

На правах рукописи

МАЛЮХИНА Елена Михайловна



**ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ГЕОМЕХАНИЧЕСКИХ
ПРОЦЕССОВ РАЗВИТИЯ ТЕХНОГЕННЫХ
ВОДОПРОВОДЯЩИХ ТРЕЩИН ПРИ РАЗРАБОТКЕ
ЖЕЛЕЗОРУДНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ**

*Специальность 25.00.16 – Горнопромышленная и
нефтегазопромысловая геология,
геофизика, маркшейдерское дело и
геометрия недр*

А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург — 2020

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет».

Научный руководитель:

доктор технических наук, профессор

Гусев Владимир Николаевич

Официальные оппоненты:

Макаров Александр Борисович

доктор технических наук, профессор, SRK Consulting (Russia) Ltd Филиал частной компании с ограниченной ответственностью «Эсаркей Консалтинг (Россия) Лимитед» (Великобритания), главный консультант по геомеханике SRK Consulting.

Шустов Денис Владимирович

кандидат технических наук, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», кафедра маркшейдерского дела, геодезии и геоинформационных систем, доцент.

Ведущая организация – федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»

Защита диссертации состоится 10 декабря 2020 г. в 16 ч 00 мин на заседании диссертационного совета ГУ 212.224.08 Горного университета по адресу: 199106, Санкт-Петербург, 21-я линия, дом 2, ауд. №1171а.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Горного университета и на сайте www.spmi.ru.

Автореферат разослан 9 октября 2020 г.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ
диссертационного совета



Кузин
Антон Александрович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

Крупнейшие месторождения железных руд относятся к древним корам химического выветривания джеспилитов, где содержание полезного компонента составляет 60 % и более. Большинство из них отрабатывается открытым способом, только на месторождениях Курской и Кременчугской магнитных аномалий применяется подземный способ. Этот процесс характеризуется сложными гидрогеологическими условиями. Предупреждение прорывов воды необходимо как для безопасного ведения горных работ, так и для сохранения экологического состояния регионов. В таких условиях необходим надежный прогноз развития систем техногенных трещин, гидравлически связывающих очистное пространство и водный объект. Прогноз развития зоны водопроводящих трещин (ЗВТ) напрямую связан с распределением сдвижений и деформаций в массиве горных пород. Степень нарушенности массива контролируется через развитие ЗВТ, а точнее, по прогнозу местоположения ее верхней границы, приуроченной к слою с граничной кривизной. На данный момент разработаны методики распространения техногенных водопроводящих трещин для угольных месторождений при первичной и повторных подработках, а для условий Яковлевского рудного месторождения, которое отрабатывается под неосушенными высоконапорными водоносными горизонтами, оценки развития техногенных водопроводящих трещин при повторных подработках отсутствуют. Проходка горных выработок по рудному телу ведется без предварительного водопонижения под нижнекаменноугольным горизонтом. В этой связи необходим контроль распространения водопроводящих трещин во избежание водопритокков в рудник.

Существенный вклад в развитие представлений о процессах сдвижений и деформаций горных пород внесли: С.Г. Авершин, Г.Л. Фисенко, Д.А. Казаковский, И.А. Петухов, В.Н. Земисев, А.Г. Акимов, А.Б. Макаров, А.Н. Медянцеv, А.С. Ягунов, Г. Кратч и многие другие. Большой вклад в разработку геомеханических методов прогноза развития ЗВТ внесли: Б.Я. Гвирцман, В.Н. Гусев,

В.Н. Дешковский, Е.В. Бошнятов, Ю.А. Норватов, А.С. Миронов, А.С. Ягунов, Г. Кратч, Х.Ф. Уотсон и другие.

Цель диссертационной работы: выявление закономерностей распределения сдвижений и деформаций для оценки безопасных условий ведения горных работ под неосушенными водоносными горизонтами.

Идея работы: повышение точности прогноза развития техногенных водопроводящих трещин на основе закономерности распределения и накопления деформаций в подрабатываемом массиве.

Задачи исследований:

1. Обобщить существующий опыт подработки водных объектов на пластовых и рудных месторождениях.

2. Проанализировать параметры, влияющие на развитие зоны водопроводящих трещин при ведении горных работ.

3. Обосновать параметры развития геомеханических процессов в рудовмещающей и перекрывающей толщах Яковлевского месторождения.

4. На основе натуральных данных обосновать использование типовых кривых оседаний, наклонов и кривизны для прогноза сдвижений и деформаций на месторождении богатых железных руд.

5. Выявить зависимость накопления кривизны на верхней границе зоны водопроводящих трещин при слоевой отработке богатых железных руд Яковлевского месторождения.

Методология и методы исследования:

1. Методы наблюдений за сдвижением и деформациями земной поверхности и массива горных пород.

2. Анализ результатов наблюдений за сдвижением реперов наблюдательных станций, заложенных на поверхности и в горных выработках.

3. Метод аналогий для установления подобия геомеханических процессов между месторождениями.

4. Методы математической статистики факторного и дисперсионного анализа для оценки результатов наблюдений за сдвижением и деформациями горных пород.

5. Методы математического моделирования накопления деформаций в горных породах.

Научная новизна работы:

1. На основе полученного различия в закономерностях распределения сдвижения горных пород перекрывающей (осадочной) и рудовмещающей толщ выявлен механизм образования полостей отслоения на контакте толщ и произведена оценка процессов их образования.

2. Определены аналитические выражения функций типовых кривых оседаний ($S(z) = e^{-3z^2}$, z – координаты распределения точек полумульды), наклонов ($Sa'(z) = -6ze^{-3z^2}$) и кривизны ($Sa''(z) = 6(6z^2 - 1)e^{-3z^2}$).

3. Установлено, что накопление кривизны от взаимного положения границ очистных работ по различным слоям происходит по нелинейному закону, имеющему вид полиномиальной зависимости 2-го порядка.

Защищаемые положения:

1. Механизм протекания процесса сдвижения горных пород в перекрывающей и рудовмещающей толщах определяется пространственным сдвижением массива пород в зоне сдвижения к центру тяжести с образованием полостей отслоения на контакте этих толщ.

2. Прогноз ожидаемых вертикальных сдвижений и деформаций в условиях недостаточности натуральных данных следует выполнять с использованием типовой кривой оседания определяемой на основе дисперсионного анализа натуральных данных и представляемой аналитической функцией, а кривые наклона и кривизны определять как 1-ю и 2-ю производные от нее.

3. Накопление деформаций в массиве горных пород в зависимости от взаимовлияния границ очистных работ по различным слоям происходит по полиномиальному закону 2-го порядка, характер распределения которого зависит от конкретных горно-геологических условий.

Теоретическая и практическая значимость работы:

На основе определения угловых параметров процессов сдвижения, функций типовых кривых оседаний, наклонов и кривизны и выведенной формулы расчета максимального оседания разработана методика прогноза вертикальных сдвижений и

деформаций. Использование этой методики дает возможность прогнозировать с учетом накопления деформаций от подработок местоположение слоя, приуроченного к верхней границе зоны водопроводящих трещин, что позволяет осуществлять безопасное ведение горных работ под нижнекаменноугольным водоносным горизонтом перекрывающей толщи.

Достоверность и обоснованность научных положений и рекомендаций подтверждается согласованностью теоретических представлений о геомеханических процессов с наблюдаемыми на подземных и наземных профильных линиях, проведенном дисперсионном и корреляционном анализами полученных данных наблюдений за сдвигами и деформациями горных пород.

Апробация диссертации. Основные положения и результаты исследований были представлены на научных конкурсах и конференциях: Международный форум-конкурс молодых учёных «Проблемы недропользования», 2014 г.; 55-я научная конференция на базе Краковской горно-металлургической академии (Польша), 2014 г.; Международная научно-практическая конференция «Естественные науки: современное состояние и приоритеты развития», 2015 г.; XI Общероссийская конференция изыскательных организаций, 2015 г., VIII международный научно-практический конкурс «Лучшая исследовательская работа 2017», 2017 г.; Международная научно-практическая конференция, посвященная 70-летию кафедры Строительства горных предприятий и подземных сооружений, 2018 г.; Международный научно-исследовательский конкурс «Research Leader 2020», 2020г.; Международный форум-конкурс молодых учёных «Проблемы недропользования», 2020 г.

Личный вклад автора заключается в постановке цели и задач исследований, анализе существующей научно-технической и методической литературы, обработке и анализе опубликованных данных геомеханического мониторинга, проводимого на Яковлевском месторождении, определении граничных углов, выявлении отслоений на контакте рудовмещающей и перекрывающей толщ, получении типовых кривых сдвижений и деформаций, математическом моделировании накопления деформаций при различном взаимном положении границ остановки очистных работ, на основе которого сделана оценка накопления

кривизны на контакте толщ Яковлевского месторождения при отработке второго слоя.

Результаты диссертационной работы в достаточной степени освещены в 12 печатных работах, в том числе 4 статьи 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 (далее – Перечень ВАК), 3 статьи в изданиях, входящих в международные базы данных и системы цитирования Scopus и Web of Science.

Объем и структура работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы, включающего 175 наименований, изложена на 102 страницах машинописного текста и содержит 27 рисунков, 16 таблиц и 3 приложения.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы работы, сформулированы цель, задачи работы и научная новизна, раскрыты теоретическая и практическая значимости исследования и изложены основные положения, выносимые на защиту.

В главе 1 представлены геомеханические процессы формирования зон водопроводящих трещин, показаны методы прогноза распространения и натурного определения техногенных трещин, выполнен анализ опыта подработки водных объектов, описан механизм накопления деформаций в первично и повторно подработанном массиве, сформулированы цель и задачи исследований.

В главе 2 исследованы физико-механические свойства руд и пород Яковлевского месторождения, определено относительное максимальное оседание, приведены расчеты оседаний на контакте перекрывающей и рудовмещающей толщ рудника.

В главе 3 по данным геомеханического мониторинга получены типовые кривые распределения оседаний, наклонов и кривизны, которые выражены аналитически.

В главе 4 приведена оценка накопления деформаций при отработке второго слоя на контакте горных пород в зависимости от различного взаимного положения границ останковки очистных работ.

Основные результаты исследований отражены в следующих защищаемых положениях:

1. Механизм протекания процесса сдвижения горных пород в перекрывающей и рудовмещающей толщах определяется пространственным сдвижением массива пород в зоне сдвижения к центру тяжести с образованием полостей отслоения на контакте этих толщ.

Особенности процессов сдвижения обусловлены сложностью геологического строения месторождения. Рудовмещающая толща представлена руднокристаллическими породами крепостью $f = 3-4$, в которой находится рудное тело БЖР, переслоенное пустой породой, с крепостью этого комплекса $f < 0.3$, т. е. слабые неустойчивые породы и руда, обладающие пльвинными свойствами. Рудовмещающие породы и руда, имеющие угол падения $65-70^\circ$, перекрыты горизонтально залегающими породами осадочной толщи крепостью $f = 1.5-5$. В подошве осадочной толщи залегает слой переотложенных плотных руд с линзообразными прослоями глины, названный «относительным водоупором» (рисунок 1), в котором не допустимо возникновение изгиба, равного граничной кривизне K_r . Анализ данных геомеханического мониторинга показал, что в таких горно-геологических условиях процессы протекания сдвижений в рудной толще будут отличаться от процессов сдвижения в перекрывающей осадочной толще. Это различие выявилось через расчеты оседаний отдельно для осадочной и рудовмещающей толщ по данным соответствующих наблюдений за сдвижением горных пород станций на поверхности и под землей. Оценка сдвижений была произведена на контакте относительного водоупора с рудным телом (рисунок 1). Для корректного сопоставления отдельно полученных оседаний на контакте осадочной и рудовмещающей толщ было соблюдено условие расположения в одной вертикальной плоскости глубинных реперов подземной станции и реперов профильной линии на поверхности.

Оседание на контакте определялось сначала, исходя из закономерностей протекания процессов сдвижения, по данным геомеханического мониторинга подземной наблюдательной станции. Для этого использовалась, применительно к

рассматриваемым условиям, закономерность распределения оседаний в подрабатываемой толще, установленная профессором С.Г. Авершиным (1):

$$\eta_1/\eta_2 = \sqrt{H_2/H_1}, \quad (1)$$

где η_1 – оседание глубинного репера (*Rp22*) подземной наблюдательной станции, заложенного в кровлю горной выработки гор. -370 м в скважину на глубину 9.0 м; η_2 – искомое оседание на контакте осадочной толщи и рудного тела; H_1 – глубина заложения репера *Rp22* ($H_1 = 9.0$ м); H_2 – расстояние по вертикали от горной выработки гор. -370 м до контакта между осадочной и рудовмещающей толщами. Отсюда оседание на рассматриваемом контакте определится как (2):

$$\eta_2 = \eta_1 \sqrt{H_1/H_2}. \quad (2)$$

Затем оседание того же контакта определялось, исходя из закономерностей протекания процесса сдвижения, по данным геомеханического мониторинга наблюдательной станции на поверхности. Оседания определялись по аналогии с приведенной выше схемой, т.е. с использованием выражений (1) и (2). Только в качестве оседания η_1 бралось оседание участка профильной линии на поверхности, местоположение которого было определено через взаимовлияние на него сдвижения, фиксируемого глубинным репером *Rp22* подземной наблюдательной станции гор. -370 м. В качестве H_1 бралось расстояние по вертикали от горной выработки гор. -370 м до поверхностной наблюдательной станции, а H_2 тоже, что в формуле (1). Взаимовлияние сдвижений гор. -370 м на поверхность определялось из известного положения (Г. Кратч, 1978), что пространственные сдвижения точек происходят по направлению к центру тяжести (ц.т.) подрабатываемых слоев, который лежит в точке пересечения линий, являющихся продолжениями построенных у контура выработки граничных углов (рисунок 1).

Граничные углы, которые определялись по данным мониторинговых наблюдений за сдвижением реперов профильной линии на поверхности, исходя из граничного наклона ($i_{гр} = 0.5 \cdot 10^{-3}$) и оседания ($\eta_{гр} = 10$ мм), составили: $\beta_0 = 69^\circ$, $\gamma_0 = 73^\circ$. Значения этих

углов практически совпали с углами сдвига $\beta = 70^\circ$, $\gamma = 70^\circ$, которые определялись отдельно для рудовмещающей и осадочной толщ с последующей заменой на углы линий, соединяющих полученную границу мульды сдвига с границей выработанного пространства (рисунок 1). Таким образом, ранее используемые при прогнозах углы сдвига с запасом определяли границу зоны опасного влияния. Углы сдвига по данным мониторинговых наблюдений за сдвижением реперов профильной линии для этих условий составили: $\beta = 80^\circ$, $\gamma = 81^\circ$ (рисунок 1). Для решения инженерных задач, связанных с определением зон влияния сдвижений и деформаций вследствие ведения горных работ, рекомендуется использовать граничные углы и углы сдвига, полученные по результатам мониторинговых наблюдений за сдвижением реперов профильных линий для рассматриваемых горно-геологических условий.

Используя полученные из натуральных наблюдений за сдвижением горных пород граничные углы, был определен центр тяжести сдвигающихся подработанных слоев массива горных пород. Местоположение скважины с глубинным репером *Rp22* подземной наблюдательной станции гор. -370 м показано на рис. 1, из которого следует, что этот репер находится в зоне полных сдвижений (*CDE* на рисунке 2). Влияние по контуру зоны полных сдвижений на сдвижения пород за пределами этой зоны будет, во-первых, через слой, в котором заложен *Rp22*, в точках *F* и *G*, во-вторых, через сдвижение в точке расположения глубинного репера *Rp22* (рисунок 1). Сдвижение участков на поверхности, а точнее в отдельных её точках, вызванное влиянием сдвига в точках массива горных пород, происходит по направлению к центру тяжести. Поэтому, проведя линии через ц.т. и точки *F*, *G* и *Rp 22* до пересечения с поверхностью, получим точки 1, 2, 3, сдвижение в которых вызвано сдвижением в указанных точках массива горных пород (рисунок 2). Далее в этих точках, используя результаты наблюдений за сдвижением горных пород на поверхности и в горных выработках, были определены оседания на различные даты наблюдений.

Таким образом, все исходные данные для изучения процессов сдвига по изложенному выше принципу отдельного учета особенностей сдвига пород перекрывающей и

рудовмещающей толщ, непосредственно связаны с геомеханическими процессами, протекающими в натуральных условиях конкретного участка месторождения. Результаты расчетов оседания на рассматриваемом контакте по формулам (1), (2) отдельно через оседания перекрывающей осадочной толщи (в точках 1, 2, 3 на рисунке 1) и оседания рудовмещающей толщи (в точке $Rp22$ на рисунке 1) приведены на графике (рисунок 2).

Как следует из графиков (рисунок 2) со стороны лежачего бока на контакте ab (в районе F на рисунке 1) образуется полость отслоения с раскрытием 43–60 мм (кривая 4 опережает по оседаниям кривую 1 на рисунке 2). В центральной части мульды сдвижения на контакте ab (в районе $Rp22$ на рисунке 1) слои, опускаясь на слабые рудовмещающие породы, вдавливаются в них на величину 25–27 мм (кривая оседаний 4 отстает по оседаниям от кривой оседания 2 на рисунке 2). Со стороны висячего бока на контакте ab (в районе G на рисунке 1) также образуется полость отслоения с раскрытием 51–54 мм (кривая 4 опережает по оседаниям кривую 3 на рисунке 2). Отсюда получается, что слабые породы рудного тела, имеющие крутой угол падения (65–70°), при сдвигении разрыхляются и опускаются в выработанное (в данном случае недозаложенное) пространство без образования в приконтактной зоне явно выраженной мульды сдвижения.

На разрыхленные слабые породы рудной толщи в приконтактной зоне (ab на рисунке 1) опускаются горизонтально залегающие породы осадочной толщи с образованием характерной для слоистой толщи мульды сдвижения. При этом в районах лежачего и висячего боков рудного тела за счет изгибов пород осадочной толщи в приконтактной зоне с положительной кривизной и их отставания по оседаниям от пород рудовмещающей толщи (рисунок 3) образуются полости со средним раскрытием 52 мм. Далее, в центральной части этой мульды, кривизна изгиба пород осадочной толщи на контакте ab (рисунок 1) меняет знак на противоположный (на минус), переходит в плоское дно, опережая по оседаниям породы рудовмещающей толщи (рисунок 2). В результате происходит вдавливание крепких пород осадочной толщи в разрыхленные процессами сдвижения слабые породы рудного тела на среднюю величину 26 мм. С механической точки зрения этот

процесс указывает на то, что происходит отжим разрыхленных процессами сдвижения пород рудной толщи в образовавшиеся полости отслоений, частично уменьшая их размеры раскрытия и объем примерно в два раза. Возможно, заполнение полостей отслоения происходит на большую величину, так как выдавливается увеличенная в объеме разрыхленная масса слабых пород рудной толщи.

Оставшиеся незаполненными разрыхленными породами части полостей отслоения могут аккумулировать в себе воду. Это может приводить к временному увеличению водопритоков в горные выработки при попадании в полость отслоения скважиной или пересечении ее (полости) тектонической трещиной.

2. Прогноз ожидаемых вертикальных сдвижений и деформаций в условиях недостаточности натуральных данных следует выполнять с использованием типовой кривой оседания, определяемой на основе дисперсионного анализа натуральных данных и представляемой аналитической функцией, а кривые наклона и кривизны определять как 1-ю и 2-ю производные от нее.

Образование зоны водопродящих трещин (ЗВТ) связано с распределением вертикальных сдвижений и деформаций подрабатываемого массива горных пород, поэтому прогноз ее развития может быть осуществлен на основе предрасчета сдвижений и деформаций методом типовых кривых. Метод позволяет прогнозировать распределение сдвижений и деформаций на поверхности и в слоях массива горных пород при определенных допущениях. В основе метода лежит использование типовых кривых, представляющих собой функции распределения в мульде сдвижения вертикальных и горизонтальных деформаций, отражающих специфику геомеханических процессов месторождений. Поэтому для получения типовых кривых, отражающих закономерности сдвижения горных пород Яковлевского месторождения богатых железных руд (БЖР), были использованы данные периодических наблюдений за сдвижением реперов профильных линий, расположенных на участках ведения горных работ по выемке первого горизонтального рудного слоя. Для анализа брались оседания реперов профильных линий в пределах от

репера с максимальным оседанием до репера с граничным значением деформаций, т.е. в пределах полумульды. Затем фактическую полумульду разделили на десять частей и в каждой точке деления определили значение оседаний η_i . Поскольку расстояния между реперами не равны 0.1 части длины полумульды, то значения η_i определялись интерполированием в программной среде AutoCad. Функция типовой кривой распределения оседаний $S(z)$ определялась по формуле (3):

$$S(z) = \eta_i / \eta_{\max}, \quad (3)$$

где η_i – фактическое оседание в точке деления полумульды, м; η_{\max} – величина максимального оседания в рассматриваемой полумульде, м; z – относительная координата точки, определяемая как $z = x/L$, x – расстояние от точки с максимальным оседанием земной поверхности до рассматриваемой точки полумульды, м; L – длина полумульды, м. В нашем случае длину полумульды разделили на 10 частей, поэтому $z = 0, 0.1, 0.2, 0.3, \dots, 1.0$.

Значения функции распределения оседаний, определенные по формуле (3), для одной профильной линии I-I - $S(z)_1$ и для другой профильной линии II-II – $S(z)_2$ представлены в таблице 1.

Проведенный факторный дисперсионный анализ показал, что типовые кривые оседаний $S(z)_1$ и $S(z)_2$ относятся к одной генеральной совокупности, т.е. рассматриваемые типовые функции, полученные по натурным данным, имеют одинаковую закономерность, отражающую распределение оседаний в мульде сдвижения. Это явилось основанием для получения окончательной функции типового распределения оседаний $S(z)_0$ как среднего из соответствующих значений функций $S(z)_1$ и $S(z)_2$ (таблица 1).

Таблица 1 - Функции типовых кривых распределения оседаний $S(z)_1$ (линия I-I) и $S(z)_2$ (линия II-II), окончательная функция оседаний $S(z)_0$.

z	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1
$S(z)_1$	1	0,91	0,9	0,89	0,87	0,64	0,4	0,3	0,2	0,1	0
$S(z)_2$	1	0,99	0,96	0,92	0,71	0,58	0,49	0,39	0,28	0,15	0
$S(z)_0$	1	0,95	0,93	0,9	0,79	0,61	0,44	0,34	0,24	0,12	0

Полученную функцию типового распределения оседаний $S(z)_0$ в табличном виде выразим аналитически, для чего используем аналитическое выражение нормального закона в дифференциальном виде (4):

$$S(z) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(z-a)^2}{2\sigma^2}}, \quad (4)$$

где σ – среднее квадратическое отклонение ($\sigma = 0,42$); a – параметр распределения, в нашем случае $a = 0$, поскольку анализ, обработка и получение функций распределения оседаний производилось в пределах полумульды.

С учетом числовых значений параметров σ и a аналитическое выражение функции типовой кривой оседаний (4) приобретет следующий вид (5):

$$S(z) = e^{-3z^2}. \quad (5)$$

Для сопоставления в таблице 2 представлены значения функции типовой кривой, полученные по формуле (5), и значения функции $S(z)_0$, полученные из обработки данных наблюдений по реперам профильных линий I-I и II-II (таблица 1). В результате сравнения среднее квадратическое отклонение составило 0,09. Для визуализации данных таблице 2 составлен совмещенный график этих двух функций (рисунок 3), показывающий их близкую сходимость.

Таблица 2- Значения аналитической функции типовой кривой оседаний $S(z)$, полученной по формуле (3) и из обработки натуральных данных $S(z)_0$

z	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1
$S(z)$	1	0,97	0,89	0,76	0,62	0,47	0,34	23	15	0,09	0,05
$S(z)_0$	1	0,95	0,93	0,9	0,79	0,61	0,44	0,34	0,24	0,12	0

Поскольку функция типового распределения оседаний выражена аналитически (формула 5), то функции типовых распределений наклонов (6) и кривизны (7) представляется возможным определить соответственно, как первую и вторую производные по уравнению (5):

$$S'(z) = -6ze^{-3z^2}, \quad (6)$$

$$S''(z) = 6(6z^2 - 1)e^{-3z^2}. \quad (7)$$

Полученные функции типовых кривых (5)–(7) предполагается использовать для прогноза вертикальных сдвижений и деформаций (оседаний, наклонов и кривизны) земной поверхности и, при определенных допущениях, в массиве горных пород. В частности, прогнозировать накопление деформаций кривизны на верхней границе зоны водопроницаемых трещин на участках, где происходит сложение деформаций вследствие частичного или полного совпадения границ отработки на различных горизонтах.

3. Накопление деформаций в массиве горных пород в зависимости от взаимовлияния границ очистных работ происходит по полиномиальному закону 2-го порядка, характер распределения которого зависит от конкретных горно-геологических условий.

Управлять геомеханическими процессами, снижая степень нарушенности техногенными водопроницаемыми трещинами подрабатываемый массив горных пород можно на основе установления механизма деформирования и образования в подработанных слоях массива техногенных трещин, включая водопроницаемые. При повторной подработке необходимо учитывать деформации, полученные после отработки каждого слоя. Учет состоит в суммировании деформаций кривизны в зависимости от взаимовлияния останки границ очистного пространства по различным слоям. В существующих методах прогнозных расчетов высоты ЗВТ этот факт практически не учитывается. Сложение деформаций, полученных вследствие ведения горных работ, рассчитанное с учетом взаимовлияния останки границ очистных работ по различным слоям, показывает, что высота ЗВТ может увеличиться на значительную величину, что подтверждается натурными данными. Для каждого месторождения и каждого отдельного случая требуется предварительный анализ геомеханических процессов накопления деформаций, согласно которому можно будет судить, при каком взаимном положении границ очистного пространства в различных слоях высота ЗВТ может увеличиться или остаться неизменной. Для упрощения расчетов накопление деформаций принималось происходящим по прямой пропорциональной зависимости от взаимного положения границ останки очистного пространства.

Для изучения процесса формирования зоны водопрводящих трещин от сложения деформаций при различном расстоянии между границами очистных выработок по двум слоям написан алгоритм, отражающий механизм сложения кривизны в программе Matlab. Полученная программная модель позволяет оценивать накопление деформаций кривизны в массиве горных пород на любом расстоянии от выработанного пространства. С использованием данного алгоритма проводились исследования накопления деформаций от взаимного расположения границ очистного пространства на примере отработки угольных пластов. В результате были получены графики, отражающие закономерность накопления кривизны в виде полиномиальной зависимости 2-го порядка. На всех полученных графиках накопление деформаций от взаимного расположения остановки границ очистного пространства выделяется участок незначительного приращения деформаций кривизны слоя, приуроченного к верхней границе ЗВТ (рисунок 4). Отсюда вытекает практическая рекомендация по формированию границ остановки очистных выработок: для того, чтобы при ведении горных работ высота ЗВТ не возрастала, необходимо соблюдать технологическое расстояние между границами очистных выработок в пределах выявленного участка (зона I на рисунке 4).



Рисунок 4 – Высота зоны водопрводящих трещин в зависимости от взаимного положения границ остановки очистных работ:
 Зона I - участок, где высота зоны водопрводящих трещин практически не изменяется.

Для условий Яковлевского месторождения по разработанному алгоритму программы был получен для контакта рудовмещающей и перекрывающей толщ график зависимости приращения деформаций от взаимовлияния остановки границ очистных работ двух слоев. Выбран именно этот участок, поскольку в подошве перекрывающей и рудовмещающей толщ залегает «относительный водоупор», который не может быть нарушен техногенными водопродводящими трещинами, по которым может начаться поступление воды из вышележащего нижнекаменноугольного водоносного горизонта.

На руднике был отработан 2-й слой под защитой 1-го отработанного и заложеной твердеющей закладкой слоя. В результате массив был повторно подработан. За мощность первого слоя принимается фактическое значение недозакладки выработанного пространства $m_1=0.4$ м, а для второго - недозакладка $m_2=0.1$ м (принято как в проекте ведения горных работ). Контакт перекрывающей и рудовмещающей толщ находится на расстоянии 70 м над выработанным пространством. На рисунке 5 приведен график суммарных значений кривизны, полученной после отработки двух слоев на рассматриваемом контакте, который также соответствует полиномиальной зависимости.



Рисунок 5- Зависимость приращения суммарной кривизны от взаимного положения границ остановки очистных работ.

Сначала по разработанному программному алгоритму была получена максимальная кривизна контакта толщ вследствие отработки 1-го слоя рудного тела (K_{1max}) (8):

$$K_{1max} = 1,85 * 10^{-4} \text{ м}^{-1} \quad (8)$$

При выемке 2-го слоя при условии полного совпадения границ максимальная кривизна на рассматриваемом контакте после процедуры сложения в разработанной программе составила (9):

$$K_{2max} = 2,31 * 10^{-4} \text{ м}^{-1}. \quad (9)$$

В результате при полном совпадении границ отработанных выработок значение кривизны контакта увеличится на $0,46 * 10^{-4} \text{ 1/м}$ относительно максимальной кривизны, полученной после отработки 1-го слоя. Граничная кривизна, определенная как функция содержания пород глинистого состава и распределения слоев по мощности в подрабатываемой толще, для рассматриваемых условий составила (10):

$$K_r = 10,03 * 10^{-4} \text{ м}^{-1}. \quad (10)$$

Так как максимальная кривизна после отработки 2-го слоя (K_{2max}) меньше граничной кривизны (K_r), то в «относительном водоупоре», находящемся в приконтактной зоне (рисунок 1), образовавшиеся нормальносекущие трещины не являются сквозными. Поскольку превышение значения K_r относительно K_{2max} составляют большую величину ($7,72 * 10^{-4} \text{ м}^{-1}$), то этот слой имеет большой запас надежности по сохранению своих водоупорных свойств.

Заключение

Диссертация является законченной научно-квалификационной работой, в которой содержится решение актуальной задачи по разработке методики накопления деформаций для прогноза развития зоны водопроводящих трещин при разработке Яковлевского рудника.

Основные результаты диссертационных исследований:

1. Для определения границ мульды и зоны опасного влияния горных работ получены граничные углы и углы сдвижений на основе анализа данных мониторинговых наблюдений за сдвижением реперов поверхности профильных линий.

2. Выведена формула для прогноза максимального оседания с учетом горно-геологических условий и полученных результатов натуральных наблюдений за сдвижением горных пород.
3. На основе полученного различия в закономерностях распределения сдвижения горных пород перекрывающей (осадочной) и рудовмещающей толщ выявлен механизм образования полостей отслоения на контакте толщ и произведена оценка процессов их образования.
4. На основе обработки результатов натуральных наблюдений за сдвижением и деформациями горных пород определены функции типовых кривых распределения оседаний, наклонов и кривизны в табличном виде, которые также выражены аналитически.
5. На основе метода типовых кривых разработана методика прогноза вертикальных сдвижений и деформаций горных пород для рассматриваемых условий.
6. Изучение механизма накопления деформаций от взаимного положения границ очистного пространства на математических моделях выявило, что сложение деформаций происходит по полиномиальному закону 2-го порядка. По тому же закону происходит изменение высоты зоны ЗВТ, функционально связанной с деформациями кривизны.
7. На графиках изменения высоты ЗВТ выявлены участки, на которых она практически не увеличивается при сложении деформаций. Поэтому рекомендуется формировать границы остановки очистных выработок по различным слоям в пределах выявленных участков.

Рекомендации и перспективы дальнейшей разработки темы: диссертационное исследование является перспективным в плане изучения влияния сдвижения пород рудовмещающей толщи на процессы деформирования пород осадочной толщи. Полученные результаты могут быть рекомендованы при проведении научно-исследовательских и проектных работ на Яковлевском руднике. Также могут получить продолжение исследования механизма образования техногенных водопроводящих трещин вследствие накопления деформаций при повторных подработках массива горных пород.

Публикации по теме диссертации.

В изданиях из Перечня ВАК:

1. Илюхин Д.А. Расчет зоны водопроявляющих трещин для железорудных месторождений на основе данных геомеханического мониторинга/ **Е.М. Малюхина**, Д.А. Илюхин // Маркшейдерский вестник. - 2015.- №4. - С. 59-63.
2. **Малюхина Е.М.** Влияние степени совпадения границ отработки по пластам свиты на высоту распространения зоны водопроявляющих трещин / **Е.М. Малюхина**, В.Н. Гусев // Маркшейдерский вестник. -2016. -№ 6. - С.39-42.
3. **Малюхина Е.М.** Исследование процессов сдвижения и деформаций горных пород по данным геомеханического мониторинга на Яковлевском руднике/ **Е.М. Малюхина**, В.Н. Гусев // Маркшейдерский вестник -2017. №5. - С. 64-70.
4. **Малюхина Е.М.** Определение типовых кривых вертикальных сдвижений и деформаций для горно-геологических условий Яковлевского рудника / **Е.М. Малюхина**, Д. А. Илюхин, В. Н. Гусев // Горный информационно-аналитический бюллетень «Получение аналитических моделей и расчетных методик, применимых для решения маркшейдерских задач». – 2018, №4 (спец. выпуск 14). – С.3-9.

В журналах, включенных в базы Scopus:

5. Gusev V.N. Prediction of water conducting fracture zone / V.N. Gusev, **Е.М. Maliukhina** // International Journal of Applied Engineering Research.-2016.-Vol. 11. № 11. - P. 7238-7239.
6. Gusev V.N. Assessment of development of water conducting fractures zone in the massif over crown of arch of tunneling (construction)/ Gusev V.N., **Maliukhina Е.М.**, Volokhov E.M., Tyulenev M.A., Gubin M.Y// International Journal of Civil Engineering and Technology.-2019- Vol. 10- Issue 2- P.635-643
7. Gusev V.N. Assessing the effects of underground mining activities on high-voltage overhead power lines / V.N. Gusev, A.E. Zhuravlyov , **Е.М. Maliukhina** // E3S Web of Conferences .- 2017. –Vol. 21. – P.1-6.

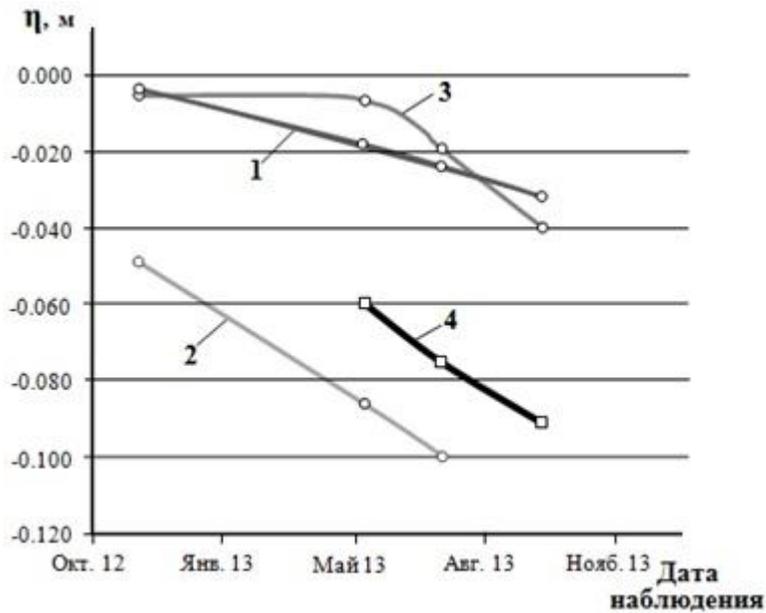


Рисунок 2 - Графики оседаний на контакте ab осадочной и рудовмещающей толщ (рисунок 1):

1, 3 – оседание пород осадочной толщ на контакте ab соответственно на линиях влияния, проходящих через точки 1 и 3 (рисунок 1); 2 - оседание пород осадочной толщ на контакте ab на линии влияния, проходящей через точку 2 (рисунок 1); 4 – оседание пород рудовмещающей толщ на контакте ab на линии влияния глубинного репера $Rp22$.

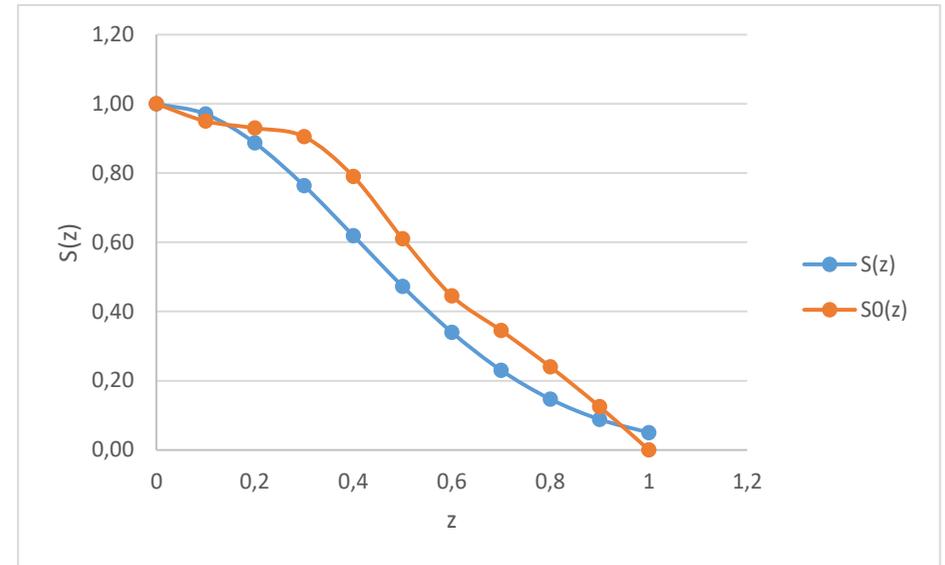


Рисунок 3- Совмещенный график типовых функций оседаний $S(z)$ и $S(z)_0$.