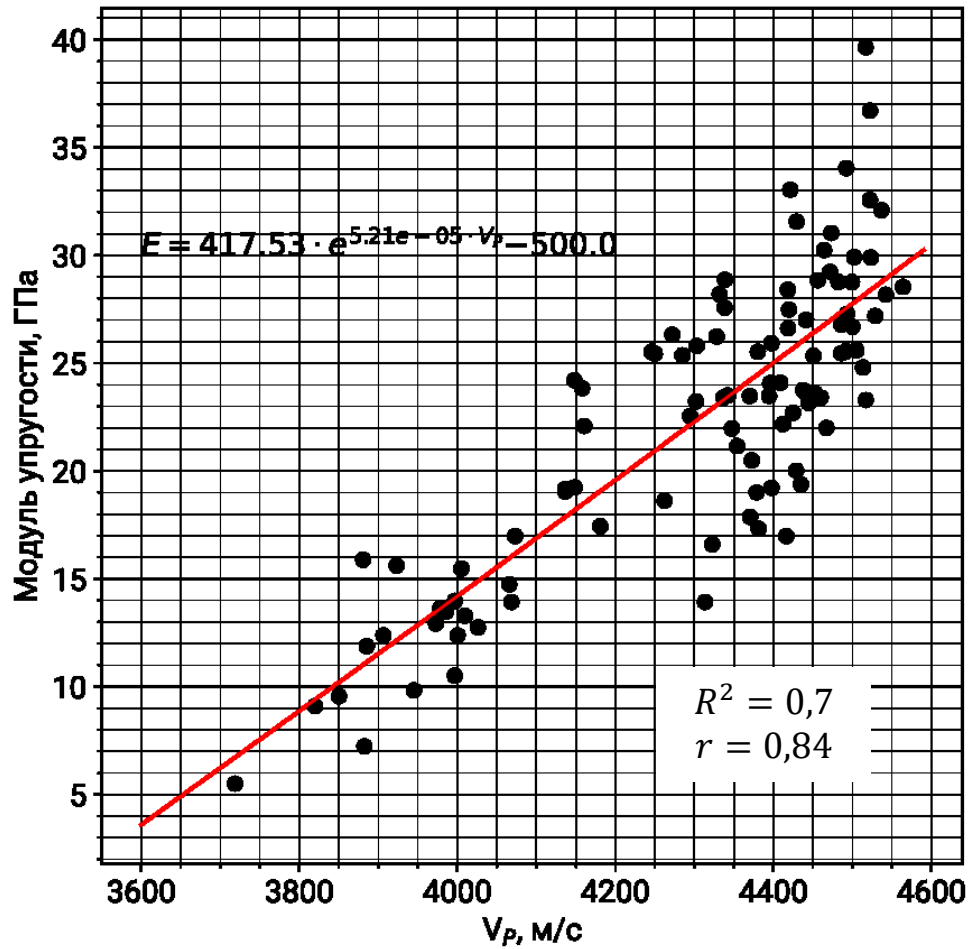


Рисунок 3.14 – Общая зависимость модуля упругости по результатам испытаний ПНИПУ от скорости продольной волны  $V_p$

Также было проведено сопоставление двух полученных зависимостей предела прочности от скорости продольной волны, соответствующей в одном случае данным акустического каротажа, в другом – данным лабораторных испытаний ПНИПУ (рисунок 3.15).

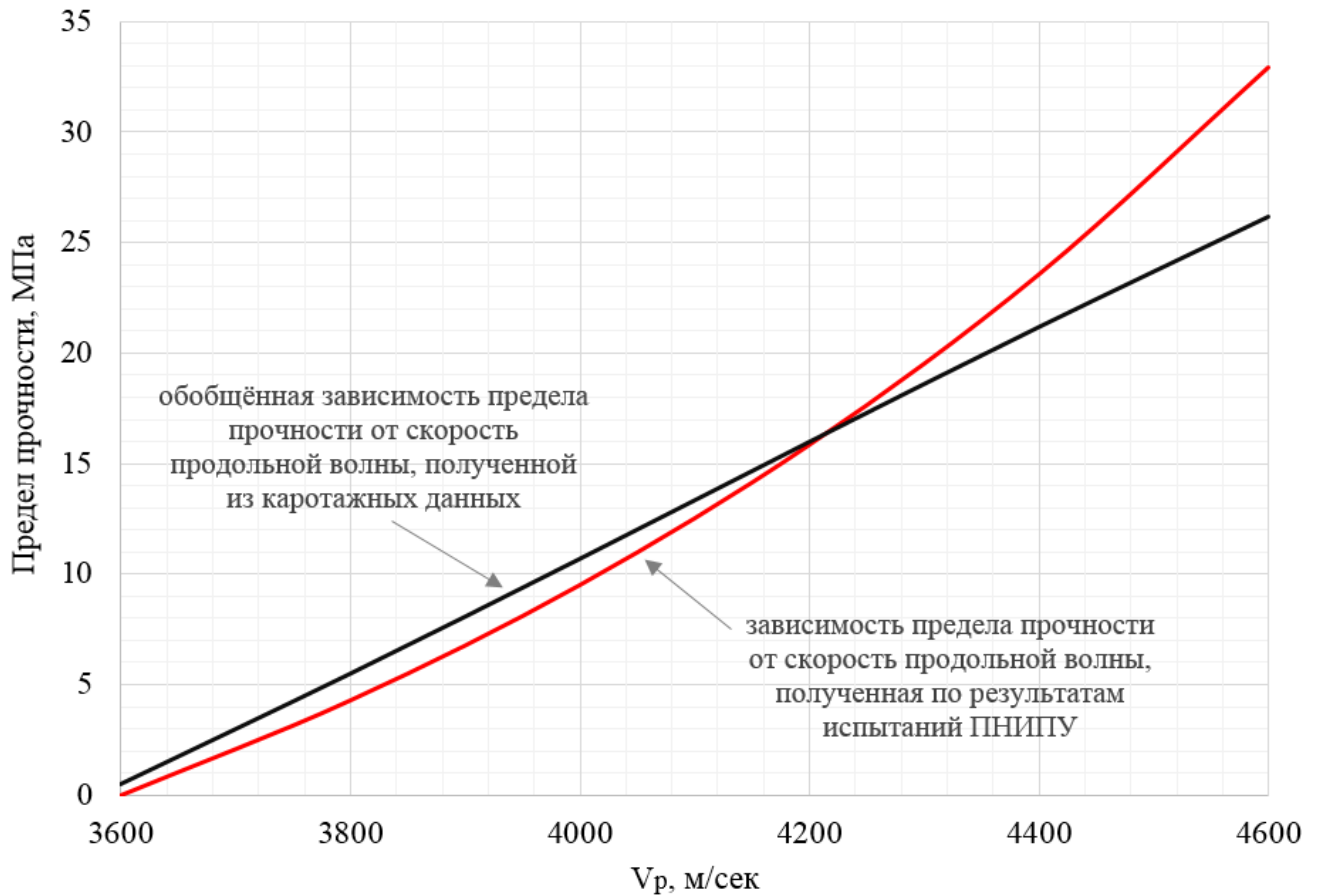


Рисунок 3.15 – Сопоставление двух зависимостей предела прочности от скорости продольной волны  $V_p$

Можно увидеть незначительное отклонение двух графиков. В свою очередь, коэффициент вариации в среднем составляет 14 %. Стоит отметить, что в диапазоне скоростей продольной волны  $V_p$  от 4200 м/сек до 4600 м/сек зависимость предела прочности, полученная по результатам испытаний ПНИПУ более точно описывает результаты экспериментальных данных. Полученные результаты сопоставления зависимостей свидетельствуют о том, что скорость распространения продольной волны в массиве, полученная по данным акустического каротажа и скорость распространения продольной волны в образце, зафиксированная в рамках лабораторных испытаний кернового материала, могут быть напрямую сопоставлены. Таким образом, полученные зависимости между физико-механическими свойствами соляных пород и скоростью распространения



продольной волны можно в последующем использовать для определения распределения свойств горных пород непосредственно в массиве.

По результатам трехосного сжатия были построены паспорта прочности для различного литологического типа пород. В качестве критерия разрушения, описывающего паспорт прочности испытанных образцов горных пород, чаще всего используют критерий разрушения Кулона-Мора в классическом виде (формула (3.2)):

$$\tau = c + \sigma_n \cdot \operatorname{tg}(\varphi), \quad (3.2)$$

где  $\tau$  – касательные напряжения,

$c$  – сцепление,

$\sigma_n$  – нормальные напряжения,

$\varphi$  – угол внутреннего трения.

В осях главных напряжений критерий имеет следующий вид (формула (3.3)):

$$\sigma_1 = \frac{1+\sin\varphi}{1-\sin\varphi} \sigma_3 + c \frac{2\cos\varphi}{1-\sin\varphi}. \quad (3.3)$$

При этом,  $n = \frac{1+\sin\varphi}{1-\sin\varphi}$ ,  $\sigma_{сж} = c \frac{2\cos\varphi}{1-\sin\varphi}$ .

Выше показано, что прочность на одноосное сжатие зависит от скорости прохождения ультразвуковой волны. Критерий разрушения Кулона-Мора в осях главных напряжений опирается на предел прочности на одноосное сжатие. Поэтому естественно предположить, что другие составляющие паспорта прочности – сцепление и внутреннее трение также зависят от скорости прохождения в образце продольной волны  $V_p$ .

В связи с этим построение паспорта прочности основывалось на предположении, что угол внутреннего трения, а также сцепление зависят от  $V_p$ , т.е. в данном случае речь идет уже о поверхности в осях  $\sigma_1 - \sigma_3 - V_p$ . На рисунке 3.16 представлена трёхмерная поверхность критерия прочности Кулона-Мора для сильвинитовых пород в координатах  $\sigma_1 - \sigma_3 - V_p$ .

При подборе оптимальной поверхности паспорта прочности предполагается линейная связь параметров  $(n, \sigma_{сж})$  со скоростью продольной волны  $V_p$ .

Впоследствии при оперировании в паспорте прочности уже тангенсом угла внутреннего трения  $\varphi$  и сцеплением  $c$  зависимость данных параметров от скорости продольной волны  $V_p$  приобретает нелинейный характер.

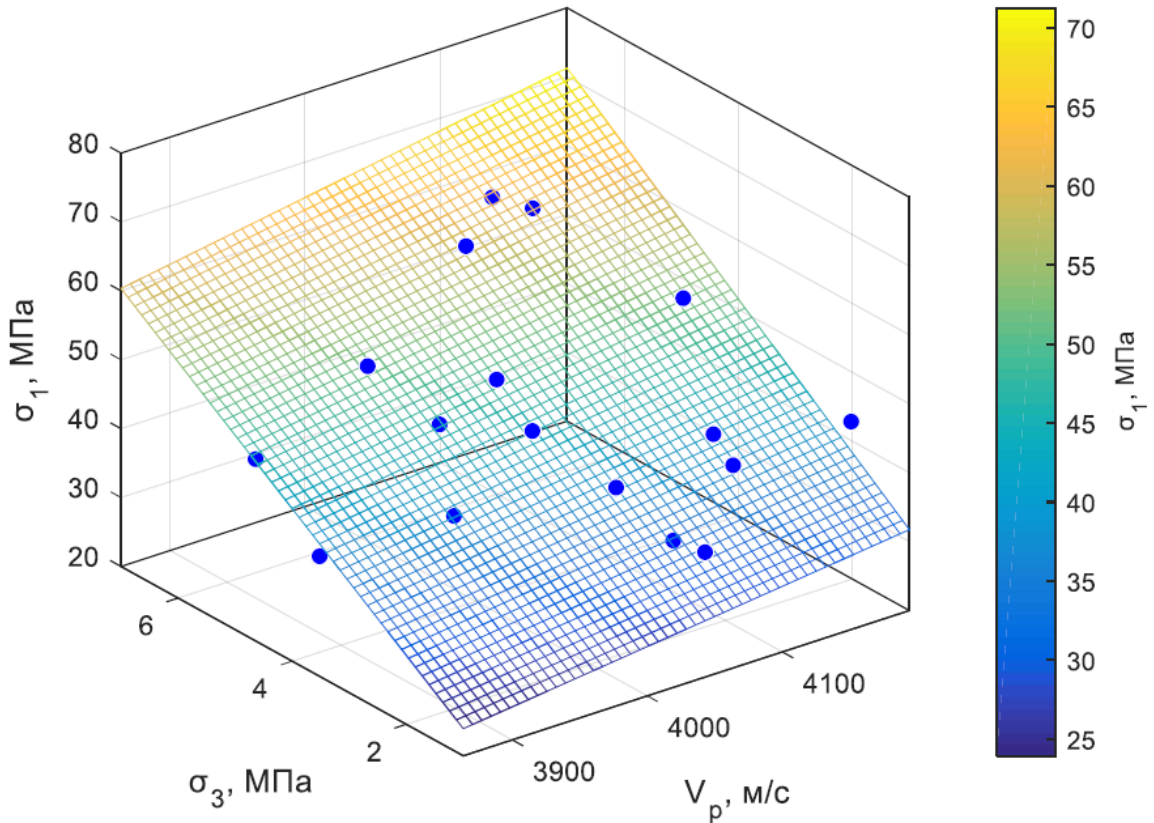


Рисунок 3.16 – Трёхмерная поверхность критерия прочности Кулона-Мора для сильвинитовых пород

Отметим, что полученные зависимости между статическими и динамическими геомеханическими параметрами образцов соляных пород по их характеру соответствуют аналогичным зависимостям для терригенных и карбонатных пород месторождений углеводородного сырья [28].

Проведенные испытания физико-механических свойств соляных пород на предмет установления зависимостей между статическими и динамическими геомеханическими параметрами явились основой для выявления распределения физико-механических свойств пород в массиве ВЗТ при дальнейшей разработке геолого-геомеханической модели и последующего прогнозирования развития деформационных процессов в породах ВЗТ.

Данные результаты обосновывают первое защищаемое положение: для условий Верхнекамского месторождения калийно-магниевых солей прочностные и деформационные характеристики соляных пород в массиве могут быть установлены на основании измеренных в лабораторных условиях скоростей прохождения продольных волн в диапазоне 3750 м/сек до 4600 м/сек.

### **3.5 Построение геолого-геомеханической модели массива горных пород в районе целиков между шахтными полями**

Вся полученная и подготовленная информация подгружалась в Проект, который создавался в пакете для геологического моделирования IRAP RMS. Согласно геологическому описанию по разрезу выделены следующие толщи: пестроцветная, терригенно-карбонатная, соляно-мергельная, покровная каменная соль, сильвинитовая и карналитовая зоны, подстилающая каменная соль. В модели воспроизведена переходная толща по первому встреченному прослою каменной соли.

Итоговая геологическая модель содержит 10 млн. ячеек, способ разбиения – пропорциональный. Средний размер элемента по вертикали 0.25 м, по горизонтали – 50 м. С привлечением дополнительных скважин появилась возможность построить модель распределения основного параметра – скорости пробега продольной волны  $V_p$  [39].

Как результат, построено трехмерное распределение скорости продольной волны  $V_p$  в районе целиков СКРУ-1 – СКРУ-2 – СКРУ-3 (рисунок 3.17), которое позволяет получить распределение упругих и прочностных свойств в трехмерной модели. Чёрным цветом показана граница шахтного поля СКРУ-2.

На рисунке 3.18 в качестве примера представлено распределение параметра  $V_p$  в широтном направлении вдоль скважин 121, 141с, 123, 215, 124, 216, 130, 217. В соответствии с полученными статистическими зависимостями красным цветом показано распределение в данных скважинах модуля упругости, чёрным – предела прочности.

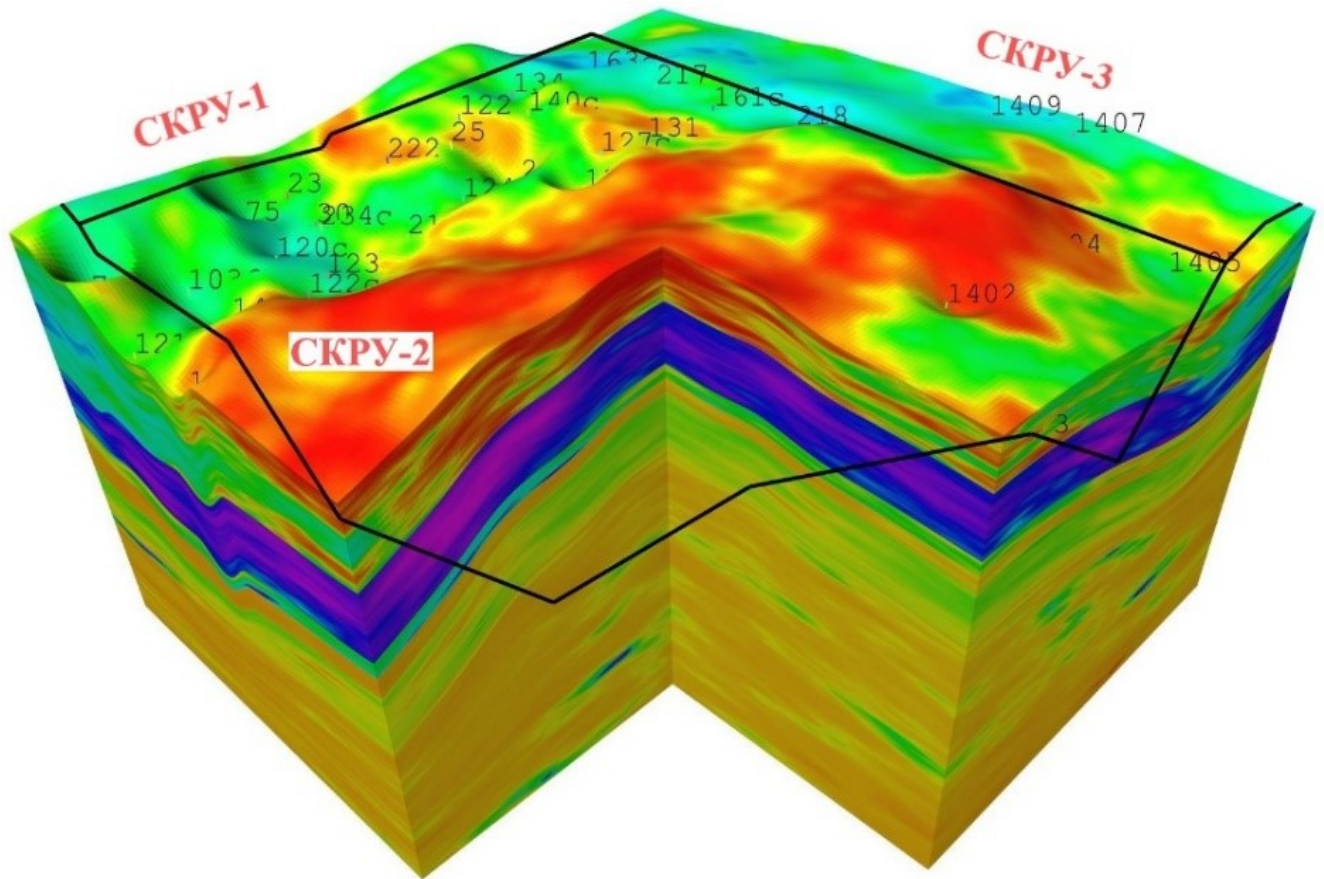


Рисунок 3.17 – 3D распределение скорости продольной волны  $V_p$   
в геолого-геомеханической модели

В последующем, по расчетным разрезам вдоль профильных линий № 1 и № 2, по которым имеются результаты маркшейдерско-геодезических наблюдений, также получено распределение параметра  $V_p$ .

Распространение параметра производилась методами геостатистики, в частности методом крайгинга в совокупности с методом условного моделирования для воссоздания естественной изменчивости моделируемого параметра. Подбор параметров осуществлялся на основе вариограммного анализа после нормализации данных [39].

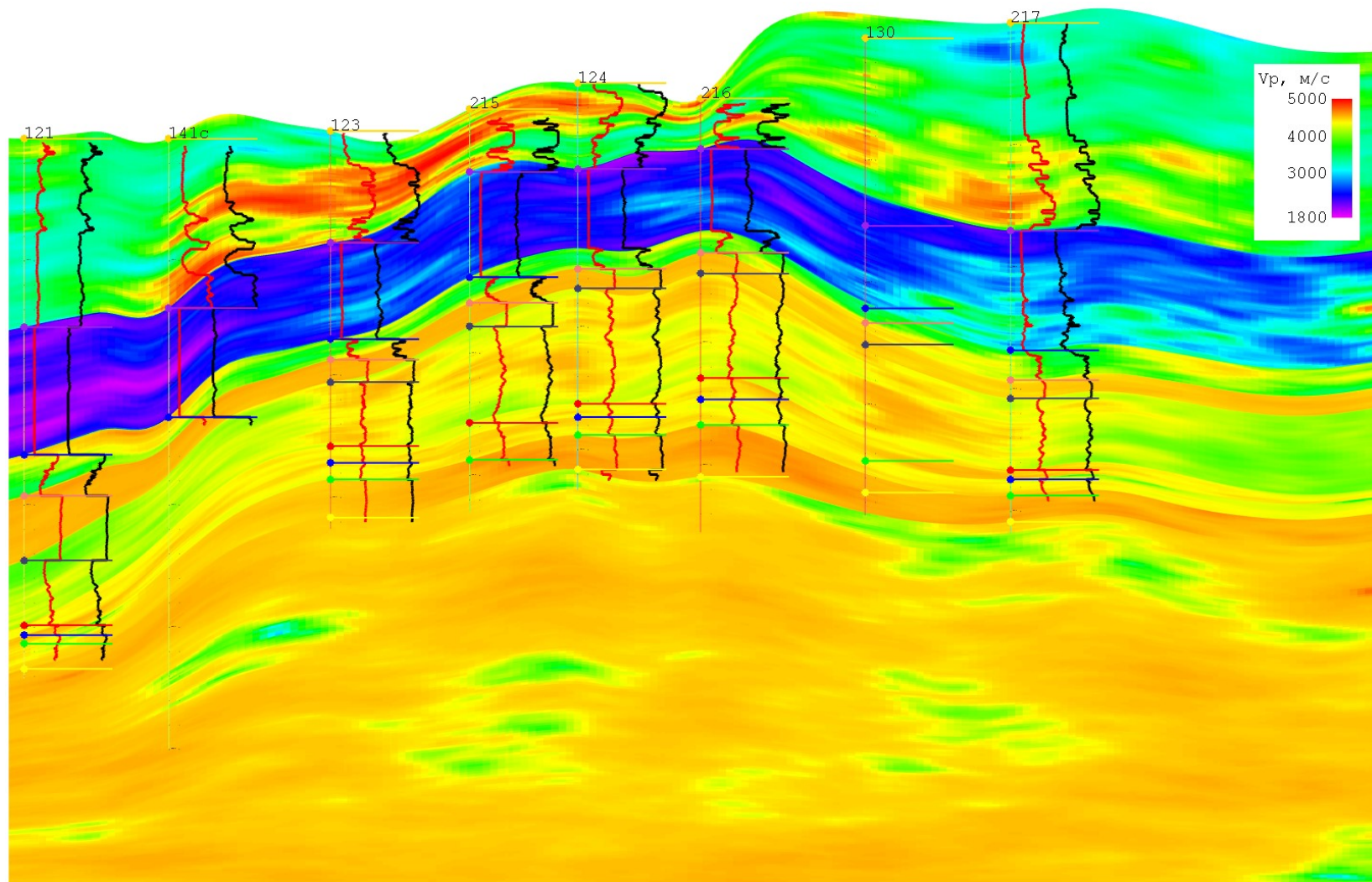


Рисунок 3.18 – Распределение параметра  $V_p$  вдоль разреза скважин и соответствующее распределение модуля упругости и прочности в скважинах

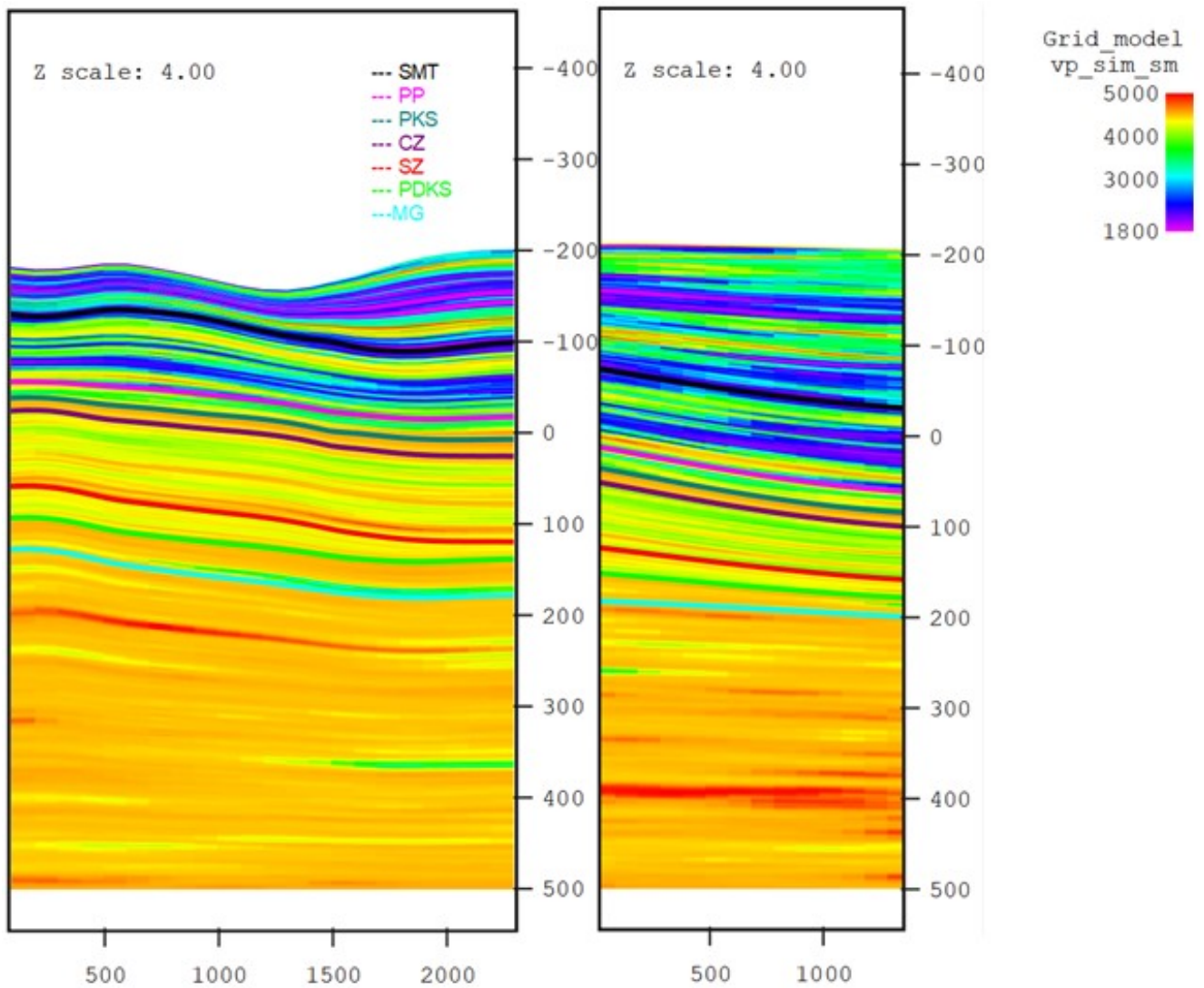


Рисунок 3.19 – Распределение скорости продольной волны по расчетным разрезам вдоль профильных линий № 1 и № 2

Пример получения распределения модуля упругости представлен на рисунке 3.20. В совокупности полученная зависимость между статическими и динамическими параметрами по результатам испытаний горных пород и распределение скорости продольной волны в скважине по результатам ГИС позволяет получить распределение модуля упругости и предела прочности на одноосное сжатие на всю глубину исследования, тем самым можно получить распределение физико-механических свойств в массиве вблизи скважины. Проведя распределение свойств в массиве с использованием методов математической

статистики и данных геологии, строится уже геолого-геомеханическая модель исследуемого участка массива горных пород.

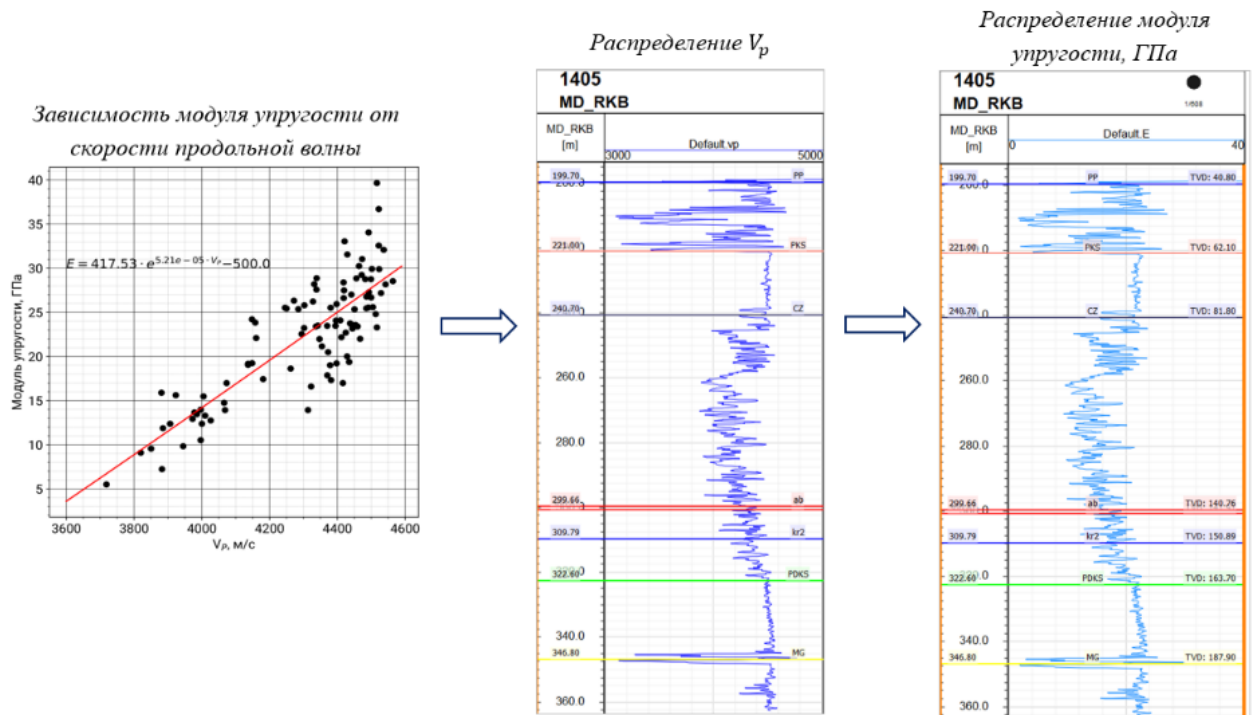


Рисунок 3.20 –Пример получения распределения модуля упругости

Таким образом, построены распределения модуля упругости и предела прочности вдоль расчётного разреза в районе междушахтного целика СКРУ-1 – СКРУ-2 (рисунки 3.21-3.22) и междушахтного целика СКРУ-2 – СКРУ-3 (рисунки 3.23-3.24). Геолого-геомеханическая модель также учитывает фактическую геометрию горных выработок.

Данные виды работ обосновывают второе защищаемое положение: для получения распределения физико-механических свойств горных пород в массиве необходимо комплексное использование полученных зависимостей, результатов геофизических исследований скважин и геологической информации, что позволяет создать основу для численного моделирования напряженно-деформированного состояния массива горных пород.

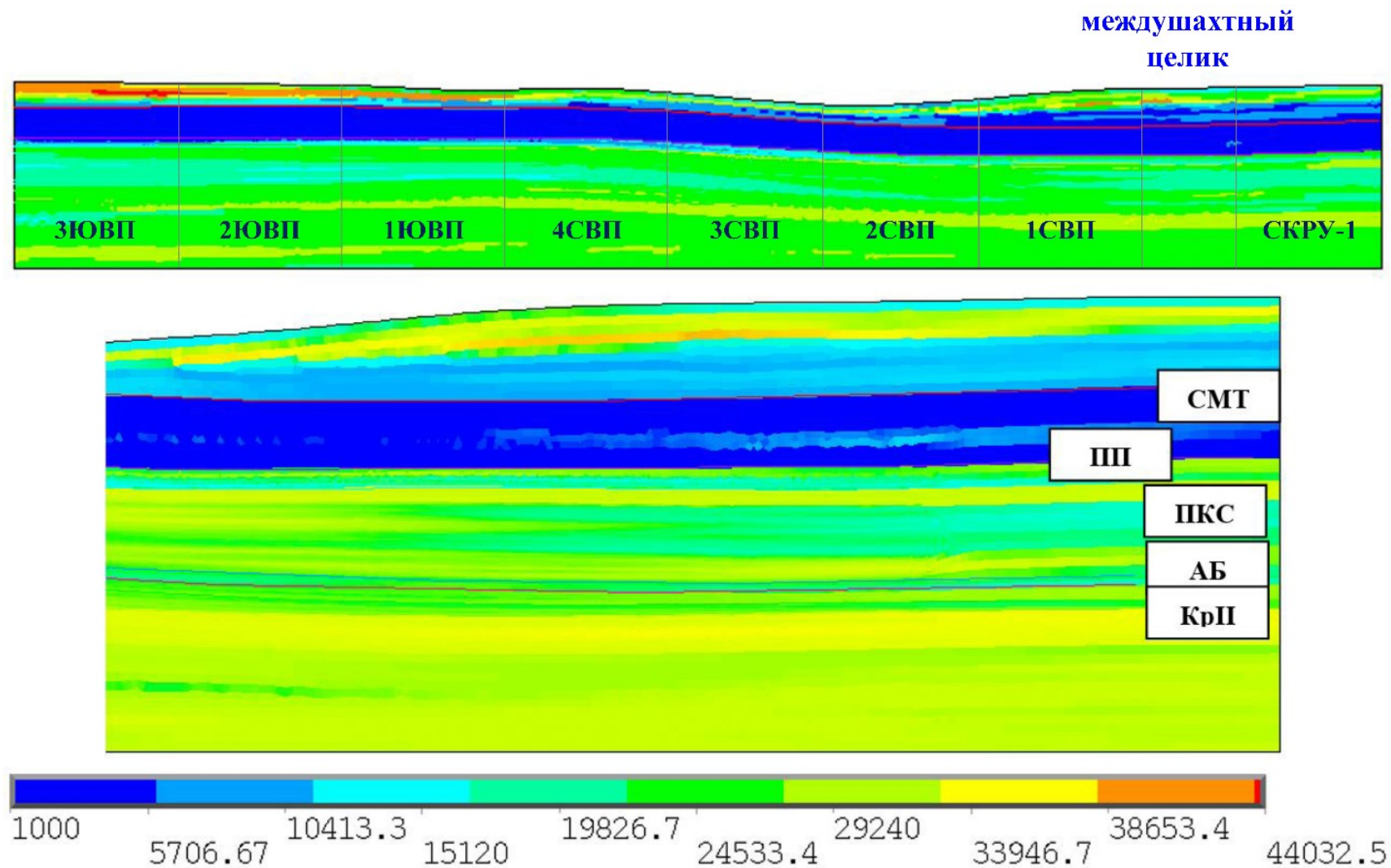


Рисунок 3.21 – Распределение модуля упругости вдоль расчётного разреза в районе междушахтного целика СКРУ-1 – СКРУ-2 ( $E$ , МПа)



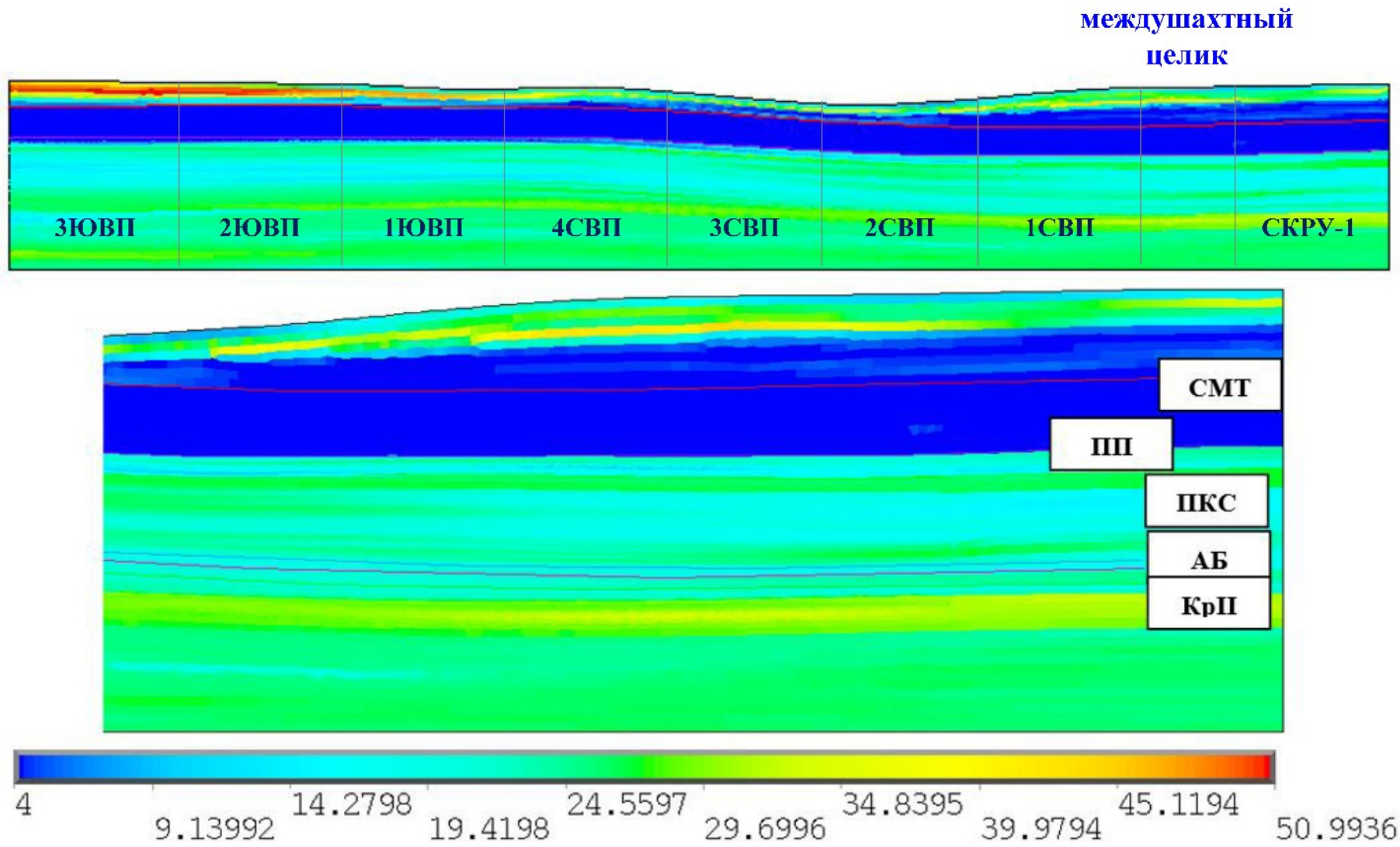


Рисунок 3.22 – Распределение предела прочности на сжатие вдоль расчётного разреза в районе междушахтного целика СКРУ-1 – СКРУ-2 ( $\sigma_{сж}$ , МПа)

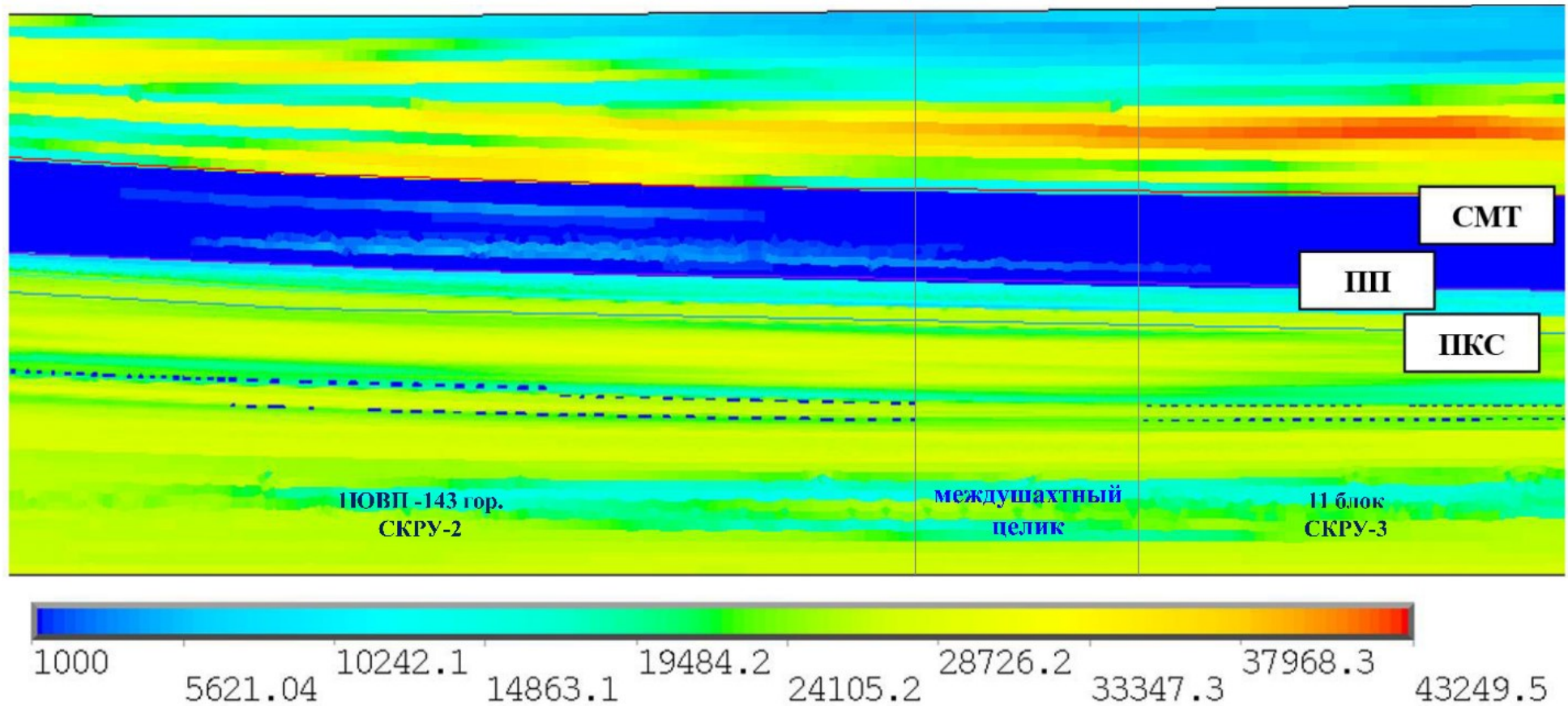


Рисунок 3.23 – Распределение модуля упругости вдоль расчётного разреза в районе междушахтного целика СКРУ-2 – СКРУ-3 ( $E$ , МПа)

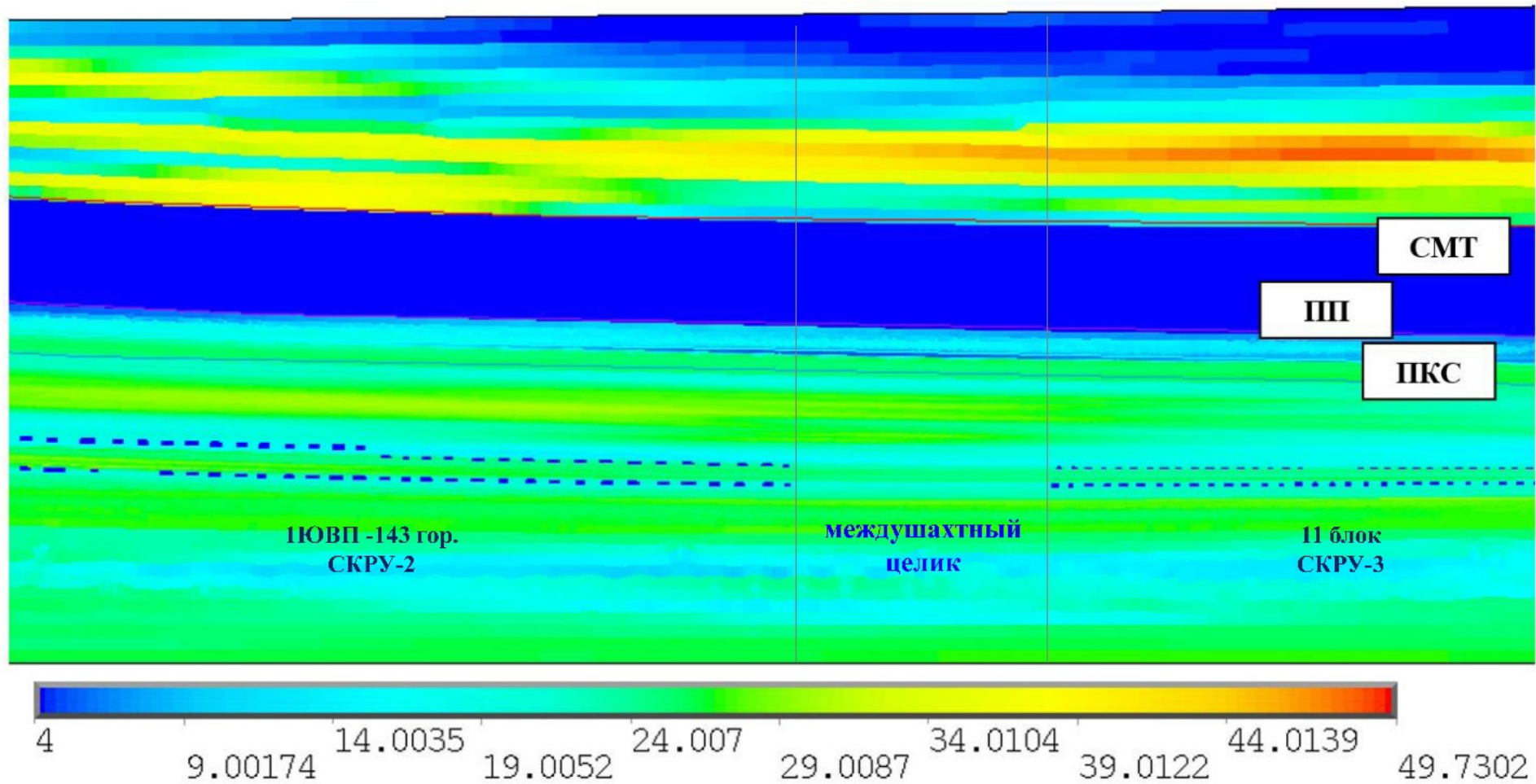


Рисунок 3.24 – Распределение предела прочности на сжатие вдоль расчётного разреза в районе междушахтного целика СКРУ-2 – СКРУ-3 ( $\sigma_{сж}$ , МПа)

### 3.6 Выводы по Главе 3

1. Разработаны основные принципы создания геолого-геомеханической модели, основанной на комплексном использовании данных каротажа солеразведочных скважин и зависимостей, полученных в результате испытаний кернового материала.

2. На основе результатов испытаний горных пород получены математические зависимости между статическими и динамическими физико-механическими свойствами соляных пород. Впервые для соляных пород ВКМКС получены зависимости предела прочности, модуля упругости, сцепления и угла внутреннего трения от скорости продольной волны. Полученные зависимости подтверждают первое защищаемое положение.

3. В результате обработки данных акустического каротажа солеразведочных скважин с использованием полученных корреляционных зависимостей между скоростью продольной волны и физико-механическими свойствами соляных пород в ПО «IRAP RMS» построена трехмерная геолого-геомеханическая модель ВЗТ участка шахтных полей между СКРУ-1 – СКРУ-2 и СКРУ-2 – СКРУ-3. Полученная модель отражает распределение физико-механических свойств в породах ВЗТ в соответствии с полученными зависимостями и может быть использована для создания геомеханической модели участка месторождения. Разработанная трехмерная геолого-геомеханическая модель ВЗТ подтверждает второе защищаемое положение.

## ГЛАВА 4 ОЦЕНКА И ПРОГНОЗ НДС МАССИВА ГОРНЫХ ПОРОД И МЕЖДУШАХТНЫХ ЦЕЛИКОВ СКРУ-1 – СКРУ-2 И СКРУ-2 – СКРУ-3

### 4.1 Конечно-элементные схемы и особенности расчетов параметров НДС массива горных пород в районе междушахтных целиков. Параметрическое обеспечение моделей

Для определения параметров деформирования массива в районе междушахтных целиков СКРУ-1 – СКРУ-2 и СКРУ-2 – СКРУ-3 было выполнено крупномасштабное математическое моделирование напряженно-деформированного состояния данного участка. Математическое моделирование на состояние 2020 г. и на период до 2031 г. выполнялось в конечно-элементном программном комплексе Ansys.

Для прогноза НДС на основе геолого-геомеханической модели в ПО Ansys была создана модель массива на основе геолого-геомеханической модели вдоль двух расчетных профилей, проходящих по профильной линии №1 (проходит через междушахтный целик СКРУ-1 – СКРУ-2) и профильной линии №2 (проходит через междушахтный целик СКРУ-2 – СКРУ-3), т.е., соответственно, меридиональный и широтный разрезы. Положение разрезов показано на рисунке 4.1. Таким образом, были построены две отдельные крупномасштабные расчётные схемы. Каждая расчётная схема учитывала основное геологическое строение всех основных толщ массива. При создании каркаса геомеханической модели использовалось пространственное расположение стратиграфических горизонтов, полученных по результатам обработки материалов ГИС скважин, имеющихся геологических материалов, т.е. использовались результаты построенной геолого-геомеханической модели. На рисунке 4.2 показана детальная конечно-элементная схема на горизонте промышленных пластов, а на рисунках 4.3-4.6 – полные конечно-элементные модели и их фрагменты вдоль моделируемых, соответственно, широтного и меридионального разрезов.

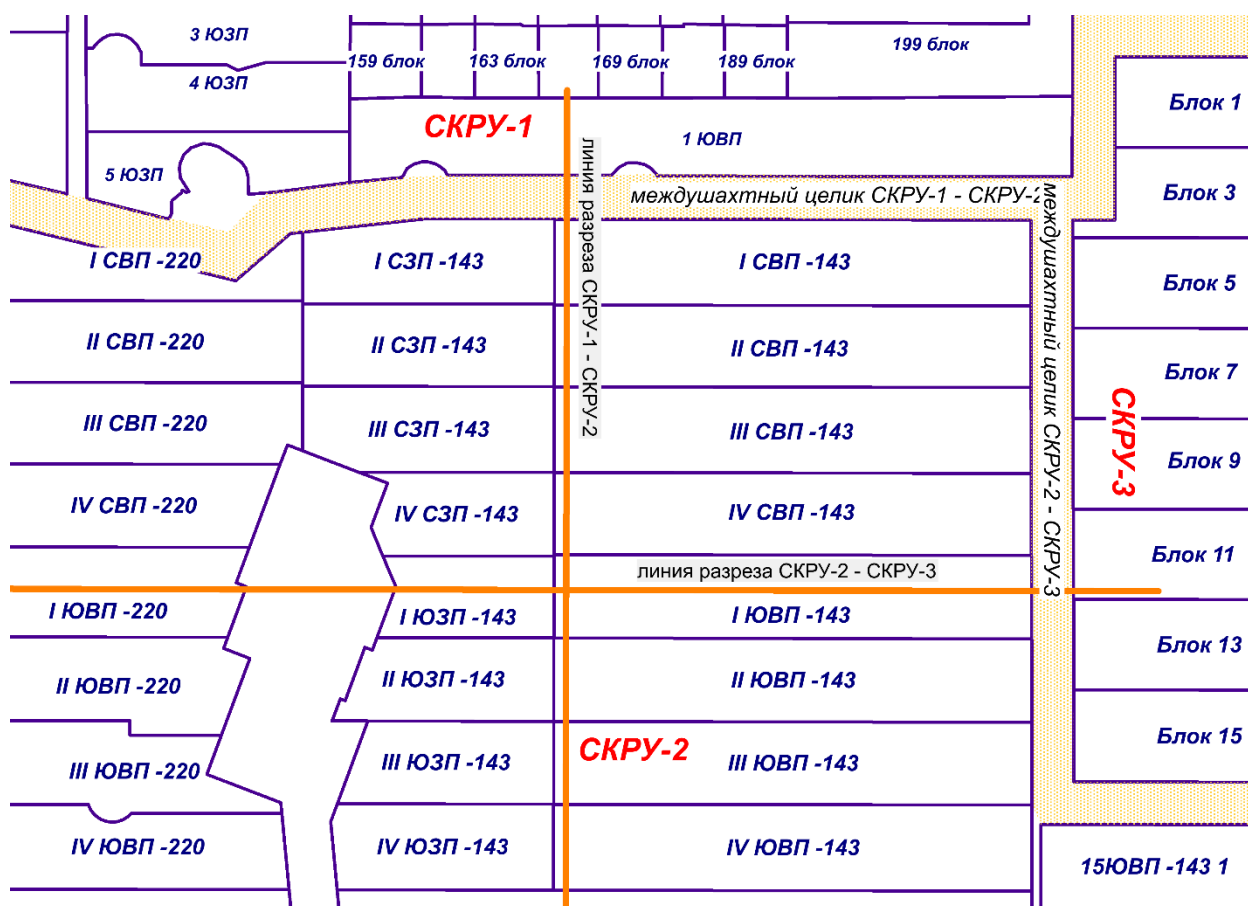


Рисунок 4.1 – Положение линий разрезов

Модуль упругости, прочность на одноосное сжатие определялись по корреляционным зависимостям, полученным в Главе 3.

В рамках данной работы решалась упругая задача. Отметим, что были предприняты попытки решения упруго-пластической задачи при условии прочности Кулона-Мора, однако они не увенчались успехом, поскольку итерационный процесс часто не сходиллся вследствие очень большого числа элементов – порядка 1 400 000 в каждом расчетном разрезе и весьма подробной дискретизации расчетной области в системе «целики – камеры». В тех случаях, когда удавалось достичь сходимости итерационного процесса, полученные зоны разрушения оказывались аналогичными условным зонам разрушения, полученным из упругого решения.

В связи с вышеизложенным, основное внимание было уделено анализу возникающих «условных зон разрушения» (по Н. С. Булычеву [11]), полученных на основе упругого решения, в которое вводились критерии разрушения.

Отметим также, что в крупномасштабном моделировании, успешно развиваемом специалистами ГИ УрО РАН (Барях А. А. и др.), система «целики – камеры» также не моделируется. Данная система заменяется эквивалентным слоем выработанного пространства, реологические параметры которого подбираются на основе нарастания кривых оседаний земной поверхности [7].

Расчет напряженно-деформированного состояния соляного массива выполнялся для условий плоской деформации. Моделирование отработки продуктивных пластов выполнялось в два шага. На первом шаге задавались граничные условия, и рассчитывалось исходное поле напряжений в нетронутым массиве горных пород с учетом гравитационной нагрузки.

На втором шаге моделировалась отработка камер путем процедуры деактивации («удаления») конечных элементов. Последовательность и сроки отработки камер соответствовали реальным данным. Перемещения, вызванные отработкой камер, получаются путем вычитания из итоговых перемещений результатов расчета первого шага.

Для анализа деформационных процессов выполнялась оценка степени нарушенности слоев массива горных пород, для чего выделялись слои, в которых принятый критерий разрушения превышает критическое значение. Формально это может соответствовать ситуации, когда возникает зона разрушения, через которую надсолевые пресные воды могут попасть в выработанное пространство рудника и привести к затоплению. Оценка условий разрушения горных пород выполнена на основе анализа распределения критерия разрушения породы (формула (4.1)) следующего вида:

$$K_t = \sigma_1 / [\sigma_1]. \quad (4.1)$$

где  $K_t$  – показатель нарушенности,

$\sigma_1$  – первое главное напряжение,

$[\sigma_1]$  – предельное значение первого главного напряжения.

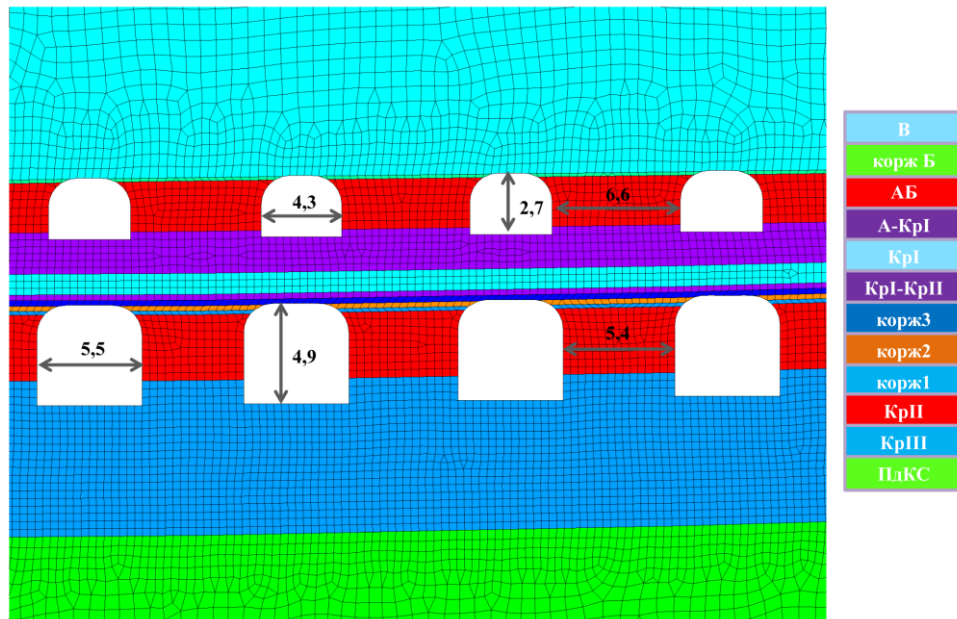


Рисунок 4.2 – Детальный фрагмент конечно-элементной схемы на горизонте промышленных пластов

Величина  $K_t \geq 1.0$  означает разрушение горной породы, что в физическом смысле говорит о начале образования трещин сдвига. Предельное значение первого главного напряжения определяется согласно принятого критерия разрушения. В механике горных пород традиционно используются критерии разрушения Кулона-Мора и Друкера-Прагера. При расчете критерия  $K_t$  использовался критерий Кулона-Мора (формула (4.2)) для придания расчетам определенного запаса надежности:

$$[\sigma_1] = \sigma_{сж} + \sigma_3 \cdot \frac{1 + \sin\varphi}{1 - \sin\varphi}, \quad (4.2)$$

где  $\sigma_3$  – минимальное главное напряжение;

$\sigma_{сж}$  – прочность на одноосное сжатие (с учетом коэффициента перехода к длительной прочности 0,3);

$\varphi$  – угол внутреннего трения.

Параметры  $\sigma_{сж}$  и  $\varphi$  принимались на основании полученных зависимостей между статическими и динамическими геомеханическими характеристиками, т.е. на основе разработанной геолого-геомеханической модели.



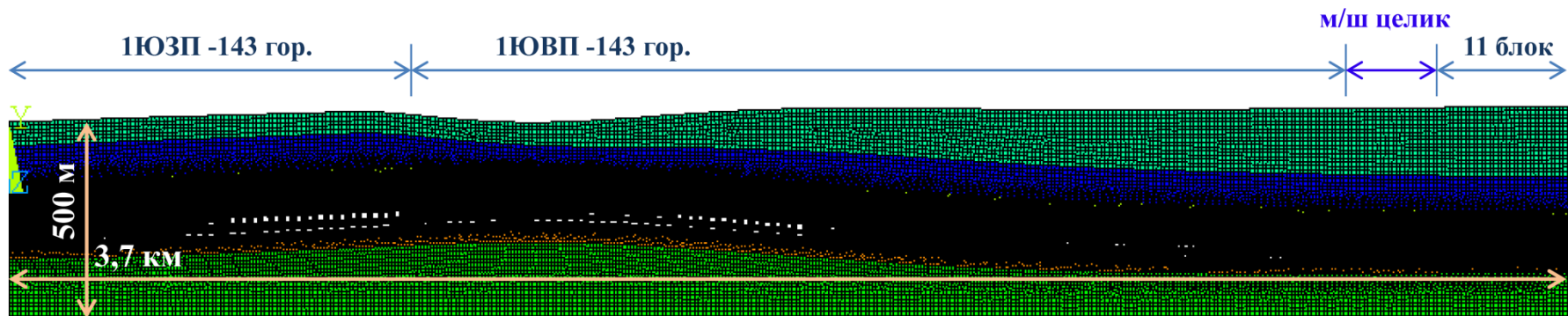


Рисунок 4.3 – Полная конечно-элементная схема вдоль широтного расчётного разреза (СКРУ-2 – СКРУ-3)

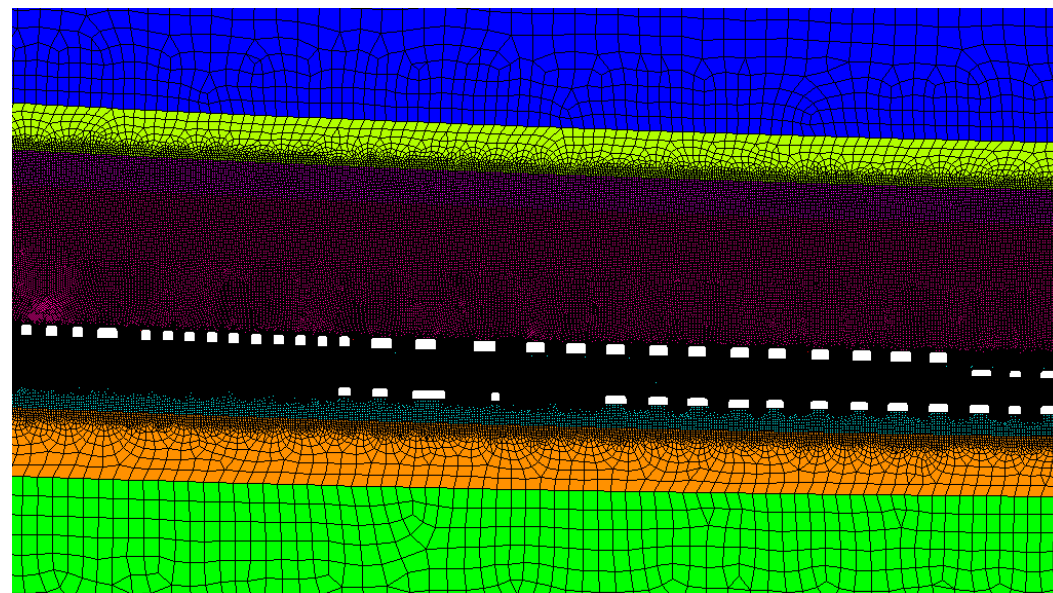


Рисунок 4.4 – Фрагмент конечно-элементной схемы на горизонте промышленных пластов

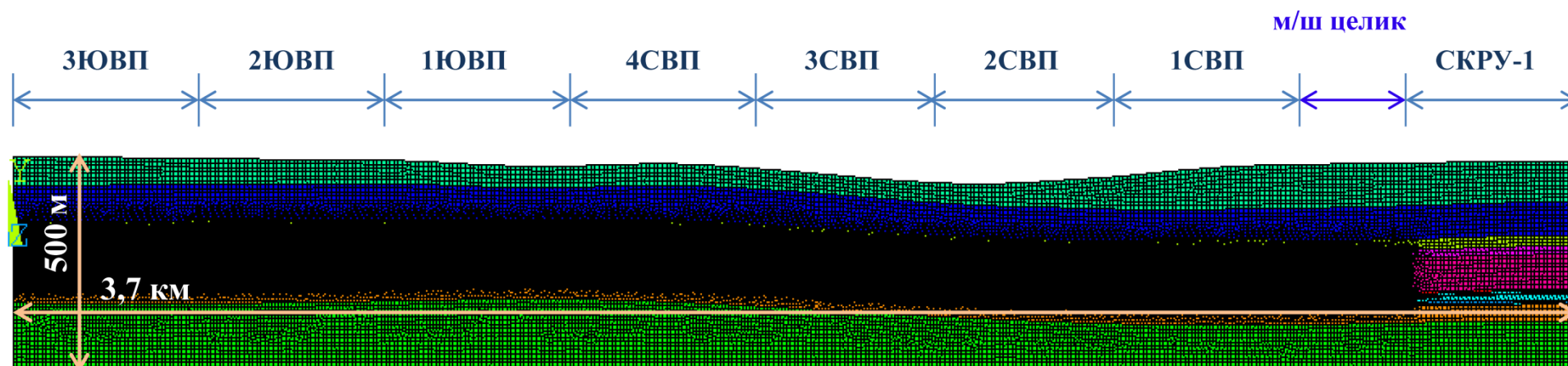


Рисунок 4.5 – Полная конечно-элементная схема вдоль меридионального расчётного разреза (СКРУ-1 – СКРУ-2)

97

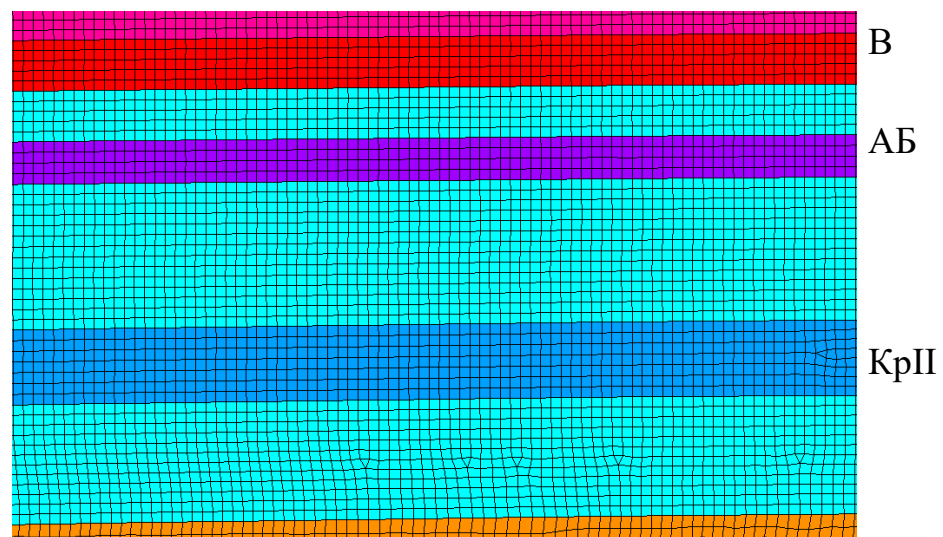


Рисунок 4.6 – Фрагмент конечно-элементной схемы на горизонте промышленных пластов одной из панелей

#### **4.2 Расчеты параметров НДС массива горных пород и земной поверхности при оставлении целиков между шахтными полями СКРУ-1 – СКРУ-2 и СКРУ-2 – СКРУ-3. Сравнение результатов расчетов с результатами наблюдений**

Расчеты напряженно-деформированного состояния полностью основываются на параметрах, заложенных в созданную геолого-геомеханическую модель массива вблизи междушахтных целиков, т.е. параметры модели определены геологическими, геомеханическими и геофизическими исходными данными, а также зависимостями между статическими и динамическими геомеханическими характеристиками. Построенная модель отражает состояние массива горных пород и земной поверхности на начало отработки участка месторождения, т.е. на 1974-1986 гг.

Ключевым является то, что полученные из геолого-геомеханической модели входящие геомеханические параметры отражают состояние нетронутого горными работами массива. Кроме этого, нам не известны их изменения спустя 40-50 лет с начала отработки. Весьма важным, но достаточно неопределенным является тот момент, что были получены зависимости для образцов, которые можно с успехом использовать при расчетах деформаций пород вокруг камер, устойчивости целиков и отдельных горных выработок, но, для того, чтобы моделировать деформации массивов пород огромных размеров, требуется вводить масштабный фактор.

В связи с вышеизложенным, для получения реальных графиков оседаний земной поверхности геомеханические параметры, прежде всего модуль упругости, были значительно уменьшены (таблица 4.1).

Для того, чтобы оценить свойства массива горных пород применяют коэффициенты структурного ослабления  $K_{стр}$ . Такие коэффициенты отражают степень уменьшения величин физико-механических свойств горных пород массива по сравнению с величинами, полученными по результатам испытаний образцов керна. Как правило, практическое значение имеет коэффициент структурного ослабления, который определяется для упругих и прочностных показателей –

модуля упругости, сцепления или предела прочности на сжатие. Так, Бенявским З. Т. [10] было получено, что величину коэффициента структурного ослабления можно оценить по результатам испытаний на прочность породных образцов различных размеров с различными прочностными и упругими характеристиками. Согласно результатам испытаний горных пород, при увеличении размеров образца прочность уменьшается, асимптотически приближаясь к некоторой величине, которая характеризует свойства массива. Стоит отметить, что предельный размер образца, при котором достигается асимптотическая прочность, варьируется для разных пород от 1,0 до 1,5 м. В итоге была получена зависимость изменения коэффициента структурного ослабления от прочности горной пород на одноосное сжатие. Согласно данной зависимости, можно увидеть, что более крепкие породы в меньшей степени снижают свою прочность. На рисунке 4.7 представлена зависимость асимптотического уменьшения прочности в массиве по отношению к образцу, составленная по данным Бенявского З. Т. [10].

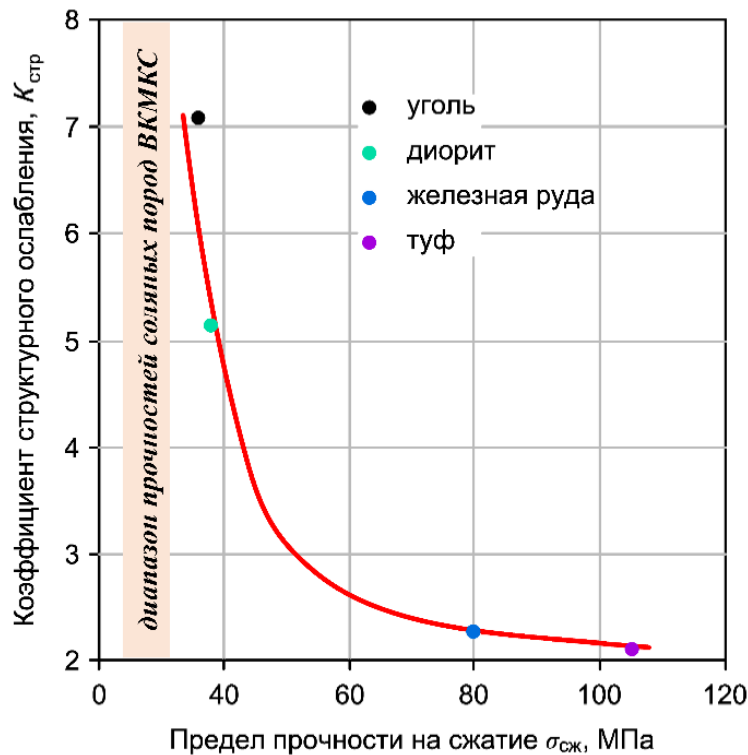


Рисунок 4.7 – Коэффициент структурного ослабления для некоторых типов горных пород по данным Бенявского З. Т. [10]

Если ориентироваться на данный график, то получается, что степень уменьшения прочностных и деформационных свойств массива пород больших расчетных фрагментов калийного месторождения относительно керновых испытаний должна уменьшиться в 10-20 раз.

Отметим, что опыты Бенявского З. Т. в определенной степени не соответствуют результатам испытаний соляных пород, согласно которым масштабный эффект в них практически не проявляется [10]. Однако, следует отметить, что испытания соляных пород ограничивались, чаще всего, размером не больше  $200 \times 400$  мм, что никак не сопоставимо с масштабами конечно-элементной модели размером  $3,7 \times 0,5$  км.

Отметим также, что в крупномасштабном моделировании, успешно развиваемом специалистами ГИ УрО РАН (Барях А. А. и др.), прочностные и деформационные характеристики массива также весьма существенно снижены относительно результатов керновых испытаний [4, 17].

В связи с вышеизложенным, в прочностные и деформационные свойства массива пород, полученные из геолого-геомеханической модели, вводился коэффициент структурного ослабления. На первом этапе он принимался равным 15. На последующих этапах он еще корректировался, но уже незначительно, из условия соответствия результатам инструментальных наблюдений (таблица 4.1, рисунки 4.8-4.9).

В то же время, в данном случае нас интересует больше развитие деформационных процессов в ВЗТ в районе целиков, за что отвечают деформационные параметры, которые, в свою очередь, изменены не столь существенно.

Таблица 4.1 – Понижающие коэффициенты для модуля упругости, принятые для прогноза деформационных процессов массива горных пород и земной поверхности

Толща	На 2020 г.	При прогнозе на 5 лет относительно 2020 г.	При прогнозе на 10 лет относительно 2020 г.
Четвертичные отложения (Q)	0,07	1,0	1,0
Пестроцветная толща (ПЦТ)	0,07	1,0	1,0
Терригенно-карбонатная толща (ТКТ)	0,07	1,0	1,0
Соляно-мергельная толща (СМТ)	0,07	0,9	0,8
Переходная пачка (ПП)	0,07	0,9	0,8
Покровная каменная соль (ПКС)	0,07	0,9	0,8
Карналлитовая зона (КЗ)	0,07	0,9	0,8
Сильвинитовая зона (СЗ)	0,07	0,9	0,8
Подстиляющая каменная соль (ПдКС)	0,07	1,0	1,0

Для уверенного решения задачи оценки снижения прочностных и деформационных свойств в ходе развития деформационных процессов требуется пробурить скважину в зоне оседаний, провести в ней комплекс ГИС, отобрать керн, провести аналогичные представленным в Главе 3 исследований и получить новые зависимости между статическими и динамическими геомеханическими параметрами. Однако такой подход представляется совершенно нереальным, в связи с чем изменение физико-механических свойств было принято на основании анализа развития данных по оседаниям земной поверхности.

Натурные данные соответствуют фактическому положению земной поверхности и представляют из себя накопленные оседания реперов профильных линий. Ниже представлены графики нарастания суммарных оседаний по реперам по расчётным линиям разреза вдоль рассматриваемых междушахтных целиков

(рисунки 4.8-4.9). В соответствии с данными графиками корректировалось входящее в конечно-элементную модель параметрическое обеспечение на 2020 г., 2026 г. и 2031 г., прежде всего упругие параметры. Так, на 2026 г. снижение упругих свойств составляло 10% относительно 2020 г., а на 2031 г. снижение составляло 20% относительно 2020 г. При этом, согласно данным расчета условных зон разрушения, разрушение не затрагивало верхние слои разреза, т.е. четвертичные отложения, соляно-мергельную толщу и терригенно-карбонатную толщу, в связи с чем понижающие коэффициенты для данных пород не менялись относительно 2020 г.

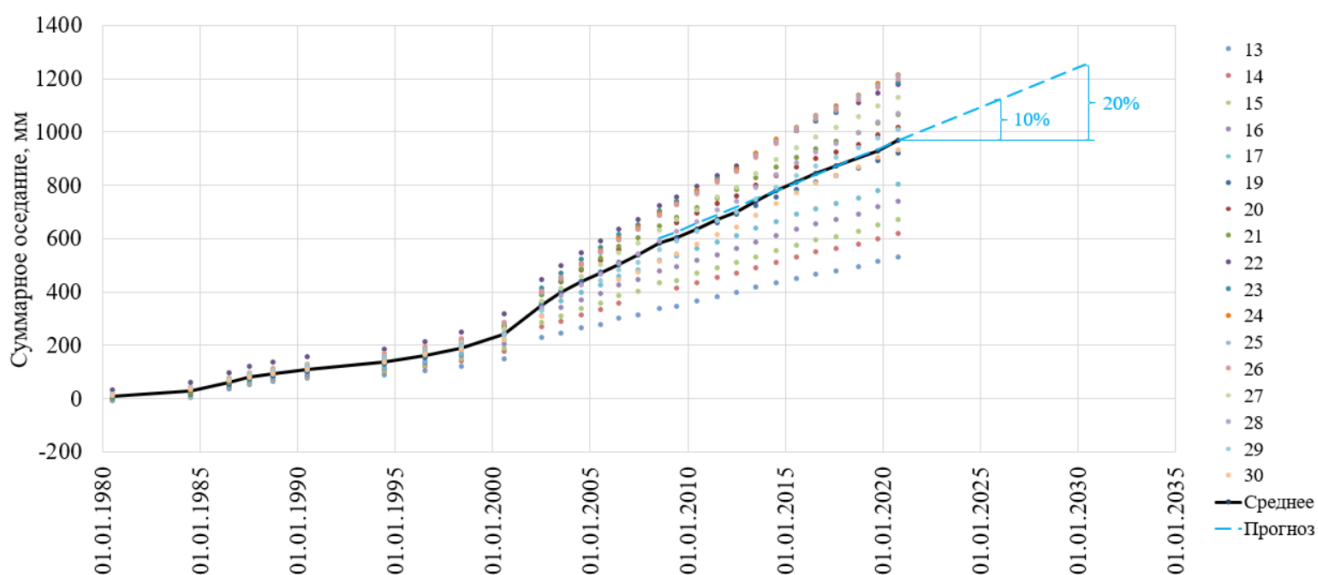


Рисунок 4.8 – Рост суммарных оседаний по реперам профильной линии № 1 по расчётной линии разреза вдоль междушахтного целика СКРУ-1 – СКРУ-2

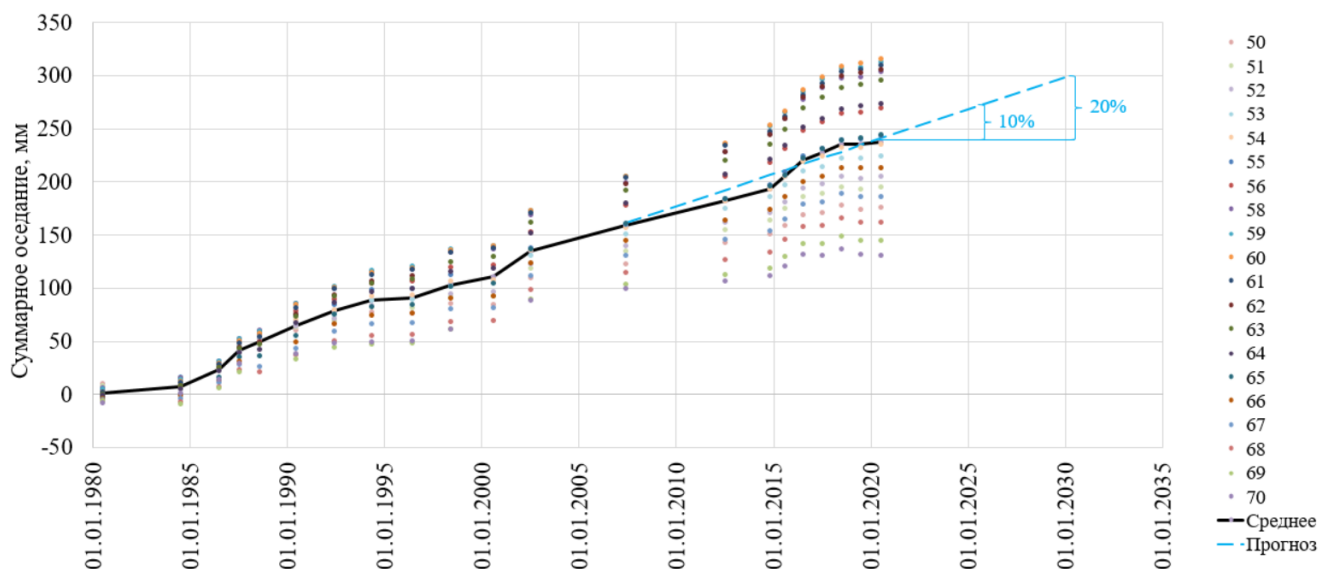


Рисунок 4.9 – Рост суммарных оседаний по реперам профильной линии № 2 по расчётной линии разреза вдоль междушахтного целика СКРУ-2 – СКРУ-3

Можно увидеть, что процессы оседаний находятся в стадии развития, поскольку суммарные оседания со временем постепенно увеличиваются. Величины оседаний реперов по профильной линии № 1 больше, чем по профильной линии № 2, поскольку в отработку было задействовано большее количество пластов. Кроме этого, при расчете параметров НДС учитывается тот факт, что отработка со стороны СКРУ-3 начала выполняться только в последние годы, поэтому активная стадия реализации оседаний будет проявляться в ближайшее время.

### ***Результаты расчёта геомеханической модели в районе междушахтного целика СКРУ-2 – СКРУ-3***

Ниже представлены расчётные оседания земной поверхности на 2020 год, а также результаты инструментальных маркшейдерских измерений по профильной линии № 2 в районе междушахтного целика СКРУ-2 – СКРУ-3. Соответствие полученных расчётами оседаний замеренным оседаниям говорят об адекватности расчётной модели.



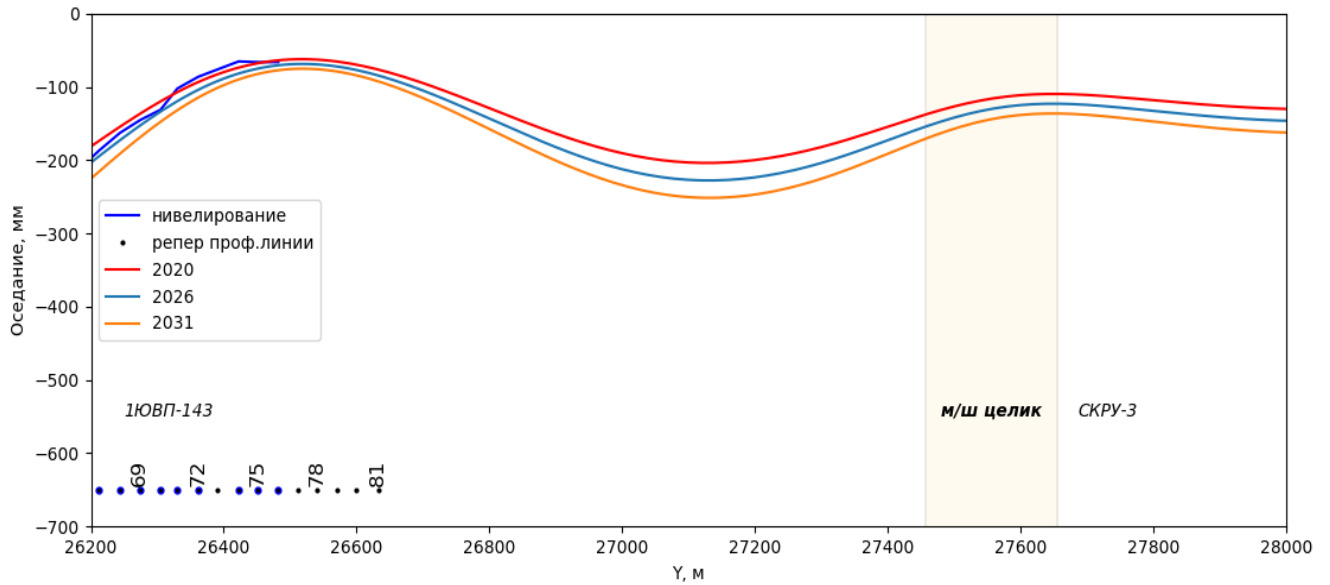


Рисунок 4.10 – Расчётные и замеренные оседания земной поверхности по профильной линии №2 в районе междушахтного целика СКРУ-2 – СКРУ-3 на 2020, 2026, 2031 год

Распределение критерия нарушенности  $K_t$  показано на рисунке 4.11.

Зоны повышенных значений критерия нарушенности не доходят до критических значений (1,0), сконцентрированы в середине ВЗТ и в середине целика СКРУ-2 – СКРУ-3 и сформированы как следствие развития деформационных процессов в краевой части мульды сдвижения от СКРУ-2 и СКРУ-3. В верхних слоях ВЗТ, в частности, в верхней части СМТ, критерий имеет еще более низкие значения (ниже 0,8), то есть подтверждается вывод предыдущих расчетов о том, что на данный момент состояние ВЗТ в районе целика СКРУ-2 – СКРУ-3 не вызывает опасений. Тем не менее, согласно расчётам именно в этой зоне будут в дальнейшем развиваться негативные деформационные процессы в массиве [40].

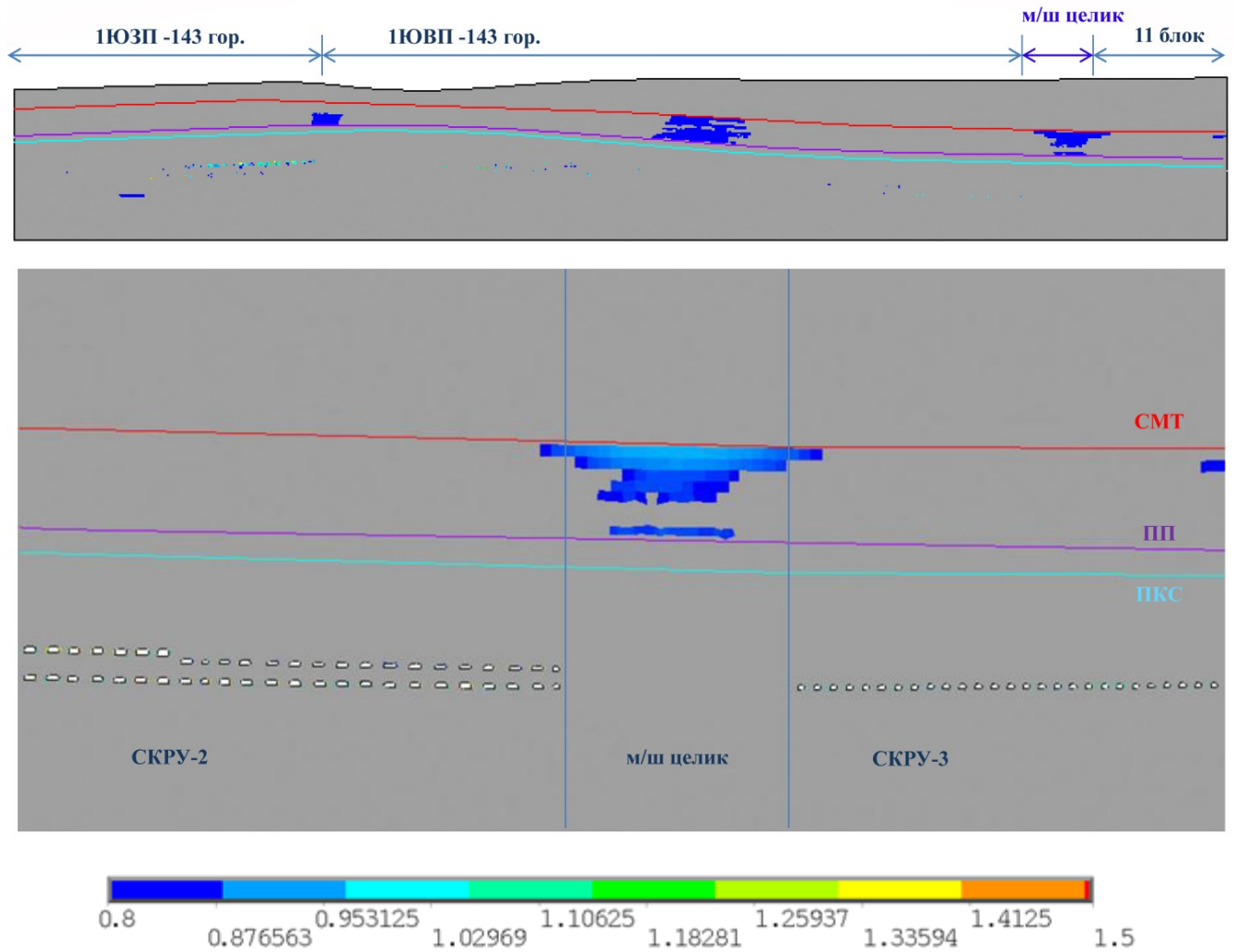


Рисунок 4.11 – Распределение критерия нарушенности  $K_t$  в расчетном разрезе на 2020 год

Виден хоть и незначительный, но закономерный рост областей с повышенными значениями  $K_t$  в слоях ВЗТ. Наиболее обширные зоны  $K_t$  возникают в верхних слоях СМТ. При этом, непосредственный анализ НДС пород вокруг камер показывает развитие со временем деформационных процессов вокруг них. Естественное соединение зоны деформаций вокруг камер возле краевых частей целика СКРУ-2 – СКРУ-3 с выявленной зоной повышенных деформаций в середине ВЗТ и в середине целика может со временем привести к негативным последствиям [40].

Для исключения негативного развития событий необходимо своевременное выполнение закладочных работ.

### **Результаты расчёта геомеханической модели в районе междушахтного целика СКРУ-1 – СКРУ-2**

Расчётные оседания земной поверхности на 2020 год соответствуют результатам инструментальных маркшейдерских измерений по профильной линии №1 в районе междушахтного целика СКРУ-1 – СКРУ-2, что говорит об адекватности расчетной модели (рисунок 4.12). Стоит также отметить, что расчётные скорости оседаний на земной поверхности соответствуют реальным скоростям на 2020 г, которые отвечают за весьма незначительное развитие оседаний земной поверхности на 2026 и 2031 годы, что и было получено в результате расчетов.

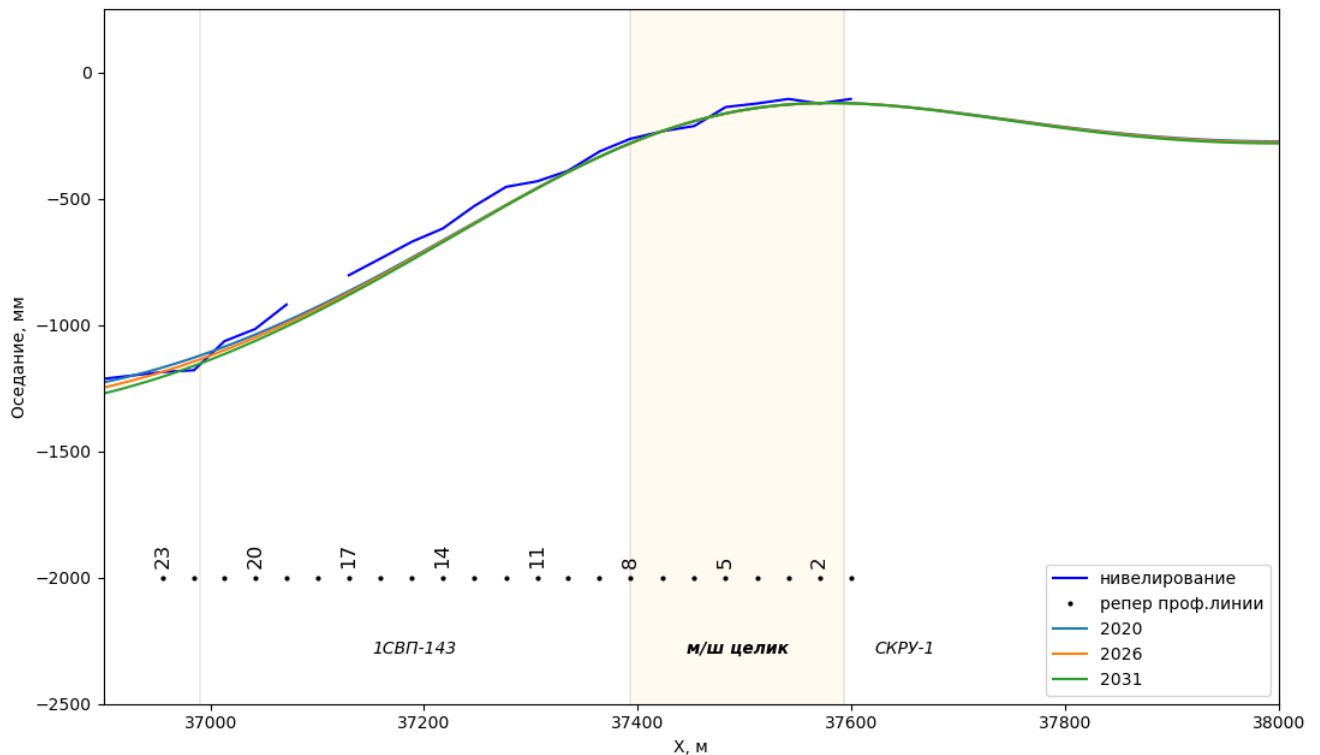


Рисунок 4.12 – Расчётные и замеренные оседания земной поверхности по профильной линии №1 в районе междушахтного целика СКРУ-1 – СКРУ-2 на 2020, 2026, 2031 год

Распределение критерия нарушенности  $K_t$  показано на рисунке 4.13. Отмечается существенно более значительное развитие деформационных процессов непосредственно в целике СКРУ-1 – СКРУ-2, нежели чем в целике СКРУ-2 –

СКРУ-3, что вполне объяснимо: запасы руды отработаны раньше и, соответственно, достигнутые оседания в районе целика СКРУ-1 – СКРУ-2 неизмеримо больше, чем в районе целика СКРУ-2 – СКРУ-3. При этом зоны повышенных значений критерия нарушенности превышают критическое значение (1,0), но не соединяются с выработанным пространством. Также зоны нарушенных пород наблюдаются выше ПКС, сконцентрированы в середине ВЗТ и в середине целика, что также можно объяснить развитием деформационных процессов в краевой части мульды сдвига от СКРУ-1 и СКРУ-2. Можно отметить весьма негативный характер развития деформационных процессов в ПКС и СМТ в сторону СКРУ-1.

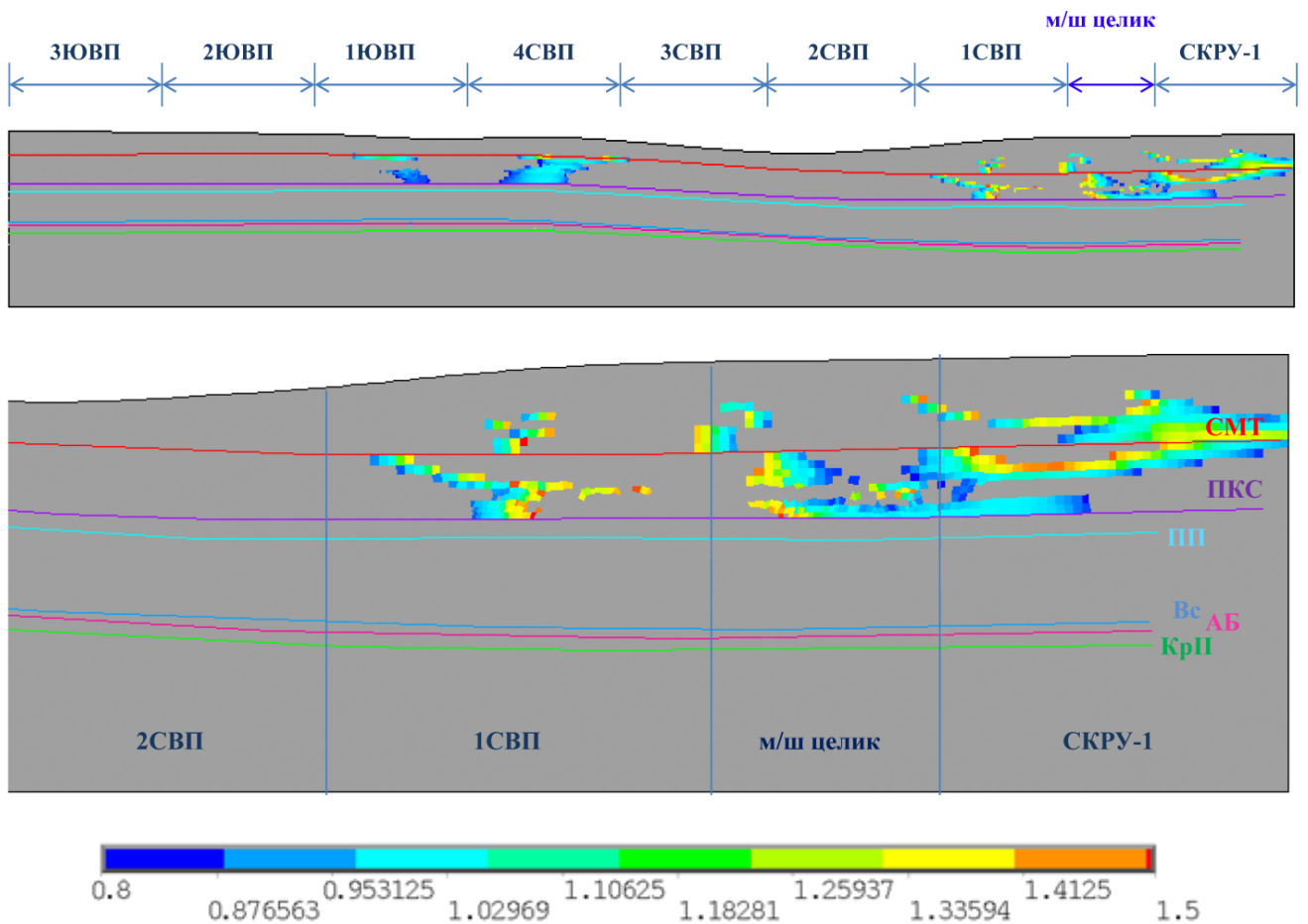


Рисунок 4.13 – Распределение критерия нарушенности  $K_t$  в расчетном разрезе на 2020 год

### **4.3 Прогноз развития деформационных процессов массива горных пород и земной поверхности при оставлении целиков между шахтными полями СКРУ-1 – СКРУ-2 и СКРУ-2 – СКРУ-3**

Для прогноза развития деформационных процессов также решалась задача в упругой постановке. В рамках данного решения основными параметрами, подлежащими калибровке, служат предел прочности и модуль упругости, которые также использовались для расчета фактического состояния массива и земной поверхности, и которые также определялись по полученным зависимостям между статическими и динамическими характеристиками горных пород.

Для оценки степени снижения геомеханических параметров при развитии деформационных процессов был проведён анализ нарастания оседаний реперов. Для конкретной профильной линии были определены скорости оседаний на рассматриваемый период времени. Так, например, в течение 2015-2020 гг. в пределах профильной линии № 1 средняя скорость нарастания оседаний составила 29-35 мм/год, в то время, как в пределах профильной линии № 2 – 4-8 мм/год. Принимая во внимание тот факт, что процессы оседаний приходятся на стадию развития, параметры при моделировании были подобраны таким образом, чтобы они соответствовали средним наблюдаемым скоростям оседаний. Кроме этого, необходимо учитывать, что со стороны СКРУ-3 очистные работы будут продвигаться в пределах исследуемого периода времени.

В связи с этим для прогноза деформационных процессов использовались понижающие коэффициенты для заложенных в геолого-геомеханическую модель свойств горных пород с учётом характера проявления деформационных процессов на земной поверхности. В таблице 4.1 представлены понижающие коэффициенты, принятые для прогноза деформационных процессов массива горных пород и земной поверхности.

На рисунках 4.14-4.16 показаны результаты прогнозирования деформационных процессов в районе СКРУ-2 – СКРУ-3.

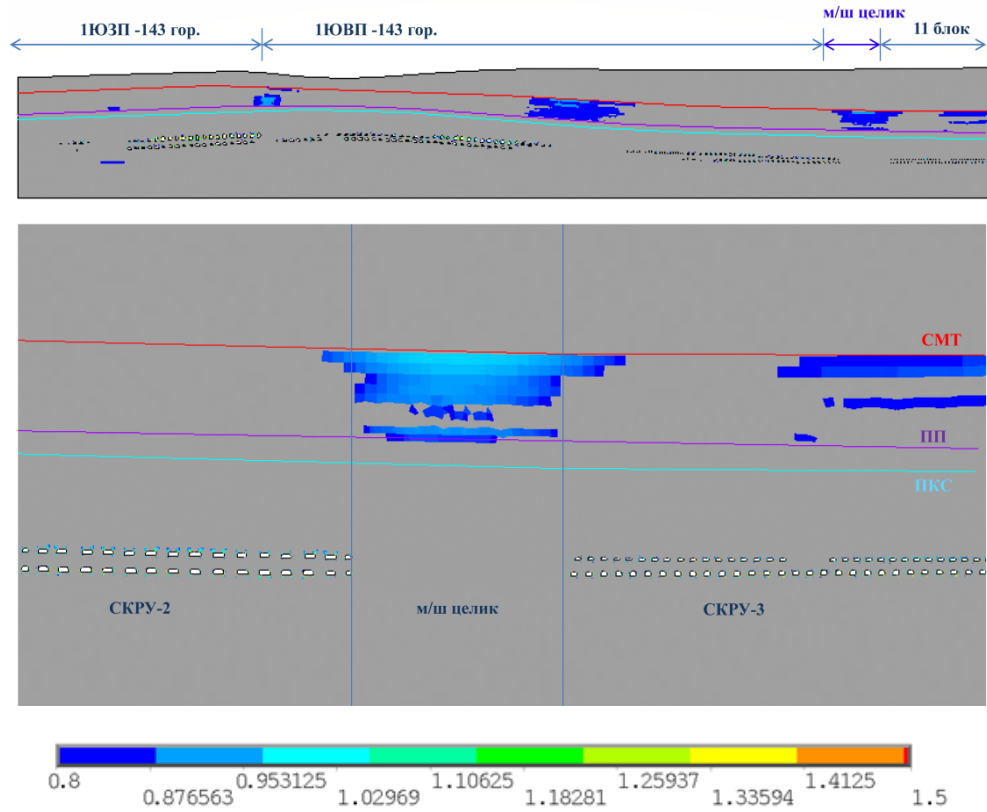


Рисунок 4.14 – Прогноз распределения критерия нарушенности  $K_t$  в районе междушахтного целика СКРУ-2 – СКРУ-3 на 2026 г.

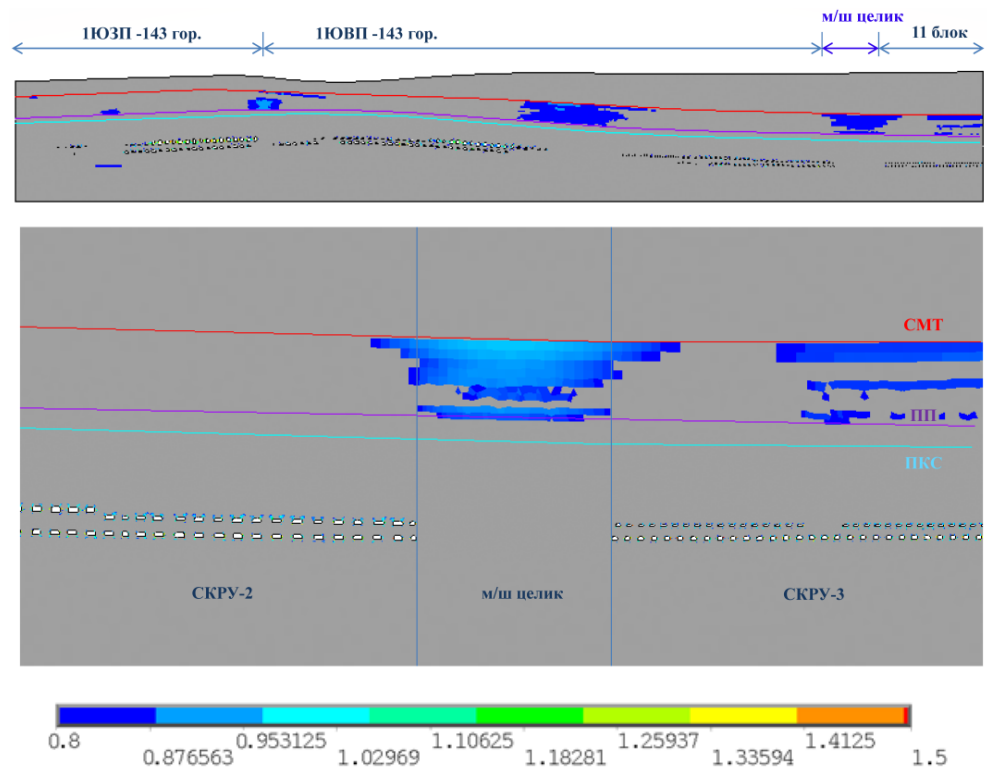


Рисунок 4.15 – Прогноз распределения критерия нарушенности  $K_t$  в районе междушахтного целика СКРУ-2 – СКРУ-3 на 2031 г.

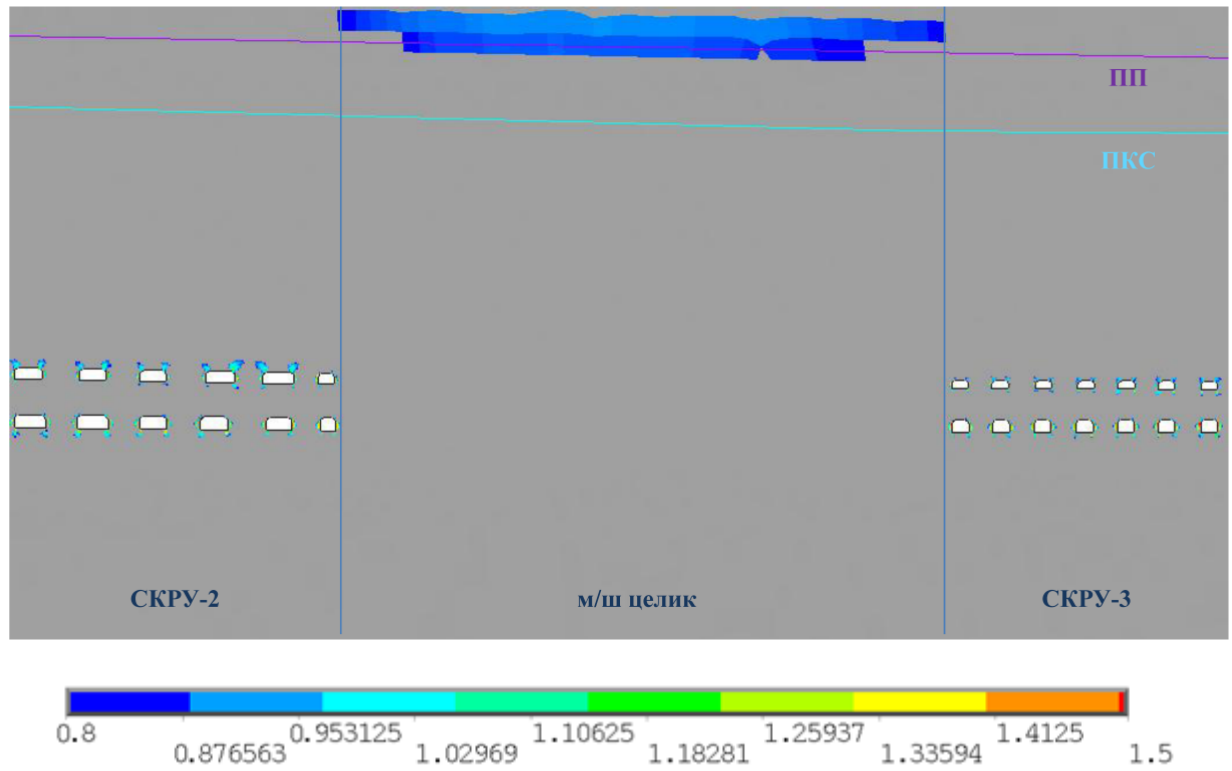


Рисунок 4.16 – Прогноз распределения критерия нарушенности  $K_t$  в районе междушахтного целика SKRU-2 – SKRU-3 на уровне продуктивных пластов на 2031 год

*Прогноз развития деформационных процессов при оставлении целиков между шахтными полями СКРУ-1 – СКРУ-2*

На рисунках 4.17-4.18 показаны результаты прогнозирования деформационных процессов в районе междушахтных целиков СКРУ-1 – СКРУ-2.

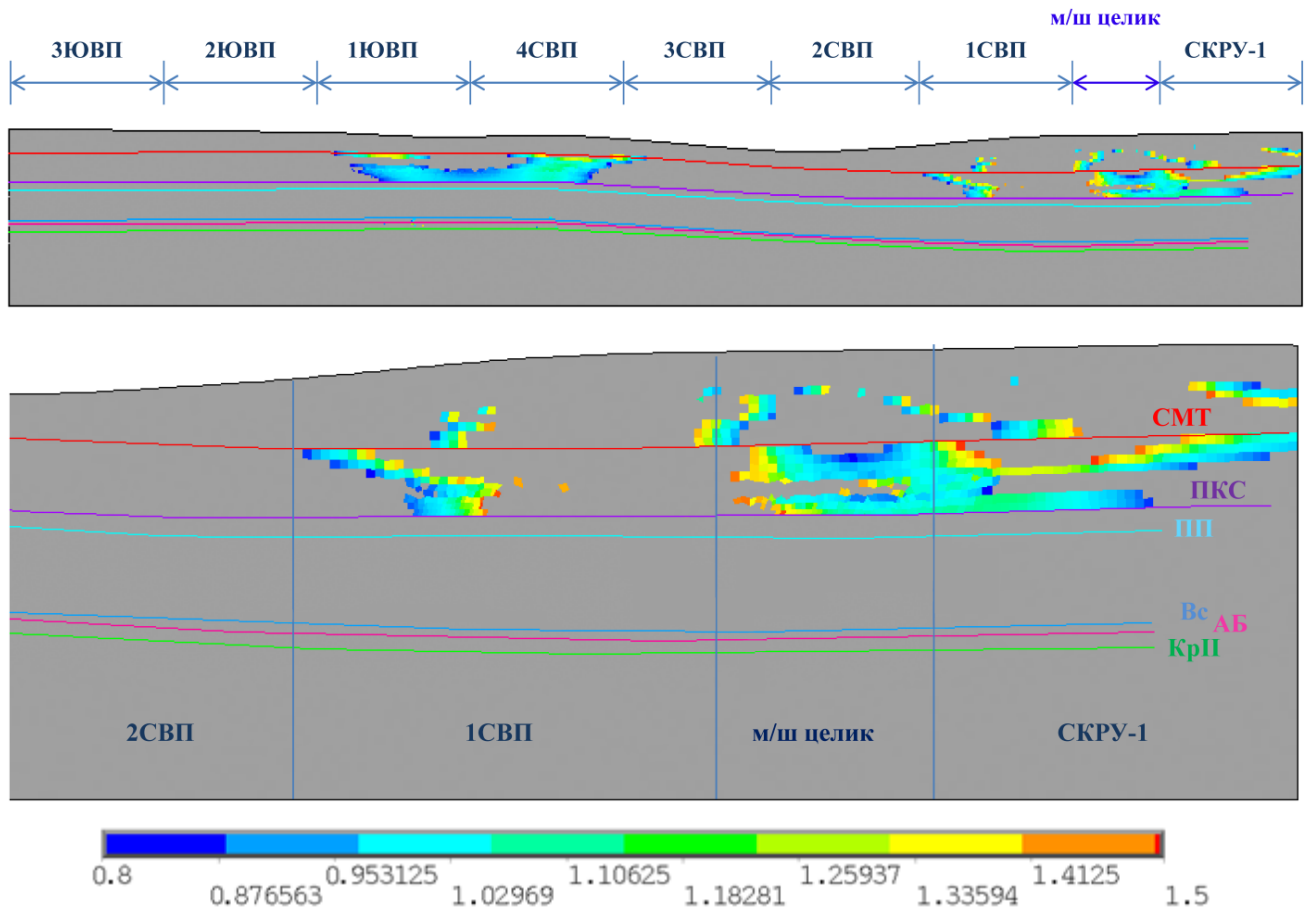


Рисунок 4.17 – Прогноз распределения критерия нарушенности  $K_t$  в районе междушахтного целика СКРУ-1 – СКРУ-2 на 2026 год



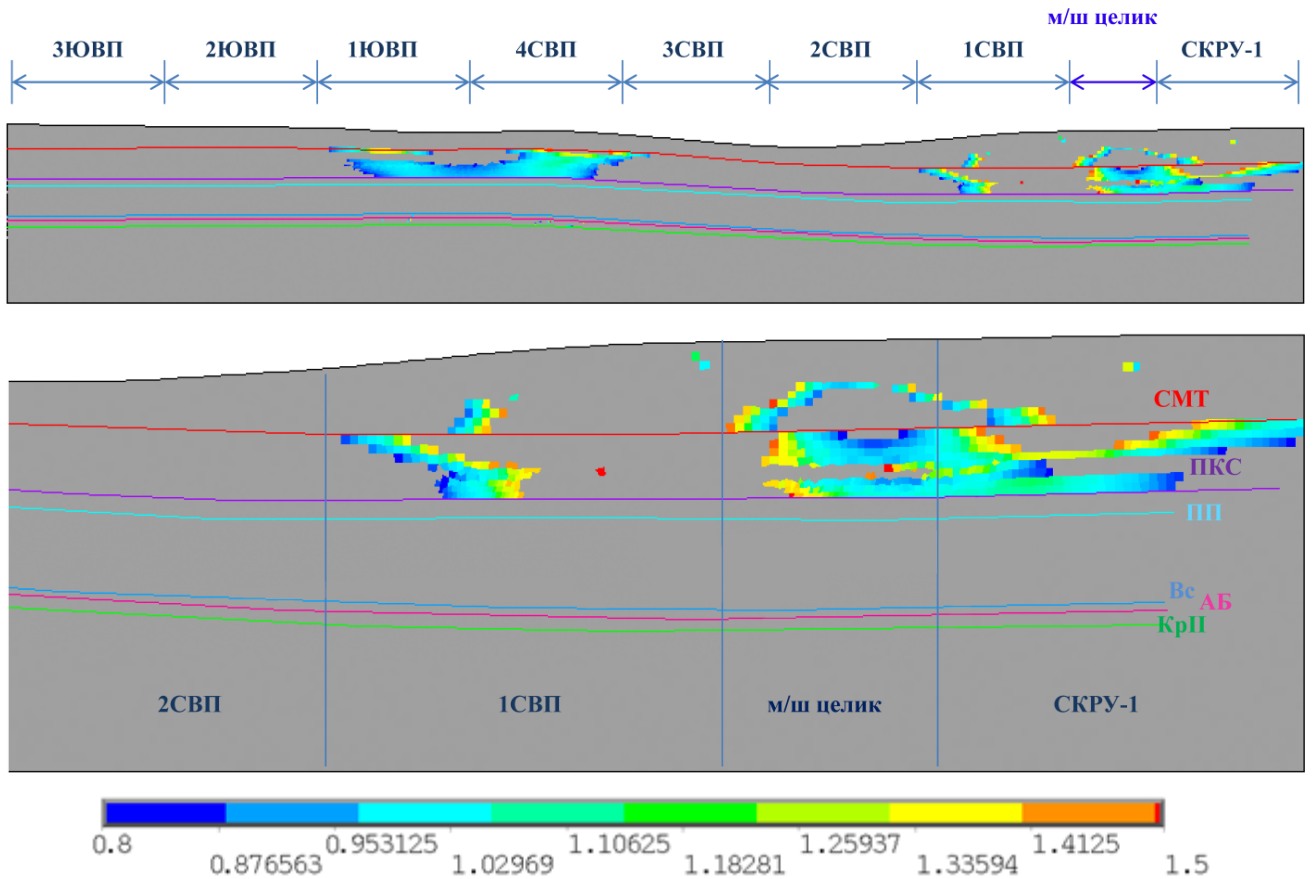


Рисунок 4.18 – Прогноз распределения критерия нарушенности  $K_t$  в районе междушахтного целика SKRU-1 – SKRU-2 на 2031 г.

Таким образом, расчеты показывают, что на заданный период исследований (до 2031 г.) в анализируемой области целика SKRU-1 – SKRU-2 отсутствует опасность возникновения нарушения пород ВЗТ и возникновения водопродящих трещин. Однако имеется также опасность того, что естественное соединение зоны деформаций вокруг камер возле краевых частей целика SKRU-1 – SKRU-2 с выявленной зоной повышенных деформаций в середине ВЗТ и в середине целика может со временем привести к негативным последствиям. Весьма важным обстоятельством является то, что в расчетах не учтено исключительно сильное снижение прочностных и деформационных свойств участка целика SKRU-1 – SKRU-2, примыкающего к провалу, образовавшемуся в 1995 г. и последующее его существенное развитие. Данные исследования являются предметом самостоятельной работы.

#### 4.4 Выводы по Главе 4

1. Для определения состояния массива в районе междушахтных целиков СКРУ-1 – СКРУ-2 и СКРУ-2 – СКРУ-3 в конечно-элементном программном комплексе Ansys было выполнено крупномасштабное математическое моделирование напряженно-деформированного состояния массива горных пород на период с 2020 года до 2031 года. Входящие в модель геомеханические параметры брались из разработанной геолого-геомеханической модели данного участка шахтного поля. На основе геолого-геомеханической модели были построены два разреза, проходящие в районе профильных линий реперов № 1 в районе междушахтного целика СКРУ-1 – СКРУ-2 и профильной линии реперов № 2 в районе междушахтного целика СКРУ-2 – СКРУ-3. В качестве оценки нарушенности целика использован критерий Кулона-Мора, входящие в него параметры предел прочности на одноосное сжатие и угол внутреннего трения также брались из геолого-геомеханической модели. Критерием адекватности модели явилось соответствие замеренных и рассчитанных по профильным линиям оседаний земной поверхности.

2. В ходе выполнения расчетов изменение геомеханических характеристик конечно-элементных моделей бралось на основе нарастания графика оседаний земной поверхности. Очевидным моментом является то, что для прямой оценки изменения геомеханических характеристик необходимо пробурить скважину в районе целика, отобрать керн и провести его испытания, аналогичные испытаниям, представленным в Главе 3. Однако такое решение вопроса в настоящий момент не представляется реальным.

3. Расчеты показывают, что на период исследований до 2031 года отсутствует опасность возникновения нарушения пород ВЗТ и возникновения водопродящих трещин в районе междушахтных целиков СКРУ-1 – СКРУ-2 и СКРУ-2 – СКРУ-3. Однако имеется также опасность того, что естественное соединение зоны деформаций вокруг камер возле краевых частей целика с выявленной зоной повышенных деформаций в середине ВЗТ и в середине целика может со временем

привести к негативным последствиям. Выполненное моделирование напряженно-деформированного состояния массива горных пород в районе междушахтных целиков обосновывают третье защищаемое положение: математическое моделирование процессов деформирования массива пород ВЗТ и земной поверхности основано на полученном распределении физико-механических свойств горных пород в массиве.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате диссертационного исследования получены следующие выводы и рекомендации:

1. На основе результатов испытаний горных пород получены зависимости между статическими и динамическими физико-механическими свойствами соляных пород. Впервые для соляных пород Верхнекамского месторождения калийно-магниевых солей получены зависимости предела прочности, модуля упругости, сцепления и угла внутреннего трения от скорости продольной волны. Полученные зависимости подтверждают первое защищаемое положение.

2. Обработаны результаты инструментальных наблюдений за оседаниями земной поверхности в районе междушахтных целиков СКРУ-1 – СКРУ-2 и СКРУ-2 – СКРУ-3 и установлены основные закономерности развития деформационных процессов.

3. Разработаны теоретические основы создания геолого-геомеханической модели массива горных пород, основанной на обработке данных каротажа солеразведочных скважин и использовании полученных корреляционных зависимостей.

4. В результате обработки данных акустического каротажа солеразведочных скважин с использованием полученных корреляционных зависимостей между скоростью продольной волны и физико-механическими свойствами соляных пород в ПО «IRAP RMS» построена трехмерная геолого-геомеханическая модель участка шахтных полей между СКРУ-1 – СКРУ-2 и СКРУ-2 – СКРУ-3. Полученная модель отражает распределение физико-механических свойств в породах водозащитной толщи в соответствии с полученными зависимостями и может быть использована для создания геомеханической модели участка месторождения. Разработанная трехмерная геолого-геомеханическая модель водозащитной толщи подтверждает второе защищаемое положение.

5. Для определения состояния массива в районе междушахтных целиков СКРУ-1 – СКРУ-2 и СКРУ-2 – СКРУ-3 в конечно-элементном программном

комплексе Ansys было выполнено крупномасштабное математическое моделирование напряженно-деформированного состояния массива горных пород на период 2020-2031 гг. Входящие в модель геомеханические параметры брались из разработанной геолого-геомеханической модели данного участка шахтного поля. На основе геолого-геомеханической модели были построены два разреза, проходящие в районе профильных линий реперов № 1 в районе междушахтного целика СКРУ-1 – СКРУ-2 и профильной линии реперов № 2 в районе междушахтного целика СКРУ-2 – СКРУ-3. Для анализа деформационных процессов использован преобразованный критерий Кулона-Мора, входящие в него параметры предел прочности на одноосное сжатие и угол внутреннего трения также брались из геолого-геомеханической модели. Критерием адекватности модели явилось соответствие замеренных и рассчитанных по профильным линиям оседаний земной поверхности.

6. Расчеты показывают, что на период исследований до 2031 года отсутствует опасность возникновения нарушения пород водозащитной толщи и возникновения водопроводящих трещин в районе междушахтных целиков. Однако имеется также опасность того, что естественное соединение зоны деформаций вокруг камер возле краевых частей целика с выявленной зоной повышенных деформаций в середине водозащитной толщи и в середине целика может со временем привести к негативным последствиям. Выполненное моделирование напряженно-деформированного состояния массива горных пород в районе междушахтных целиков обосновывают третье защищаемое положение.

Автор работы видит универсальность предлагаемого комплекса натурных исследований для оценки напряженно-деформированного состояния массива горных пород месторождений полезных ископаемых на основе комплекса натурных исследований, поэтому дальнейшее развитие темы диссертации предполагает проведение исследований, направленных на реализацию метода выделения зон с различными физико-механическими свойствами в массиве пород угольных и рудных месторождений.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Анализ аварийной ситуации на Втором Соликамском руднике / Г. И. Ермаков, В. И. Фоминых, А. Е. Красноштейн [и др.] // Проблемы безопасности при эксплуатации месторождений полезных ископаемых в зонах градопромышленных агломераций: Тез. докл. Междунар. симп. – Пермь: УрО РАН, 1995. – С. 47-48.
2. Асанов, В. А. Экспериментальное определение напряжений в соляном массиве с использованием эффекта Кайзера / В. А. Асанов, В. Н. Токсаров // Геодинамика и напряженное состояние недр Земли: Труды международной конференции. – Новосибирск, 1999. – С. 147-152.
3. Баклашов, И. В. Механика подземных сооружений и конструкций крепи / И.В. Баклашов, Б.А. Картозия. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва : Недра, 1992. – 543 с. : ил.
4. Барях, А. А. Деформирование соляных пород / А. А. Барях, С. А. Константинова, В. А. Асанов. – Екатеринбург: УрО РАН, 1996. – 203 с.
5. Барях, А. А. Комплексное геофизическое исследование потенциально-опасных участков ВЗТ на подработанных и перспективных площадях / Барях А.А. – Пермь: ГИ УрО РАН, 2009.
6. Барях, А. А. Об одном подходе к реологическому анализу геомеханических процессов / А. А. Барях, Н. А. Самоделкина // ФТПРПИ, 2005. – № 6. – С. 32-41.
7. Барях, А. А. Прогноз нарастания оседаний земной поверхности при отработке свиты калийных пластов / А. А. Барях, Е. А. Телегина, Н. А. Самоделкина, С. Ю. Девятков // ФТПРПИ, 2005. – № 4. – С. 26-34.
8. Барях, А. А. Физико-механические свойства соляных пород Верхнекамского калийного месторождения: учеб. пособие / А. А. Барях, В. А. Асанов, И. Л. Паньков. – Пермь : Изд-во Перм. гос. техн. ун-та, 2008. – 199 с.
9. Бахаева, С. П. Прогноз изменения прочностных свойств намывных пород методом электросопротивления / С. П. Бахаева, Н. А. Смирнова // Труды международной научно-практической конференции. Под редакцией В.И. Клишина,

З.Р. Исмагилова, В.Ю. Блюменштейна, С.И. Протасова, Г.П. Дубинина, 2013. – С. 34-36.

10. Бенявски, З. Т. Управление горным давлением. – М.: Мир, 1990. – 254 с.

11. Булычев, Н. С. Механика подземных сооружений в примерах и задачах : учебное пособие для вузов / Н. С. Булычев. – Москва: Недра, 1989. – 270 с.

12. Вялов, С. С. Реологические основы механики грунтов / С. С. Вялов. – М.: Высшая школа, 1978. – 317 с.

13. ГОСТ 21153.2-84 Породы горные. Методы определения предела прочности при одноосном сжатии. – М.: Издательство стандартов, 1985. – 10 с.

14. ГОСТ 21153.8-88 Породы горные. Методы определения предела прочности при объемном сжатии. – М.: Издательство стандартов, 1988. – 10 с.

15. ГОСТ 28985-91 Породы горные. Методы определения деформационных характеристик при одноосном сжатии. – М.: Издательство стандартов, 1991. – 19 с.

16. Гудман, Р. Механика скальных пород. – М.: Стройиздат, 1987. – 232 с.

17. Девятков, С. Ю. Обоснование условий образования провалов на земной поверхности при аварийных затоплениях калийных рудников: дис. ... канд. техн. наук: 25.00.20. – ФГБУН ПФИЦ УрО РАН, 2018. – 169 с.

18. Еременко, А. А. Разработка железорудных месторождений в зонах повышенной сейсмической активности / А. А. Еременко, М. В. Курленя // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 1990. – № 2. – С. 3-11.

19. Ержанов, Ж. С. Ползучесть соляных пород / Ж. С. Ержанов, Э. И. Бергман. – Алма-Ата. : Изд-во «Наука» Казахской ССР, 1977. – 112 с.

20. Ержанов, Ж. С. Теория ползучести горных пород и ее приложения. – Алма-Ата. : Изд-во «Наука» Казахской ССР, 1964. – 175 с.

21. Ермашов, А. О. Геомеханическое обоснование расчетов оседаний земной поверхности при добыче калийно-магниевых руд (на примере Верхнекамского месторождения калийно-магниевых солей): дис. ... канд. техн. наук: 25.00.20. – ФГБОУ ВПО «ПНИПУ», 2015. – 133 с.

22. Журавков, М. А. Теоретические основы деформационной механики блочно-слоистого массива соляных горных пород / М. А. Журавков, М. Д. Мартыненко – Мн.: Университетское, 1995. – 255 с.

23. Журавков, М. А. Устойчивость и сдвигание массивов горных пород / М. А. Журавков, В. С. Зубович. – М.: РУДН, 2009. – 432 с.

24. Журавков, М. А. Численное моделирование реологических процессов при недостаточном количестве реологических констант / М. А. Журавков, С. Н. Лопатин // Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. – 2021. – Т. 8, № 1. – С. 79-85.

25. Инструкция по наблюдению за сдвижением земной поверхности и за подработанными зданиями и сооружениями на калийных рудниках ПАО «Уралкалий», 2017.

26. Картозия, Б. А. Строительная геотехнология / Б. А. Картозия. – М. : МГГУ, 1998. – 36 с.

27. Кашников, Ю. А. Геолого-геомеханическая модель участка Верхнекамского калийного месторождения / Ю. А. Кашников, А. О. Ермашов, А. А. Ефимов // Записки Горного института, 2019, Том 237. – С. 259-267.

28. Кашников, Ю. А. Механика горных пород при разработке месторождений углеводородного сырья: монография / Ю. А. Кашников, С. Г. Ашихмин. – М.: Изд-во «Горная книга», 2019. – 496 с.

29. Козырев, А. А. Техногенная сейсмичность при ведении горных работ на рудниках Кольского полуострова / А. А. Козырев, В. И. Панин, Ю. В. Федотова // Геодинамика и современные технологии отработки удароопасных месторождений : сб. науч. тр. науч.-практ. конф. – Норильск : ГМК «Норильский никель», 2012. – С. 64-69.

30. Компьютерное моделирование в геомеханике / М. А. Журавков, О. Л. Коновалов, С. И. Богдан, П. А. Прохоров, А. В. Круподеров. – Мн.: БГУ, 2008. – 443 с.

31. Константинова, С. А. Оценка реологических показателей соляных пород по данным натуральных наблюдений за вертикальными деформациями



междукамерных целиков / С. А. Константинова, С. А. Чернопазов // ФТПРПИ, 2007. – № 1. – С. 21-27.

32. Константинова, С. А. Горно-тектонический удар на втором соликамском руднике / С. А. Константинова // Безопасность труда в промышленности. – № 12. – 2004. – С. 14-18.

33. Константинова, С. А. Математическая модель состояния закладочного массива на верхнекамском месторождении калийных солей / С. А. Константинова, С. А. Чернопазов, В. А. Асанов // Известия вузов. Горный журнал, 2010. – № 1. – С. 44-49.

34. Константинова, С. А. Математическое моделирование в системе геодинамического мониторинга осваиваемых месторождений полезных ископаемых / С. А. Константинова // Горный журнал, 2008. – № 6. – С. 44-47

35. Константинова, С. А. Об одной феноменологической модели деформирования и разрушения соляных пород при длительном действии сжимающих нагрузок / С. А. Константинова // ФТПРПИ, 1983. – № 3. – С. 8-13.

36. Константинова, С. А. Развитие наследственной модели деформирования и разрушения соляных пород / С. А. Константинова, С. А. Чернопазов // ФТПРПИ, 2004. – № 1. – С. 50-61.

37. Косков, В. Н. Геофизические исследования скважин и интерпретация данных ГИС / В. Н. Косков, Б. В. Косков. – Пермь: Изд-во Перм. гос. техн. ун-та, 2007. – 317 с.

38. Кудряшов, А. И. Верхнекамское месторождение солей / А. И. Кудряшов // Изд-во «EPSILONPLUS», 2-е изд. – 2013. – 371 с.

39. Лебедева, О. О. Анализ и подготовка исходных данных для построения геолого-геомеханической модели участка Верхнекамского месторождения калийно-магниевых солей / Лебедева О. О // Недропользование. – 2022. – Т. 22. – № 3. – С. 139-143 // DOI: 10.15593/2712-8008/2022.3.5

40. Лебедева, О. О. Моделирование оседаний земной поверхности в районе междушахтных целиков на Верхнекамском месторождении калийно-магниевых солей на основе геолого-геомеханической модели / Лебедева О. О. // Известия

высших учебных заведений. Горный журнал. – 2022. – № 6. – С. 104-113 // DOI: 10.21440/0536-1028-2022-6-104-113

41. Лебедева, О. О. Применение комплекса геомеханического и геофизического подходов для моделирования НДС массива горных пород на участках ВКМКС // Сборник материалов конференции и школы молодых ученых и студентов (г. Екатеринбург, 4 апреля 2023 г.) / отв. Редактор Д. В. Зайцев. – Екатеринбург: Изд-во УГГУ, 2022. – С. 20.

42. Маловичко, А. А. Макросейсмические обследования. Соликамское землетрясение 5 января 1995 года ( $M_s=4,2$ ) / А. А. Маловичко, Д. А. Маловичко, А. К. Кустов // Землетрясения Северной Евразии в 1995 г. – С. 163-169.

43. Малоглубинные геофизические исследования на Верхнекамском месторождении калийных солей / И.А. Санфиоров, Ю.И. Степанов, К.Б. Фатькин, И.Ю. Герасимова, А.И. Никифорова // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых, №6, 2013. – с. 71-77.

44. Малышева, М. Г. Обработка и интерпретация материалов геофизических исследований скважин / М. Г. Малышева, Б. Ю. Вендельштейн, В. П. Тузов. – М.: Недра, 1990. – 312 с.

45. Маркшейдерское дело : учебник для вузов по специальности «Маркшейдерское дело» / Д. Н. Оглоблин, Г. И. Герасименко, А. Г. Акимов [и др.] – 3-е изд., перераб. и доп. – Москва : Недра, 1981. – 704 с.

46. Мельник, В. В. Геомеханический мониторинг геофизическими методами при разработке месторождений полезных ископаемых открытым способом / В. В. Мельник // Проблемы недропользования. – 2021. – № 4 (31). – С. 36-43.

47. Мельник, В. В. Решение задач безопасности ведения подземных горных работ при отработке угольных лав с использованием современных методов геофизики / В. В. Мельник, Т. Ш. Далатказин, А. Л. Замятин // Проблемы недропользования. – 2022. – № 4 (35). – С. 122-131.

48. Методические рекомендации к «Указаниям по защите рудников от затопления и охране подрабатываемых объектов на Верхнекамском

месторождении калийно-магниевых солей» – ГИ УрО РАН, Санкт-Петербург – Пермь, 2014. – 66 с.

49. Оловянный, А. Г. Механика горных пород. Моделирование разрушений / А. Г. Оловянный. - СПб: ООО «КОСТА», 2012. – 280 с.

50. Оловянный, А. Г. Некоторые задачи механики массивов горных пород / А. Г. Оловянный – СПб: Межотраслевой научный центр ВНИМИ, 2003. – 234 с.

51. Основы расчета напряженного состояния полостей газохранилищ в соляных отложениях / Ж. С. Ержанов, В. Менцель, Э. И. Бергман [и др.] – Алма-Ата. : Изд-во «Наука» Казахской ССР, 1978. – 86 с.

52. Петротектонические основы безопасной эксплуатации Верхнекамского месторождения калийно-магниевых солей / Н. М. Джиноридзе, М. Г. Аристаров, А. И. Поликарпов [и др.] – СПб-Соликамск, 2000. – 400 с.

53. Петротектонические основы безопасной эксплуатации Верхнекамского месторождения калийно-магниевых солей / В. С. Аплонов, М. Г. Аристаров, С. Д. Гемп [и др.] ; под редакцией д.г.-м.н. Н. М. Джиноридзе. – СПб-Соликамск : ОГУП Соликамск. типография, 2000. – 400 с.

54. Простов, С. М. Прогнозирование устойчивости откосов глинистых уступов по данным электрофизического мониторинга / С. М. Простов, Н. А. Смирнова, С. П. Бахаева // Безопасность труда в промышленности. – 2012. – № 3. – С. 43-48.

55. Протосеня, А. Г. Моделирование напряженно-деформированного состояния рудного массива в зоне влияния очистных работ / А. Г. Протосеня, К. Г. Синякин // Записки Горного института. – 2011. – Том 189. – С. 240-243.

56. Протосеня, А. Г. Оценка напряженного состояния нетронутого горными работами неоднородного рудного массива / А. Г. Протосеня, М. Г. Попов // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. – 2009. - № 6. – с. 36-40.

57. Прочность и деформируемость горных пород / Ю. М. Карташов, Б. В. Матвеев, Г. В. Михеев, А. Б. Фадеев ; под общ. ред. А. Б. Фадеева – М. : Недра, 1979. – 272 с.

58. Разрывная тектоника Верхнекамского месторождения солей / А. И. Кудряшов, В. Е. Васюков, Г. С. Фон-дерлаасс [и др.] ; под науч. ред. А. И. Кудряшова. – Пермь : ГИ УрО РАН, 2004. – 194 с. ISBN 5-89095-096-07

59. Рекомендации по расчету устойчивых пролетов очистных выработок на калийных месторождениях. – Л.: ВНИИГ, 1982.

60. Ржевский, В. В. Основы физики горных пород / В. В. Ржевский, Г. Я. Новик. – М.: Недра, 1984. – 384 с.

61. Сейсморазведочные исследования водозащитной толщи Верхнекамского месторождения калийных солей / И.А. Санфиоров, А.И. Бабкин, Г.Ю. Прийма, А.Г. Ярославцев, А.М. Пригара, К.Б. Фатькин // Горный журнал. – 2008, №10. – с. 45-48.

62. Создание геолого-геомеханической модели Верхнекамского месторождения калийных солей / Ю. А. Кашников, А. О. Ермашов, Д. В. Шустов, О. О. Лебедева // Маркшейдерский вестник. – 2019. – № 1 (128). – С. 39-45.

63. Способ выделения в водозащитной толще и продуктивных калийных пластах горного массива зон с различными прочностными и деформационными характеристиками: Заявка на патент № 2023128930: заявл. 08.11.2023 / Кашников Ю. А., Шустов Д. В., Лебедева О. О., Кухтинский А. Э.; заявитель ФГАОУ ВО ПНИПУ.

64. Способ шахтной сейсморазведки для изучения особенностей геологического строения ВКМС / А. А. Жуков, А. М. Пригара, Р. И. Царев, И. Ю. Шусткина // ГИАБ. – 2019. – № 4. – С. 121-13.

65. Справочник по разработке соляных месторождений / сост. Ковалев О. В., Нестеров М. П., Пермяков Р. С., Пинский В. Л., Проскуряков Н. М., Романов В. С. – М.: Недра, 1986. – 212 с.

66. Ставрогин, А. Н. Механика деформирования и разрушения горных пород / А. Н. Ставрогин, А. Г. Протосеня. – М., Недра, 1992 – 224с.

67. Тенисон, Л. О. Разработка методики определения деформаций земной поверхности при ее многократной подработке: дис. ... канд. техн. наук: 25.00.20. – ИГД УрО РАН, 2012. – 165 с.

68. Турчанинов, И. А. Основы механики горных пород / И. А. Турчанинов, М. А. Иофис, Э. В. Каспарьян. – Ленинград: Недра, 1989. – 488 с.

69. Указания (мероприятия) по защите рудников ПАО «Уралкалий» от затопления и охране объектов на земной поверхности от вредного влияния подземных разработок на Верхнекамском месторождении солей, 2022 г. – 117 с.

70. Указания по защите рудников от затопления и охране подрабатываемых объектов на Верхнекамском месторождении калийно-магниевых солей. – ГИ УрО РАН, Санкт-Петербург – Пермь, 2014. – 130 с.

71. Устойчивость и прочность подземных сооружений / М. А. Журавков, С. С. Хвесеня, С. Н. Лопатин, М. А. Николайчик // Механика машин, механизмов и материалов. – 2019. – № 4. – С. 84-88.

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

73. Фисенко, Г. Л. Предельные состояния горных пород вокруг выработок / Г. Л. Фисенко. – М.: Недра. – 1976. – 272 с.

74. Царев, Р. И. Обоснование выбора модели геологической среды при решении прямой задачи сейсморазведки МОВ ОГТ на ВКМС / Р. И. Царев // Геофизика. – 2018. – № 5. – С. 18-23.

75. Шафаренко, Е. М. Длительная устойчивость подземных горных выработок в отложениях каменной соли: дис. ... д-ра техн. наук. – Новосибирск, ИГД СО АН СССР, 1985.

76. Шафаренко, Е. М. Устойчивость и конвергенция подземных резервуаров / Е. М. Шафаренко, Т. Ю. Журавлева, Ю. Л. Филимонова // Газовая промышленность, 1999. – № 9. – С. 53-55.

77. Ямщиков, В.В. Методы и средства исследования и контроля горных пород и процессов / В. В. Ямщиков. – М.: Недра, 1982. – 296 с.

78. 3D geological geomechanical reservoir modeling for the purposes of oil and gas field development optimization / D. V. Shustov, Yu. A. Kashnikov, S. G. Ashikhmin, A. E. Kukhtinskiy // EUROCK 2018: Geomechanics And Geodynamics Of Rock Masses. – 2018 ; Vol. 2. P. 1425–1430.

79. Analysis of shaft lining stress state in anhydrite-rock salt transition zone / M. A. Karasev, A. G. Protosenya, A. M. Katerov, V. V. Petrushin // Mining-geological-petroleum engineering bulletin. – №1. – 2022. – pp. 151-162.

80. Doering, T. Das primaeren. sekundaeren und tertiaeren Kriechen von Steinsalz -ein dreidimensionales rheonomes Stoffgesetz. / T. Doering, J. R. Kiehl // Geotechnik 19, Nr. 3, 1996. – 194-199 pp.

81. Erichsen, C. A three-dimensional constitutive law for rock salt including transient, steady state and accelerated creep, failure and post-failure behaviour and applications in rock engineering / C. A. Erichsen // Proc. EUROCK 2006, Liege, 2006.

82. Ermashov, A. O. The analysis of interbed stability with mathematical modeling methods / A. O. Ermashov, O. O. Lebedeva, A. I. Rysin // Topical Issues of Rational Use of Natural Resources 2019. Proceedings of the XVth forum-contest of students and young researchers under auspices of UNESCO, Saint-Petersburg, Russia, 13-17 May 2019. – 2020. – Volume 1. – pp. 173-182

83. Hou, Z. Geomechanische Planungskonzepte für untertägige Tragwerke mit besonderer Berücksichtigung von Gefügeschädigung, Verheilung und hydromechanischer Kopplung. Schriftenreihe Lehrstuhl für Deponietechnik und Geomechanik TU Clausthal, 2002.

84. Hou, Z. Mechanical and hydraulic behaviour of salt in the excavation disturbed zone around underground facilities // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences 40, 2003. – 725-738 pp.

85. Hou, Z. Mechanical behaviour of rock salt masses under high stress to strength ratios (damaging) and under very low stress to strength ratios with high confining pressure (healing). ISRM -Technology roadmap for rock mechanics, 2003. – 533-538 pp.

86. Integrated Interpretation of Ground-Based and Mine Seismic Surveys in The Potash Deposit Areas with a Complicated Geological Structure / A. I. Nikiforova, I. A. Sanfirov, V. M. Nezdánov, R. A. Bogdanov // Conference Proceedings, Engineering and Mining Geophysics 2021, Apr 2021, Volume 2021, p. 1-7 (doi: 10.3997/2214-4609.202152109).

87. Jaeger, J. C. Fundamentals of Rock Mechanics / J. C. Jaeger, N. G. Cook, R. W. Zimmerman. – 4<sup>th</sup> ed. – 2013. – 475 p.
88. Kashnikov, Iu. A. 3D geomechanical modeling as the basis for solving complex problems of potassium salt development safety / Kashnikov Iu. A., Ermashov A. O., Lebedeva O. O. // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. – 2019. – № 3. – С. 30-38 DOI: 10.21440/0536-1028-2019-3-30-38.
89. Kiehl, J. R., Erichsen, C. Stability of underground openings in rock salt. In: Proc. 5th European Conf. on Numerical Methods in Geotechnical Eng. (NUMGE), Paris, 2002.
90. Kiehl, J. R., Reim, J. A Three-Dimensional Constitutive Law for Rock Salt Including Transient, SteadyState and Accelerated Creep, Dilatancy, Creep and Tensile Failure as well as Post Failure Behaviour. In: Proc. 9th ISRM Congr., Vol. 2, Paris, 1999.
91. Kiehl, J. R.; Döring, T.; Erichsen, C. Ein räumliches Stoffgesetz für Steinsalz unter Berücksichtigung von primärem, sekundärem und tertiärem Kriechen, Dilatanz, Kriech- und Zugbruch sowie Nachbruchverhalten. Geotechnik 21, 1998. – 254-258 pp.
92. Lebedeva, O. O. Geomechanical modeling of rock state at Verkhnekamskoe salt deposit using geophysical investigation results // Topical issues of rational use of natural resources XVII International forum-contest of students and young researchers under the auspices of UNESCO 31 May-6 June 2021. Scientific conference abstracts. Volume 1. – 2021. – PP. 206-207.
93. Lux, K. H. Neue Aspekte zum Tragverhalten von Salzkavernen und zu ihrem geotechnischen Sicherheits-nachweis / K. H. Lux, et al. // Erdöl Erdgas Kohle 3/4, 1999.
94. Lux, K. H. Gebirgsmechanischer Entwurf und Felderfahrungen im Salzkavernenbau. F. Enke Verlag, 1984.
95. Lux, K.H. Zum langfristigen Tragverhalten von verschlossenen solegefüllten Salzkavernen – ein neuer Ansatz zu physikalischer Modellierung und numerischer Simulation. Erdöl Erdgas Kohle 11, 2005.
96. Menzel, W. Das Festigkeits- und Verformungsverhalten von Carnallit als Grundlage für die Standsicherheitsbewertung von Grubenbauen / W. Menzel, W. Schreiner // Neue Bergbautechnik, Leipzig 5, 1975. – 451-457 pp.

97. Menzel, W. Geomechanische Forschung – Grundlage für die Gestaltung des Abbaues im Kaliflöz Thüringen. / W. Menzel, W. Schreiner, J. Sievers // Int. Salzsosymposium, Hamburg, 1987. – Vortrag 2-15.

98. Sanfirov, I.A. Seismic CDP profiling in wells / I. A. Sanfirov, A. I. Babkin, T. V. Baybakova // 13<sup>TH</sup> conference and exhibition on engineering geophysics. Engineering Geophysics, 2007 (DOI: 10.3997/2214-4609.201700420).

99. Solving the problems of exploitation safety of potassium salt deposit based on joint application of geophysical and geomechanical studies / Yu. A. Kashnikov, D. V. Shustov, A. O. Ermashov, O. O. Lebedeva, A. A. Zhukov, A. M. Prigara // Mechanics and Rock Engineering, from Theory to Practice IOP Publishing. IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 833 (2021) 012084, September 2021. – 8 p. DOI:10.1088/1755-1315/833/1/012084.

100. Uhlenbecker, F.W. Verformungsmessungen in der Grube und ergänzende Laboruntersuchungen auf dem Kaliwerk Hattorf (Werra-Revier) im Hinblick auf eine optimale Festlegung des Abbauverlustes bei größtmöglicher Sicherheit der Grubenbaue. Paperback. Zustand: leichte Gebrauchsspuren, 1968.

101. Voltterra, V. Fonctions de lignes, Gauthier-Villard, Paris, 1913.

102. Wallner, M. Standsicherheitsberechnungen fuer Pfeilerdimensionierung im Salzbergbau. Proc. 5th ISRM Congress, Melbourne, 1983. D8-D14.

103. Wittke, B. Permesbilitaet von Steinsalz. Theorie und Exsperiment. Geotechnik in Forschung und Praxis. WBI-Print 4. Verlag Glueckauf GmbH.Essen, 1999.

104. Wittke, W. Tunnelstatik. Verlag Glueckauf GmbH. Essen, 1999. – 408 p.

105. Wittke. W. Rock Mechanics, Theory and Applications with case histories, Springer-Verlag, Berlin. Heidelberg, New York, London, Paris, Tokio, Hongkong, Barcelona, 1990.

106. Zoback, M. Reservoir geomechanics. / M. Zoback. – Cambridge: University Press. – 2010. – 449 p.



## ПРИЛОЖЕНИЕ А

### Акт об использовании результатов кандидатской диссертации

2



Дата «13» октября 2023 г.

#### АКТ

об использовании результатов кандидатской диссертации Лебедевой Олеси Олеговны по научной специальности 2.8.6 – Геомеханика, разрушение горных пород, рудничная аэрогазодинамика и горная теплофизика

Специальная Комиссия АО «ВНИИ Галургии» в составе:

Председатель – Жуков Александр Анатольевич, канд. техн. наук, заведующий лабораторией геофизики АО «ВНИИ Галургии»,

члены комиссии – сотрудники лаборатории геофизики АО «ВНИИ Галургии» Царев Роман Ильич, канд. техн. наук, Пригара Андрей Михайлович, канд. техн. наук, Ворошилов Владислав Алексеевич, канд. техн. наук,

составили настоящий акт о том, что результаты диссертации на тему «Прогноз деформационных процессов междушахтных целиков калийного месторождения на основе комплекса натуральных исследований», представленной на соискание ученой степени кандидата наук учтены в ходе выполнения научно-исследовательских работ АО «ВНИИ Галургии» при разработке:

- рекомендаций по мониторинговому контролю целиков отделяющих заполняемые рассолами части шахтных полей от действующих;
- технических предложений по выполнению подземных геофизических исследований в выработках калийных рудников;
- рекомендаций по геофизическому контролю целиков камер большого сечения.

По результатам совместных разработок заявок на патент не предполагалось.

Использование указанных результатов позволяет:

- повысить качество и эффективность научно-технических работ;
- повысить содержательность интерпретационных выводов получаемых в рамках геофизических исследований.

Результаты внедрялись при выполнении НИР и ОКР по темам:

1. Геофизические исследования целиков в местах установки гидроизолирующих перемычек на рудниках БКПРУ-2 и БКПРУ-4. (договор № 1047-2023 между ПАО «Уралкалий» и АО «ВНИИ Галургии»).

2. Полевые шахтные сейсморазведочные работы способом ПВРО в выработках ЗСВП рудника БКПРУ-4 ПАО «Уралкалий» (договор № 1027-924Д-2021 между ПНИПУ и АО «ВНИИ Галургии»).
3. Полевые шахтные сейсморазведочные работы для выделения упругих параметров массива в районе проведения опытных работ на 16, 18 ЗП рудника БКПРУ-2 ПАО «Уралкалий» (договор № 1019-817Д-2019 между ПНИПУ и АО «ВНИИ Галургии»).
4. Анализ развития деформационных процессов горного массива и земной поверхности в районе междушахтных целиков СКРУ-2 – СКРУ-3 и СКРУ-2 – СКРУ-1 на основе данных наблюдений за сдвижением земной поверхности и геомеханического моделирования (договор №2021/006 от 10.02.2021г. между ПНИПУ и ПАО «Уралкалий»).
5. Оценка текущего состояния водозащитной толшина ЗСВП рудника БКПРУ-4 ПАО «Уралкалий» и прогноз её дальнейшего состояния (договор №2021/007 от 10.02.2021г. между ПНИПУ и ПАО «Уралкалий»).

**Председатель комиссии**

зав. лабораторией геофизики,  
канд. техн. наук



Жуков А.А.

**Члены комиссии:**

ведущий научный сотрудник НИЛ геофизики,  
канд. техн. наук



Царев Р.И.

ведущий научный сотрудник НИЛ геофизики,  
канд. техн. наук



Пригара А.М.

ведущий инженер НИЛ геофизики,  
канд. техн. наук



Ворошилов В.А.

# ПРИЛОЖЕНИЕ Б

## Заявка на патент

Форма № 94 ИЗ,ПМ,ПО-2016

Федеральная служба по интеллектуальной собственности  
Федеральное государственное бюджетное учреждение



«Федеральный институт промышленной собственности»  
(ФИПС)

Бережковская наб., д. 30, корп. 1, Москва, Г-59, ГСП - 3, 125993

Телефон (8-499) 240-60-15 Факс (8-495) 531-63-18

### УВЕДОМЛЕНИЕ О ПРИЕМЕ И РЕГИСТРАЦИИ ЗАЯВКИ

<b>08.11.2023</b> <i>Дата поступления (дата регистрации)</i>	<b>W23064276</b> <i>Входящий №</i>	<b>2023128930</b> <i>Регистрационный №</i>
---	---------------------------------------	---

<b>ДАТА ПОСТУПЛЕНИЯ</b> (дата регистрации) <small>принимается документ с заявкой</small>	<b>(31) РЕГИСТРАЦИОННЫЙ №</b>	<b>ВХОДЯЩИЙ №</b>
<b>(85) ДАТА ПЕРЕВОДА</b> между переводной заявкой из иностранного государства		
<input type="checkbox"/> (86) <small>(Заявка/регистрация патента/заявка/выдача патента и/или регистрация/регистрация товарного знака и/или регистрация/регистрация авторского права)</small>	<b>АДРЕС ДЛЯ ПЕРЕПИСКИ</b> <small>(укажите адрес, фамилию и инициалы или наименование организации)</small> 614990, Пермский край, г. Пермь, Комсомольский проспект, д. 29, Ташкинов Анатолий Александрович (614990, Permuy kray, g. Perm, Komсомольskiy prospekt, d. 29, Tashkinov Anatoly Aleksandrovich)	
<input type="checkbox"/> (87) <small>(номер и дата международной публикации международной заявки)</small>	Телефон: 83422198154 Факс: Адрес электронной почты: rafin@rfpatent.ru	
<input type="checkbox"/> (95) <small>(номер международной заявки и дата ее подачи)</small>	<b>АДРЕС ДЛЯ СЕКРЕТНОЙ ПЕРЕПИСКИ</b> <small>(если заявка и/или патент являются секретными изобретениями)</small>	
<input type="checkbox"/> (97) <small>(номер и дата публикации сведений о заявке)</small>		
<b>ЗАЯВЛЕНИЕ</b> о выдаче патента на изобретение	<b>В Федеральную службу</b> по интеллектуальной собственности Бережковская наб., д. 30, корп. 1, г. Москва, Г-59, ГСП-3, 125993, Российская Федерация	
<b>(54) НАЗВАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ</b> Способ выделения в водонапорной гониме и продуктивных калийных пластах горного массива зон с различными прочностными и деформационными характеристиками		
<b>(71) ЗАЯВИТЕЛЬ</b> (фамилия, имя, отчество (последнее – при наличии) физического лица или наименование юридического лица (содержит уведомительную информацию), место жительства или место нахождения, название страны и почтовый индекс) Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Пермский национальный исследовательский политехнический университет» (federalnoe gosudarstvennoe avtonomnoe obrazovatelnoe uchrezhdenie vysshego obrazovaniya «Permskiy natsionalnyy issledovatel'skiy politekhnicheskii universitet») 614990, Комсомольский проспект, д.29, г. Пермь, Пермский край, Россия (614990, Komсомольskiy prospekt, d.29, g. Perm, Permuy kray, Rossiya)	<b>ИДЕНТИФИКАТОРЫ ЗАЯВИТЕЛЯ</b> ОГРН 1 02 59 00 51392 4 КПП 59 02 01 001 ИНН 59 02 29102 9 СПИ.С ДОКУМЕНТ (код, серия, номер) КОД СТРАНЫ (если он установлен) RU	
<input type="checkbox"/> изобретение создано за счет средств федерального бюджета Заявитель является: <input type="checkbox"/> государственным заказчиком <input type="checkbox"/> муниципальным заказчиком исполнитель работ (указать наименование)	<input type="checkbox"/> исполнителем работ по: <input type="checkbox"/> государственному контракту <input type="checkbox"/> муниципальному контракту <input type="checkbox"/> соглашению о предоставлении субсидии <input type="checkbox"/> гранту <input type="checkbox"/> государственному заданию <input type="checkbox"/> муниципальному заданию заказчик работ (указать наименование)	

Общее количество документов в листах	27	Лицо, зарегистрировавшее документы
Из них: - количество листов комплекта изображений изделия (для промышленного образца)		Автоматизированная система
Количество платежных документов	1	
Сведения о состоянии делопроизводства по заявкам размещаются в Открытых реестрах на сайте ФИПС по адресу: <a href="http://www.fips.ru/register-web">www.fips.ru/register-web</a>		