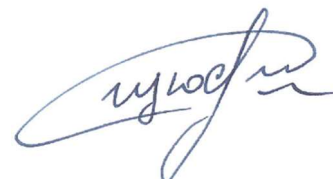


Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Пермский федеральный исследовательский центр
Уральского отделения Российской академии наук
(ПФИЦ УрО РАН)

На правах рукописи



Щегольков Юрий Сергеевич

**ОБОСНОВАНИЕ УГЛОВЫХ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА СДВИЖЕНИЯ
ГОРНЫХ ПОРОД И ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ ПРИ РАЗРАБОТКЕ
СВИТЫ ПЛАСТОВ КАЛИЙНО-МАГНИЕВЫХ РУД
(НА ПРИМЕРЕ ВЕРХНЕКАМСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ СОЛЕЙ)**

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

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
академик РАН, доктор технических наук
Барях Александр Абрамович

Пермь - 2026

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
ГЛАВА 1. СОСТОЯНИЕ ИЗУЧЕННОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ УГЛОВЫХ ПАРАМЕТРОВ МУЛЬДЫ СДВИЖЕНИЯ.....	12
1.1 Особенности геологического строения и отработки запасов ВКМС	12
1.2 Сущность, основные особенности и способы исследования процесса сдвижения горных пород и земной поверхности	18
1.2.1 Общая информация о процессе сдвижения горных пород и земной поверхности, анализ основных способов его исследования	18
1.2.2 Изученность процесса сдвижения горных пород и земной поверхности в условиях отработки запасов ВКМС	25
1.3 Угловые параметры процесса сдвижения горных пород и земной поверхности	34
1.3.1 Сущность и основные понятия угловых параметров процесса сдвижения горных пород и земной поверхности.....	34
1.3.2 Подходы к определению угловых параметров процесса сдвижения при подземном ведении горных работ.....	37
1.3.3 Состояние изученности угловых параметров процесса сдвижения в условиях отработки запасов ВКМС	45
1.4 Цели и задачи исследования	52
ГЛАВА 2. ОБОСНОВАНИЕ ПЕРЕЧНЯ ИССЛЕДУЕМЫХ УГЛОВЫХ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА СДВИЖЕНИЯ ДЛЯ УСЛОВИЙ ОТРАБОТКИ ЗАПАСОВ ВКМС	55
2.1 Анализ основных факторов, влияющих на вопрос классификации угловых параметров процесса сдвижения в рассматриваемых условиях	55
2.2 Определение подлежащих последующему рассмотрению угловых параметров процесса сдвижения для условий отработки запасов на рассматриваемом месторождении	60

2.3 Выводы.....	66
ГЛАВА 3. ВЫБОР КРИТЕРИЕВ ДЛЯ УСТАНОВЛЕНИЯ ФАКТИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН ИССЛЕДУЕМЫХ УГЛОВЫХ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА СДВИЖЕНИЯ В УСЛОВИЯХ ОТРАБОТКИ ЗАПАСОВ ВКМС	68
3.1 Граничные углы	68
3.2 Углы полных сдвижений.....	78
3.3 Углы максимальных оседаний.....	80
3.4 Углы сдвижения	80
3.5 Выводы.....	81
ГЛАВА 4. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЕЛИЧИН И УСТАНОВЛЕНИЕ АНАЛИТИЧЕСКИХ ЗАВИСИМОСТЕЙ УГЛОВЫХ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА СДВИЖЕНИЯ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ ПРИ ОТРАБОТКЕ ЗАПАСОВ НА ВКМС.....	83
4.1 Граничные углы	83
4.1.1 Выявление наиболее значимых факторов, которые могли бы оказать влияние на формирование граничных углов в условиях ВКМС	83
4.1.2 Обоснование величин граничных углов.....	85
4.2 Углы полных сдвижений и максимальных оседаний	92
4.2.1 Выбор и обоснование характерных геомеханических условий для последующего рассмотрения исследуемых угловых параметров	92
4.2.2 Обоснование величин углов полных сдвижений	94
4.2.3 Обоснование величин углов максимальных оседаний	106
4.3 Углы сдвижения	108
4.3.1 Исследование особенностей формирования краевой части мульды сдвижения в условиях полной подработки земной поверхности	112
4.3.2 Определение углов сдвижения в условиях полной подработки земной поверхности на основании «теоретико-эмпирического» подхода	121
4.3.3 Определение углов сдвижения в условиях полной подработки земной поверхности на основании эмпирического подхода	132

4.3.4 Сравнительное сопоставление фактических углов сдвига с результатами их определения на основании вышерассмотренных подходов применительно к условиям полной подработки земной поверхности.....	142
4.3.5 Определение углов сдвига в условиях неполной подработки земной поверхности	144
4.4 Выводы.....	149
ГЛАВА 5. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ.....	154
5.1 Сравнительный анализ полученных результатов с используемыми в настоящее время нормативными значениями угловых параметров.....	154
5.2 Оценка значимости полученных результатов.....	157
5.3 Ограничения и перспективы дальнейшего совершенствования полученных результатов.....	162
5.4 Выводы.....	164
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	166
СПИСОК УСЛОВНЫХ СОКРАЩЕНИЙ И ОБОЗНАЧЕНИЙ.....	171
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	172

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования

Верхнекамское месторождение солей (ВКМС) является одним из крупнейших в мире и представляет собой важный объект минерально-сырьевого комплекса России. Подземная отработка его запасов сопровождается нарушением естественного равновесного состояния породного массива, в результате чего происходит перемещение (сдвижение) толщи горных пород в сторону выработанного пространства.

Изучение процесса сдвижения горных пород и земной поверхности на ВКМС базируется, главным образом, на данных инструментальных наблюдений. Значимые результаты проводимых исследований находили отражение в периодически издаваемых (начиная с 1960 г.) нормативных документах – «Указаниях» и «Инструкциях», регламентирующих меры защиты рудников от затопления и охрану подрабатываемых объектов.

Одной из важнейших составляющих изучения процесса сдвижения являются угловые параметры, которые в обобщенной интерпретации являются комплексными показателями физико-механических свойств всей сдвигающейся породной толщи. Они представляют собой совокупность углов, каждый из которых имеет свое практическое назначение. Знание достоверных их величин позволяет решать широкий спектр инженерных задач, связанных с прогнозированием ожидаемых деформаций, расчетом размеров предохранительных целиков, определением местоположения зон с опасными деформациями и пр.

В настоящее время, на практике, в соответствии с действующими «Указаниями (мероприятиями) по защите рудников ПАО «Уралкалий» от затопления и охране объектов на земной поверхности от вредного влияния подземных разработок на ВКМС», углы максимальных оседаний θ не используются в явном виде, а фиксированные величины граничных углов $\delta_0 = 55^\circ$ (65° на границе отработки смежных параметров) и углов полных сдвижений $\psi = 55^\circ$

далеко не всегда позволяют достоверно вычислить длину полумульды сдвижения и, как следствие, правильно рассчитать ожидаемые деформации. Построение предохранительных целиков под объекты на земной поверхности осуществляется по трем фиксированным величинам граничных углов $\delta_0 = \{55^\circ, 65^\circ \text{ и } 75^\circ\}$, что противоречит смысловой нагрузке последних и определяет целесообразность возврата к использованию углов сдвижения δ .

Важно также отметить, что процесс сдвижения в рассматриваемых условиях может быть весьма продолжителен во времени. В этом случае поиск временной зависимости изменения угловых параметров в зависимости от характера деформирования и сроков «полной реализации выработанного пространства» является немаловажным актуальным вопросом, решение которого позволит существенно повысить достоверность прогнозирования деформационных процессов на земной поверхности и в подрабатываемом массиве.

Таким образом, представленная диссертационная работа, направленная на актуализацию существующих угловых параметров сдвижения земной поверхности в условиях ВКМС, представляет собой важный научный и практический интерес.

Степень разработанности темы исследования

Проблема сдвижения горных пород и земной поверхности при подземной отработке запасов полезного ископаемого является широко распространенной и глубоко изученной в отечественной и зарубежной горной науке. Значительный вклад в исследование угловых параметров процесса сдвижения внесли такие ученые как Авершин С. Г., Акимов А. Г., Балафин И. Е., Барях А. А., Бахурин И. М., Волкоморова Н. В., Жабко А. В., Иванова О. В., Иванов И. Ю., Иофис М. А., Казаковский Д. А., Колесник Н. А., Кузнецов Г. Н., Кулибаба С. Б., Медянцев А. Н., Милетенко Н. А., Мякенький В. И., Назаренко В. А., Онищенко А. В., Петухов И. М., Посыльный Ю. В., Сашурин А. Д., Тетерин А. В., Шадрин А. Г., Щедрина Н. Н., Энхтур Л., Kratzsch H., Knothe S., Whittaker B. N., Peng S. S., Feng G., Wang P., Cao J., Huang Q., Guo L., Luo J., Li Y., Guo Q. и многие другие.

В условиях ВКМС угловые параметры процесса сдвижения изучались такими учеными как Нестеров М. П., Аникин Н. Ф., Львова А. В., Крайнев Б. А.,

Тенисон Л. О. и др. Труды отмеченных ученых внесли значительный вклад в разработку теории сдвижения и определение численных величин используемых в настоящее время углов. При этом, остается ряд нерешенных проблем, касающихся учета динамики и пространственной изменчивости угловых параметров в зависимости от различных горно-геологических условий отработки запасов. Решение отмеченных проблем представляет собой важную научную и практическую задачу.

Объект исследований – земная поверхность и массив горных пород, подработанные подземными горными выработками.

Предмет исследований – совокупность угловых параметров процесса сдвижения горных пород и земной поверхности в условиях ВКМС.

Целью работы является обоснование для условий ВКМС перечня угловых параметров процесса сдвижения с последующим уточнением их величин и установлением аналитических зависимостей от значимых влияющих факторов и изменения во времени.

Идея работы состоит в установлении величин и/или определяющих аналитических зависимостей исследуемых угловых параметров на основе комплексного анализа горно-геологических данных, результатов опробования на физико-механические свойства пород и результатов инструментальных наблюдений за сдвижением земной поверхности с последующим применением статистических, эмпирических и теоретических методов исследования.

Основные задачи исследования:

1. Выполнить анализ функционального назначения, численных значений и подходов к определению ранее применявшихся и применяющихся в настоящее время на ВКМС угловых параметров процесса сдвижения;
2. Выявить факторы, влияющие на вопрос классификации угловых параметров процесса сдвижения в условиях ВКМС;
3. Обосновать перечень наиболее значимых углов, подлежащих исследованию в рамках настоящей работы;

4. Выбрать и обосновать критерии для установления фактических величин рассматриваемых углов по результатам обработки натуральных инструментальных наблюдений за развитием процесса сдвижения в условиях отработки запасов ВКМС;

5. Определить величины и установить аналитические зависимости, описывающие изменение принятых во внимание углов от наиболее значимых влияющих факторов и параметра времени;

6. Выполнить обсуждение полученных в ходе исследования результатов с целью подтверждения их значимости, выявления ограничений использования и перспектив дальнейшего совершенствования.

Методы и методология исследования. При выполнении диссертационной работы выполнен анализ литературных данных и нормативной документации по рассматриваемой тематике, осуществлен отбор и анализ данных инструментальных наблюдений за сдвижением земной поверхности с последующей аналитической обработкой сформированного массива данных, использованы корреляционно-регрессионный анализ, эмпирические и теоретические методы исследования.

Основные научные положения, выносимые на защиту:

1. Математическая модель для определения граничного угла, адекватно описывающая его пространственно-временное изменение в зависимости от отношения достигнутого/прогнозного оседания над центром граничной выемочной зоны к максимальному расчетному оседанию над ней;

2. Методы определения углов полных сдвижений и максимального оседания, позволяющие получить их значения на основе величины наибольшей степени нагружения междукамерных целиков среди отработанных пластов на участке полной подработки земной поверхности и учета наличия локального увеличения интенсивности развития процесса сдвижения в границах участка неполной подработки земной поверхности;

3. Зависимости для определения угла сдвижения, позволяющие получить его адекватные значения на заданный момент времени для условий полной и неполной

поправок земной поверхности на основе учета простых параметров, таких как глубина подошвы нижнего пласта, величина граничного угла, фактическое/прогнозное максимальное оседание в полумульде сдвижения, мощность наносов и ширина выработанного пространства.

Достоверность научных положений, выносимых на защиту обоснована анализом и обобщением представительного объема данных натурных инструментальных наблюдений, базирующихся на известных и проверенных геодезических и математико-статистических методах обработки информации, а также хорошей сходимостью полученных результатов исследования с фактическими величинами угловых параметров.

Научная новизна работы:

- Обоснован минимально-достаточный перечень наиболее значимых угловых параметров процесса сдвижения горных пород и земной поверхности, лежащих в основе решения распространенных инженерных и научных задач в условиях отработки запасов ВКМС;

- Установлены значения критериев, позволяющих определять фактические величины принятых во внимание угловых параметров по результатам натурных инструментальных наблюдений за сдвижением земной поверхности;

- Выявлено, что на формирование величин граничных углов наиболее сильное влияние оказывает процесс сдвижения над центральной частью выемочной зоны, примыкающей к постоянной границе выработанного пространства, при этом наиболее существенные изменения их значений происходят на начальном этапе его развития;

- Установлено, что углы полных сдвижений в условиях однородности строения геомеханической системы не склонны к значительным изменениям во времени и зависят, главным образом, от скорости оседания подрабатываемого массива горных пород в начальный период времени (для «поддатливых» целиков особо значимы первые 5 лет с момента отработки запасов);

- Найдена причина возможного уменьшения величин углов полных сдвижений в условиях неоднородности строения геомеханической системы,

связанная с удлинением полумульды сдвижения вследствие более интенсивного развития процесса сдвижения в выемочной зоне, смежной с граничной;

- Разработаны теоретическая и эмпирическая модели формирования краевой части мульды сдвижения над нетронутым массивом, использование которых легло в основу установления выражений для определения углов сдвижения на заданный момент времени.

Практическая значимость работы: Результаты исследования могут быть полезными для совершенствования нормативной базы, а также при научных исследованиях и инженерных расчетах, связанных с определением необходимых размеров предохранительных целиков под объекты на земной поверхности и с оценкой безопасности зданий и сооружений, непосредственно находящихся или планируемых к строительству в границах вредного влияния подземных горных работ.

Апробация работы. Основные результаты исследования представлены на 5-и конференциях:

- XI Международная научно-практическая конференция «Инновационные направления в проектировании горнодобывающих предприятий. Безопасное и эффективное освоение месторождений полезных ископаемых» (г. Санкт-Петербург 2024 г.);

- XII Международная научно-практическая конференция «Инновационные направления в проектировании горнодобывающих предприятий. Безопасное и эффективное освоение месторождений полезных ископаемых» (г. Санкт-Петербург 2025 г.);

- LI Международная научно-практическая конференция «Наука России: Цели и задачи» (г. Самара, 2025 г.);

- XIX Международная научно-практическая конференция «Новое поколение: достижения и результаты молодых ученых в реализации научных исследований» (г. Москва, 2025 г.);

- Весенняя сессия «ГИ УрО РАН» (г. Пермь, 2026 г).

Публикации. Основные результаты исследований отражены в 10 опубликованных работах, из них 8 в изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки РФ.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав с выводами в каждой из них, заключения, списка условных сокращений и обозначений и списка литературы, включающего 122 наименования. Диссертация изложена на 185 страницах машинописного текста, содержит 36 рисунков и 9 таблиц.

Благодарности. Автор выражает глубокую признательность академику РАН, д-р техн. наук Баряху А.А. и канд. техн. наук Тенисон Л.О. за ценные советы и рекомендации, полученные в ходе выполнения исследования.

ГЛАВА 1. СОСТОЯНИЕ ИЗУЧЕННОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ УГЛОВЫХ ПАРАМЕТРОВ МУЛЬДЫ СДВИЖЕНИЯ

1.1 Особенности геологического строения и отработки запасов ВКМС

ВКМС является одним из крупнейших разрабатываемых в мире. Открыто оно в 1925 г. и с 1934 г. разрабатывается подземным способом. В территориальном отношении рассматриваемое месторождение расположено на северо-востоке Пермского края, в районе Камского водохранилища, преимущественно на его левобережье. Оработка его запасов в настоящее время ведется девятью рудниками, разрабатывающими запасы Быгельско-Троицкого, Дурыманского, Усть-Яйвинского, Талицкого, Палашерского, южной части Балахонцевского, Соликамского, Ново-Соликамского и Половодовского участков.

Шахтные поля рудников расположены в различных частях месторождения и имеют некоторые отличия по горно-геологическим условиям разработки, например: глубине залегания промышленных пластов, их мощности, складчатости, минеральному составу и т.д.

Вопросы геологии ВКМС изучались известными учеными и нашли отражение во множестве работ [1-6 и др.]. В плане месторождение имеет форму неправильного овала, вытянутого в меридиональном направлении. Калийно-магниева залежь расположена внутри контура соляной толщи и представляет собой линзообразное тело, площадью около 3,7 тыс. км², распространенное с севера на юг на 140 км, с запада на восток – на 40 км. Геологические запасы месторождения значительны и оцениваются по карналлитовой породе в 96 млрд. т, по сильвинитам - 113 млрд. т, по каменной соли - 4,7 трлн. т [6].

Отложения соляной толщи, имеют глубину залегания кровли от 150 до 700 м. Они перекрываются комплексом пород верхнего отдела пермской системы и четвертичными отложениями, что видно из рисунка 1.

Эра	Система	Отдел	Ярус	Горизонт	Свита	Толща	Зона	Индекс	Литологическая колонка	Мощность, м	Характеристика пород								
Палеозойская	Пермская	Верхний	Уфимский	Шешмипский	Шешмипская	Пестроцветная		Q		0-80	Глины, глины песчанистые, пески, галечники, суглинки								
								P _{1ss}		0-675	Красноцветные глины, аргиллиты, алевролиты, песчаники и конгломераты с подчиненными прослоями сероцветных глинисто-карбонатных пород								
								P _{1sl2}		90-170	Известняки глинистые серые и желтовато-серые с подчиненными прослоями песчаников, алевролитов и глин								
								P _{1sl1}		13-138	Мергели темно-серые с прослоями известняков, известковистых глин, гипса и каменной соли. Два нижних прослоя выделены в переходную пачку								
								Перех. пачка		2-37									
								ПКС	P _{1br4}		15-25	Каменная соль мелкозернистая							
								Сильвинит-карналитовая зона	P _{1br3^{cm}}		13-122	Пласты карналитовой породы и пестрого сильвинита, чередующиеся с пластами каменной соли							
								Сильвинитовая зона	P _{1br3^{sil}}		3,3-30	Пласты красного сильвинита, переслаивающиеся с каменной солью							
								ПдКС	P _{1br2}		до 515	Каменная соль средне- и крупнозернистая с примесью глинисто-ангидритового материала							
								Соликамская	Соликамская	Терригенно-карбонатная	Соляно-мергельная	Соляная	Соляная	Соляная	Соляная	Соляная	Соляная	Соляная	Соляная
								Соликамский	Соликамская	Терригенно-карбонатная	Соляно-мергельная	Соляная	Соляная	Соляная	Соляная	Соляная	Соляная	Соляная	Соляная
								Иренский	Березниковская	Соляная	Соляная	Соляная	Соляная	Соляная	Соляная	Соляная	Соляная	Соляная	Соляная
								Кунгурский	Березниковская	Соляная	Соляная	Соляная	Соляная	Соляная	Соляная	Соляная	Соляная	Соляная	Соляная

Пласт	Литологическая колонка	Средняя мощность, м
К		0,8
И-К		6,1
И		1,3
З-И		2,4
З		0,6
Ж-З		3,2
Ж		0,8
Е-Ж		4,2
Е		7,6
Д-Е		3,4
Д		8,3
Г-Д		2,9
Г		6,5
В-Г		2,2
В		5,8
Б-В		1,6
Б		1,9
А		1,4
А-КрI		2,0
КрI		1,0
КрI-КрII		1,4
КрII		4,4
КрII-КрIII ^к		1,8
КрIII ^к		0,9
КрIII ^к -КрIII ^п		0,8
КрIII ^п		1,1
КрIII ^п -КрIII ^н		1,6
КрIII ^н		0,8

Условные обозначения:

	- глины песчанистые		- аргиллиты		- ангидрит		- сильвинит красный
	- пески		- известняки		- карналитовая порода		- каменная соль
	- глины		- мергели		- сильвинит пестрый		
	- песчаники		- глины мергелистые		- сильвинит полосчатый		

Рисунок 1 – Стратиграфический разрез ВКМС

Соляная толща подразделяется (снизу-вверх) на ПдКС, КМЗ и ПКС.

ПдКС (P_1br_2) делится на три пачки (горизонта), отличающихся друг от друга количеством пластов терригенно-хемогенных пород и мощностью. Каменная соль представлена обычными для месторождения разновидностями светло- и темно-серого перистого, шпатового и зернистого галита. Порода имеет слоистое строение, обусловленное чередованием прослоев галита и глинисто-ангидритового материала. Мощность нижней пачки изменяется от 61 до 99 м, средней – от 50 до 440 м, верхней – от 8 до 66 м (в среднем 25 м). В основании верхней пачки ПдКС находится пласт МГ, средней мощностью около 2 м.

КМЗ (P_1br_3) представлена серией чередующихся продуктивных пластов, разделенных между собой каменной солью. Она делится на сильвинитовую ($P_1br_3^{sil}$) и сильвинит-карналлитовую ($P_1br_3^{cm}$) зоны. Первая имеет мощность от 3,3 до 30 м (в среднем 17,4 м) и состоит из трех пластов красного сильвинита (Кр.Ш, Кр.П и Кр.І) и пласта полосчатого сильвинита А, отделенных друг от друга межпластовой каменной солью. Вторая имеет мощность от 13 до 122 м (в среднем 53,8 м) и состоит из девяти основных пластов, индексируемых буквами от Б до К, которые представлены карналлитовой породой, пестрым сильвинитом или обеими породами сразу, так называемыми «смешанными солями». Пласт Б залегает непосредственно на пласте А, образуя один промышленный пласт АБ. Пласт В состоит из шести слоев и слоя-спутника В'. Отработке подлежат, главным образом, три промышленных пласта: В, АБ, и Кр-П.

ПКС (P_1br_4) распространена на преобладающей площади месторождения, но отсутствует на сводах некоторых поднятий, где она подвергалась подземному выщелачиванию. Ее мощность, в нормальном разрезе, меняется от 15 до 25 м, составляя в среднем 20 м. Порода имеет ярко выраженную слоистую текстуру, обусловленную чередованием прослоев различных структурных разновидностей галита и глинисто-ангидритового материала.

Над ПКС залегают пласты нижнесоликамской подсвиты (P_1sl_1), составляющие соляно-мергельную толщу. Ее мощность меняется в пределах 15-160 м, составляя в среднем около 100 м. Она сложена на 65% мергелями и глинами,

на 30% каменной солью и на 5% известняками, гипсами, ангидритами [6]. Трещиноватые породы СМТ обводнены, при этом наиболее водообильными являются мергели ее верхней части. Пласты каменной соли залегают в нижней части толщи и составляют переходную пачку, мощность которой колеблется от 2 до 37 м и составляет в среднем 20 м. Кровля ПП представляет собой соляное зеркало, являющееся границей зоны выщелачивания соляных пород.

Выше СМТ расположена верхнесоликамская подсвета (P_{1sl_2}), представленная ТКТ. Ее мощность колеблется от 90 до 170 м и сложена известняками, доломитами, тонкослоистыми мергелями, аргиллитами, алевролитами, мелкозернистыми песчаниками. Все породы ТКТ в той или иной степени трещиноваты и являются основным коллектором подземных пресных вод, источником хозяйственнопитьевого водоснабжения в районе ВКМС.

Выше залегает шешминская свита (P_{1ss}), представленная пестроцветной толщей. Ее мощность изменяется от 0 до 675 м, с локализацией максимальных значений в районе Дуринской площади месторождения. ПЦТ сложена песчаниками и алевролитами бурыми, зеленовато-серыми, серыми, иногда с маломощными пропластками мергеля и известняка с включениями медистых соединений в виде малахита и азурита. В толще присутствуют водосодержащие прослои, мощностью 1-3 м, они образуют локальные водоносные линзы, иногда с небольшими напорами в нижних частях горизонта.

В непосредственной близости к земной поверхности залегают четвертичные отложения, представленные рыхлыми образованиями различного происхождения: глинами, суглинками, супесями, песками, галечниками различных генетических типов, а также торфяно-болотными отложениями. В отдельных случаях их мощность достигает 80 м, средняя составляет - 10,3 м.

Ввиду наличия над соляной толщей водоносных горизонтов и легкой растворимости солей, отработка запасов месторождения ведется способами, исключающими возможность проникновения воды в выработанное пространство, что, главным образом, сопряжено с необходимостью сохранения водонепроницаемости пачки пород, расположенной между кровлей верхнего

отрабатываемого пласта и подошвой первого снизу водоносного горизонта, называемой водозащитной толщей.

Нарушение сплошности ВЗТ может привести к затоплению рудника с сопутствующим комплексом негативных последствий для подработанных территорий [7, 8], вплоть до образования провалов значительных размеров [9–12]. Во избежание этого, на месторождении применяют камерную систему разработки с поддержанием кровли ленточными целиками. Последние, по характеру деформирования, определяемого степенью нагружения C , можно разделить на «жесткие» ($C \leq 0,4$) - устойчивые в течение длительного времени и «потдатливые» ($C > 0,4$) - достаточно быстро теряющие устойчивость и способствующие плавному опусканию толщи. Оработка запасов в настоящее время ведется, главным образом, с оставлением «жестких» целиков, что обусловлено обеспечением более безопасных условий для сохранения сплошности ВЗТ.

В качестве дополнительно применяемых мер охраны ВЗТ и снижения деформаций земной поверхности можно выделить закладку выработанного пространства и создание зон смягчения.

Объемы закладки за последние годы значительно выросли. В настоящее время наиболее распространена гидравлическая закладка солеотходами, реже применяется механическая закладка каменной солью от проходки горных выработок. Основная цель закладки - уменьшение объема пустот и как, следствие, снижения величин конечных оседаний земной поверхности и прогибов слоев водозащитной толщи.

Создание зон смягчения направленно на снижение градиента оседаний у постоянных границ выработанного пространства и на участках, примыкающих к границам влияния аномальных зон в ВЗТ. Их формирование осуществляется за счет изменения параметров системы разработки, регулирования степени заполнения очистных камер закладкой или исключения из отработки одного из рабочих пластов.

Технологическим схемам ведения подготовительных и очистных работ, применявшихся за все время отработки запасов Верхнекамского месторождения

солей, посвящено довольно большое количество трудов, примерами которых являются [13-18 и пр.].

Параметры применяемой системы разработки (длина, ширина и высота очистных камер, размеры междукамерных целиков, наличие и ширина междуходовых целиков, полнота заполнения камер закладкой и ее тип) могут отличаться даже в пределах обрабатываемых блоков, что обуславливает необходимость выделения отдельных зон, характеризующихся однородностью сформированной геомеханической системы.

Наиболее постоянным параметром является длина камер, которая в условиях отработки месторождения составляет 150-300 м [17].

Ширина камер определяется, главным образом, устойчивостью вмещающих пород и изменяется от 3 до 16 м. В последнее время широкое распространение получили одноходовые по ширине схемы выемки, где ширина камер определяется размерами исполнительного органа выемочного комбайна (4,1-5,5 м).

Высота камер, в основном, соответствует мощности вынимаемых пластов с приращением глинисто-солевых коржей, подрубаемых для обеспечения устойчивого состояния кровли.

Ширина междукамерных целиков зависит от параметров камеры, состава и свойств вмещающих пород, глубины разработки, допустимого показателя прогиба слоев ВЗТ (значение расчетного прогиба можно дополнительно уменьшить за счет повышения степени заполнения камер закладкой и изменения типа закладочного материала), допустимой степени нагружения (определяет срок сохранения устойчивости целика и характер его деформирования). В силу широкого диапазона горно-геологических и горнотехнических условий на площади месторождения, ширина междукамерных целиков изменяется от 3 до 18-20 м и в каждом конкретном случае устанавливается расчетным путем в соответствии с «Указаниями» [19]. При отработке нескольких пластов междукамерные целики имеют соосное расположение.

МХЦ уже междукамерных и достаточно быстро теряют устойчивость. Их оставляют, как правило, при необходимости временного (на момент отработки

запасов полезного ископаемого) поддержания пород непосредственной кровли в камерах большой ширины.

1.2 Сущность, основные особенности и способы исследования процесса сдвижения горных пород и земной поверхности

1.2.1 Общая информация о процессе сдвижения горных пород и земной поверхности, анализ основных способов его исследования

Подземная отработка месторождений полезных ископаемых сопровождается нарушением естественного равновесного состояния породного массива, в результате чего происходит перемещение (сдвижение) толщи горных пород в сторону выработанного пространства. Сам процесс сдвижения имеет свои характерные особенности для каждого конкретного месторождения и представляет собой сложное физическое явление, находящееся в зависимости от большого числа факторов, к основным из которых, применительно к отработке пластовой залежи, относятся: глубина ведения горных работ, применяемая система разработки, число отрабатываемых пластов, их вынимаемая мощность и угол падения, наличие закладки, нарушенность толщи ранее пройденными выработками, размеры выработанного пространства и оставляемых целиков, физико-механические свойства горных пород, скорость подвигания фронта очистных работ, геологические особенности строения породной толщи, гидрогеологические условия, тектонические нарушения, рельеф местности и т.д.

Часть массива горных пород, подвергшуюся сдвижению под влиянием подземной разработки, называют областью сдвижения, а соответствующий участок земной поверхности, характеризующийся проявлением оседаний, носит название

мульды сдвижения. Различают две основные формы мульды: с вогнутым дном и с плоским дном. Первая форма образуется в условиях неполной подработки, при которой с увеличением размеров выработанного пространства D участка отработки запасов, расположенного на глубине H наблюдается рост величины максимального оседания земной поверхности - η_m . Вторая форма образуется в условиях полной подработки, при которой не происходит увеличения η_m с дальнейшим увеличением размеров D участка отработки запасов, расположенного на глубине H .

В зависимости от условий разработки, распределение деформаций в породной толще и по мульде сдвижения может носить как плавный, так и сосредоточенный характер, выражаемый, например, в образовании трещин и уступов. В некоторых случаях, локализованная концентрация деформаций в сочетании с дополнительными факторами может привести к образованию провалов, что характерно и для условий отработки запасов ВКМС.

В изучении особенностей процесса сдвижения нашли применение теоретические исследования, инструментальные наблюдения с последующей обработкой результатов измерений, физическое и численное моделирование.

Теоретические исследования характеризуются установлением аналитических зависимостей между количественной стороной процесса сдвижения и существующими горно-геологическими условиями на основе теоретических предположений или физической сущности процесса.

Начало развития теоретических исследований с попытками научного обоснования специфики протекания процесса сдвижения можно соотнести с появлением в 1868 г. «теории нормалей» Туалье-Гоно [20-24], которая впоследствии подвергалась различным совершенствованиям, уточнениям и дополнениям со стороны Шпарре, Дюмона Г., Ичинского, Гауссе, Гольдрейха, Тириара и др. Параллельно с ней развивались и другие теоретические взгляды, например: «теория балок» Шульца Ф., «теория естественного откоса» Ржихи, «теория купола» Файоля и пр. [20-24]. Несмотря на их многообразие, лишь некоторые нашли свое подтверждение на отдельных стадиях процесса сдвижения в определенных горно-геологических и горнотехнических условиях.

Главным недостатком теоретических исследований является их построение на основе внешних проявлений процесса сдвижения, что не позволяет учесть в формируемой гипотезе или теории количественные характеристики параметров, отражающих реальные свойства деформирующихся горных пород в массиве, которые, в свою очередь, имеют значительный разброс в различных горно-геологических и горнотехнических условиях отработки запасов. На теоретические исследования в значительной мере повлияло начавшееся с конца XIX века активное развитие инструментальных наблюдений, которым со временем придавалось все большее значение.

Инструментальные наблюдения заключаются в том, что на земной поверхности (в толще пород или на стенах имеющихся зданий и сооружений), а также в подземных горных выработках закладываются профильные линии, состоящие из системы реперов, за которыми до начала подработки, в процессе подработки и после окончания процесса сдвижения ведутся систематические наблюдения при помощи маркшейдерско-геодезических приборов. В целях контроля, могут дополнительно применяться аэрофотосъемки, воздушное лазерное сканирование, съемки с использованием радарных спутниковых технологий и т.д.

Проведение наблюдений требует длительного времени, существенных материальных затрат и далеко не всегда результаты, полученные в условиях конкретного месторождения пригодны для других горно-геологических условий.

Обработка результатов измерений позволяет получить достоверные данные о параметрах процесса сдвижения, необходимые для вывода объективных закономерностей и решения различных задач, связанных с обеспечением безопасности подземной разработки и охраной подрабатываемых объектов.

Одним из первых, кто начал применять инструментальные измерения в исследовании процесса сдвижения земной поверхности считается английский исследователь Гудвин, опубликовавший свои наблюдения в 1864 г. [21, 22, 25, 26]. Ему удалось установить, что характер сдвижения поверхности определяется применяемой системой разработки, свойствами горных пород, значениями углов падения, мощности пластов полезного ископаемого и др.

На исходе XIX века Дортмундским горным управлением в Рурском бассейне были проведены обширные инструментальные наблюдения, которые включали систематические нивелировки [21, 22, 25]. Главной их задачей являлось определение численных значений углов сдвижения. Все результаты, полученные в ходе исследований, были воплощены в «Дортмундских правилах», нашедших применение во многих странах не проводивших собственных наблюдений. Далее, с конца XIX века, инструментальные наблюдения стали проводиться во многих крупных горнодобывающих бассейнах развитых стран.

В горной промышленности дореволюционной России систематические инструментальные наблюдения практически не проводились. Они получили развитие только с 1919 г. по инициативе Бахурина И. М. В 1923 г., на основе Дортмундских правил при участии Леонтовского П. М., были разработаны первые «Временные правила» для шахт Донецкого бассейна. С началом Великой Отечественной войны производство наблюдений значительно сократилось, но в послевоенные годы, получило значительное развитие, связанное с бурным ростом добычи полезных ископаемых и реконструкцией предприятий. Это также актуально и для условий ВКМС, где в 1939 г., спустя непродолжительное время с начала отработки запасов (1934 г.), были заложены первые профильные линии на земной поверхности и начаты инструментальные наблюдения, однако более масштабное развитие они получили лишь в середине прошлого века.

С целью получения более полных и достоверных данных о пространственно-временном характере деформирования массива горных пород непрерывно совершенствовалась методика производства наблюдений. На основе результатов обработки полученной информации велось изучение механизма процесса и устанавливались функциональные зависимости между элементами сдвижения, что способствовало появлению и совершенствованию различных методов расчета сдвижений и деформаций земной поверхности. Последние можно условно разделить на эмпирические, основанные на параметрах отработки запасов и результатах натурных наблюдений и полуэмпирические, сочетающие в себе теоретические исследования и результаты натурных наблюдений [27, 28].

Из эмпирических методов, базирующихся на использовании статистических зависимостей между параметрами подработки, перемещениями и деформациями земной поверхности, наиболее известным в нашей стране является метод типовых кривых. Он получил значительное распространение для условий подземной отработки запасов угольных месторождений и изучался Колбенковым С.П., Иосифом М. А., Медянцевым А. Н., Петуховым И. А. и др. [29-31]. Упомянутый метод применяется и в условиях ВКМС, его изучением занимались Нестеров М. П., Аникин Н. Ф., Львова А. В., Тенисон Л. О., Кутовой С. Н. и др. [32, 33 и др.]. К менее распространенным эмпирическим методам можно отнести такие, как номограмм, расчета в функции от кратности подработки, расчета с помощью графиков-аналогов и пр.

Полуэмпирические методы [20, 27, 34-39] базируются на сочетании результатов натуральных наблюдений с теоретическими моделями, теорией вероятности и различными функциями влияния на земную поверхность (изучались Литвишиным И., Брайнером Г., Бухгеймом В., Муллером М. А., Кайнгорстом Г., Байером Ф., Занном Б., Шульте Г., Эрхардтом В., Зауером А., Кнотте С., Булдыком В, Ершовым Н. М., Мьякеньким В. Н., Медянцевым А. Н., Иофисом М. А., Хадсоном Д. А., Брайном Х. Г., Костеничем В. С., Акимовым А. Г., Казаковским Д. А., Кацнельсоном Н. Н. и др.). Применительно к условиям ВКМС, для прогноза оседаний Кутовой С. Н. и Катаев А. В. [40], использовали метод интеграционных палеток, в основе которого лежит функция влияния.

Физическое моделирование предусматривает исследование процесса сдвигения на плоских или объемных стендах. Впервые оно было предложено Кузнецовым Г. Н. в 1936 г. [41-43] и получило дальнейшее развитие в трудах Колбенкова С. П., Земисева В. Н. и др. [37, 44].

Для проведения исследования создается приближенная к реальным условиям модель породной толщи из эквивалентных по физико-механическим свойствам материалов [45] и имитируется выемка полезного ископаемого, приводящая к развитию процесса сдвигения, за которым ведутся наблюдения с использованием высокоточных приборов и приспособлений. В результате, при малых затратах

времени, появляется возможность всестороннего изучения смоделированного процесса сдвижения как в породной толще, так и на земной поверхности.

Проведение такого эксперимента позволяет не только выявить качественные характеристики процесса сдвижения и деформирования пород, которые невозможно установить ни теоретическими исследованиями, ни инструментальными измерениями, но и установить некоторые количественные зависимости на основе численных данных, полученных в результате проведенных исследований. В то же время на моделях невозможно точно воспроизвести все параметры породной толщи, например, микротрещеноватость и мелкоблоковую трещиноватость, что не дает возможности уверенно говорить об установленных количественных соотношениях между интересующим параметром сдвижения и влияющими факторами.

Достоверностью результатов физического моделирования может послужить соответствие полученных в ходе исследования результатов натурным инструментальным измерениям.

Численное моделирование. Характеризуются установлением аналитических зависимостей между количественной стороной процесса сдвижения и существующими горно-геологическими условиями на основе закономерностей механики сплошной среды или статистических закономерностей в зависимости от выбранной модели массива, в качестве которой принимается несвязная, стохастическая, упругая, однородная пластичная, сыпучая или другая среда. Среди методов численного моделирования для решения вопросов сдвижения и геомеханики можно выделить следующие: метод конечных элементов, метод конечных разностей, метод граничных элементов, метод дискретных элементов, метод конечных объёмов и др.

Начало активного развития этого направления исследований можно соотнести со серединой прошлого века, когда начали появляться и использоваться быстродействующие электронно-вычислительные машины. Общий принцип решения поставленной задачи можно свести к построению геомеханической и математической моделей, алгеброизации (дискретизации) задачи, разработке

алгоритма, программированию и реализации решений на ЭВМ. Описание состояния породного массива в выбранной модели требует привлечения обширного математического аппарата и некоторого абстрагирования от ряда особенностей строения изучаемой среды. Вид и параметры уравнения состояния определяются на основании специфики конкретной геологической среды с учетом результатов испытаний физико-механических свойств горных пород на исследуемом участке.

Существующие подходы к построению математических моделей применительно к вопросу сдвижения породной толщи и земной поверхности отражены в работах Агиутантиса З. [46, 47], Кармиса М. [48, 49], Гавриленко Ю. Н. [50, 51], Коновалова О. Л. [52, 53], Журавикова М. А. [52-54], Баряха А. А. [55, 56], Кашникова Ю. А. [57, 58], Ермашова А. О. [59] и др.

Эволюция вычислительной техники поспособствовала развитию аппарата математического моделирования, что нашло отражение в создании программных комплексов, таких как Ansys, FLAC 3D, Comsol Multiphysics, Abaqus, Plaxis, FEM models, GeoSlope, GEO5, CEOTEX, Gemcom и др. Однако, несмотря на значительный прогресс в области создания специализированных программ, применяемые в них расчетные схемы нельзя назвать в достаточной мере совершенными, что отражается в определенных проблемах эффективности их применения в решении некоторых задач геомеханики и получении надежного результата. К основному преимуществу численного моделирования перед физическим можно отнести оперативность, то есть возможность быстрого изменения исходных данных и получения нового результата, при этом его достоверность можно также оценить по соответствию натурным инструментальным измерениям.

1.2.2 Изученность процесса сдвижения горных пород и земной поверхности в условиях отработки запасов ВКМС

Изучение особенностей и выявление закономерностей развития процесса сдвижения в условиях отработки запасов рассматриваемого месторождения базируется, главным образом, на данных инструментальных наблюдений. Последние получили активное развитие в середине прошлого века, что можно связать с планомерным вводом в эксплуатацию новых мощностей и увеличением площадей отработки запасов, прежде всего под промышленной и жилой застройкой городов Березники и Соликамск. Постепенное накопление данных инструментальных наблюдений положило начало проведению исследований процесса сдвижения, значимые результаты которых находили отражение в периодически издаваемых (начиная с 1960 г.) нормативных документах – «Указаниях» и «Инструкциях», регламентирующих меры защиты рудников от затопления и охрану подрабатываемых объектов.

Значительная работа по выявлению закономерностей развития процесса сдвижения и разработке инженерных методик расчета его параметров во второй половине прошлого века была проделана под руководством Нестерова М. П. Ему, совместно с Аникиным Н. Ф., Львовой А. В. и др. удалось установить основные формы проявления сдвижений, рассчитать величины угловых параметров, получить типовые распределения оседаний, наклонов, кривизны, горизонтальных деформаций в краевых частях мульд, разработать методики по прогнозированию оседаний земной поверхности и пр. Так, например, в работах упомянутых исследователей [60-64 и др.] выявлено, что процесс сдвижения, даже в пределах отдельных частей шахтного поля, может отличаться многообразием характерных особенностей его протекания: мульда способна приобретать достаточно сложную форму, которая изменяется во времени на разных ее участках по различным законам, при этом интенсивность протекания процесса может варьироваться от нескольких мм в год до нескольких мм в сутки, а продолжительность длиться от

нескольких лет до десятилетий. Это обуславливается большим количеством влияющих факторов, как геологических (различия в глубинах отработки, составе породной толщи, строении ВЗТ, прочностных характеристиках пород, слагающих обрабатываемые пласты и пр.), так и горнотехнических (количество обрабатываемых пластов, их вынимаемая мощность, размеры выработанного пространства и оставляемых целиков, степень заполнения образованных пустот закладочным материалом и его тип и пр.). Принимая во внимание только последние, можно отметить выявленные особенности формирования краевой части мульды в зависимости от типа оставляемых целиков: при однообразии геологических условий отработка пластов с оставлением податливых целиков приводит к образованию краевых частей мульд с крутыми склонами (наклон достигает 10-20 мм/м при оседании 1,5-2 м), в отличие от мульд с пологими склонами применительно к оставлению жестких целиков. В дополнение к вышесказанному, важно отметить, что Нестеровым М.П. впервые была предложена модель взаимосвязи характера развития процесса сдвижения с режимом деформирования целиков, наглядно отраженная на рисунке 2.

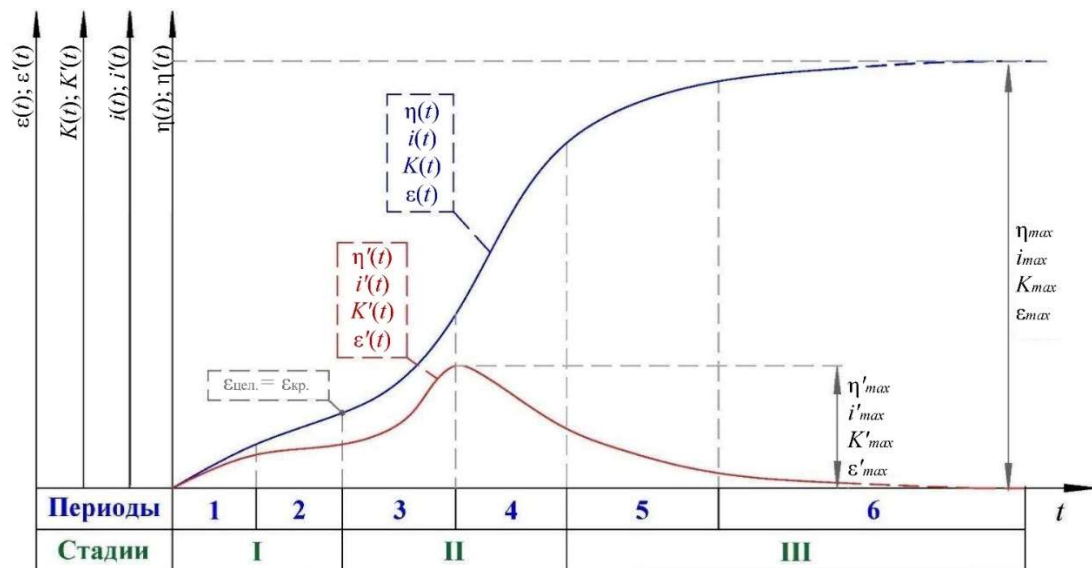


Рисунок 2 – Графическое представление характера развития процесса сдвижения во времени на калийных месторождениях:

$\eta(t), i(t), K(t), \varepsilon(t)$ – изменения во времени соответственно оседаний, наклонов, кривизны и горизонтальных деформаций; $\eta'(t), i'(t), K'(t), \varepsilon'(t)$ – изменения во времени соответственно скоростей оседаний, наклонов, кривизны и горизонтальных деформации; $\varepsilon_{\text{цел}}$ – текущая деформация междукамерных целиков; $\varepsilon_{\text{кр.}}$ – критическая деформация междукамерных целиков

Как видно из рисунка 2, в процессе сдвижения выделяется 3 стадии, каждая из которых делится на 2 характерных периода:

▪ **I – начальная.** Соответствует развитию процесса сдвижения от его начала до достижения критических значений деформаций междукамерных целиков и состоит из следующих периодов:

- 1-й – расширение выработанного пространства до размеров, создающих условия полной подработки земной поверхности, при этом увеличивается нагрузка на МКЦ и происходит рост скорости оседания;

- 2-й – наблюдается относительное постоянство скорости оседания до достижения деформациями МКЦ критического значения, соответствующему их пределу прочности (данный этап может отсутствовать если накопленные в 1-й период деформации достигнут обозначенных значений).

▪ **II – активная.** Соответствует активному деформированию (разрушению) МКЦ и состоит из следующих периодов:

- 3-й – начало активного деформирования МКЦ, характеризуемого резким ростом скорости оседания до достижения наибольшего ее значения;

- 4-й – завершение активной стадии деформирования целиков и начало стадии уплотнения разрушенной части массива, характеризуемые снижением скорости оседания до некоторого, относительно постоянного значения.

Для МКЦ с малыми степенями нагружения ($C < 0,3$) активная стадия и обозначенные этапы могут отсутствовать, величина оседания в таком случае достаточно продолжительное время (более 100 лет) не превышает 10-15% от конечного значения.

▪ **III – затухания.** Соответствует уплотнению разрушенной части массива и состоит из следующих периодов:

- 5-й – уплотнение разрушенной части массива под постоянной нагрузкой, характеризуемое относительным постоянством скорости оседания;

- 6-й – завершение стадии уплотнения горных пород, характеризуемое постепенным уменьшением скорости оседания до завершения процесса сдвижения.

Описанная схема встречалась в «Указаниях» до 1994 г. и впоследствии была заменена методикой прогнозирования развития максимального оседания $\eta_m(t)$ над рассматриваемым участком шахтного поля во времени разработанной под руководством Крайнева Б.А.

Среди опубликованных за последние два десятилетия трудов ученых, посвященных вопросам сдвижения горных пород и земной поверхности в условиях отработки запасов ВКМС, нельзя не отметить работы Баряха А. А. [55], Тенисон Л. О. [65], Ермашова А. О. [59] и др. В работе Кашникова Ю. А. и Ашихмина С. Г. [66] оценивается совместное влияние разработки рассматриваемого и углеводородных месторождений. Упомянутые ученые внесли значительный вклад в понимание специфики процесса сдвижения, обоснование и разработку подходов к расчету его параметров, однако, на сегодняшний момент, все еще остаются вопросы, требующие научного разрешения.

В соответствии с действующей версией «Указаний» [19], к основным параметрам сдвижения, широко применяющимся в инженерной практике, можно отнести: величину максимального оседания или прогиба слоев ВЗТ, величину скорости оседаний, угловые параметры, условия подработки земной поверхности, величины деформаций.

Ввиду сложности проведения прямых исследований по изучению деформаций породной толщи в результате ее подработки, в условиях рассматриваемого месторождения принято допущение о равенстве вертикальных сдвижений на земной поверхности и на любом удалении от нее в сторону выработанного пространства до границы зоны обрушения. Основываясь на обозначенном допущении, величина прогиба в границах участка с одинаковыми параметрами отработки, используемая для оценки безопасности подработки слоев ВЗТ, принята эквивалентной оседанию земной поверхности на соответствующем участке. Расчетное значение максимального оседания от отработки нескольких пластов η_m определяется суммированием соответствующих значений η_i , вызванных отработкой каждого из пластов. Для определения η_i используется простая зависимость:

$$\eta_i = m_o \omega p k, \quad (1.1)$$

где m_o – вынимаемая мощность при отработке пласта;

ω – коэффициент извлечения полезного ископаемого, определяемый в границах вынимаемой мощности и принятого межосевого расстояния рассматриваемого пласта как отношение площади поперечного сечения камеры (камер, в случае отработки с оставлением МХЦ) к площади нетронутого массива;

p – коэффициент, учитывающий уровень заполнения очистных камер закладочным материалом A и степень его усадки B , принимаемой исходя из способа закладки: 0,18 - при гидравлическом; 0,25 - при механическом солеотходами; 0,30 - при механическом породами от проходки горных выработок. Значение p рассчитывают, как $1 - A(1 - B)$, при отсутствии закладки $p = 1,0$;

k – коэффициент, учитывающий долю вероятной реализации величины максимального оседания от эквивалентной высоты выработанного пространства с учетом минерального состава пласта и режима деформирования целиков, определяемого их степенью нагружения C . Значение k принимается равным: 1,0 – для карналлитовых пластов; 0,9 – для пластов сильвинита и каменной соли, отрабатываемых при $C \geq 0,32$; $0,9(C / 0,32)^2$ – для пластов сильвинита и каменной соли, отрабатываемых при $C < 0,32$.

Для расчета максимальной величины оседания земной поверхности от отработки одного сильвинитового пласта на заданный период времени $\eta_i(t)$ в действующей версии «Указаний» [19] используются зависимости:

$$\eta_i(t) = 0,002t\eta_i, \quad \text{при } C < 0,32 \quad (1.2)$$

$$\eta_i(t) = \beta_z(0,01t)^{\alpha_z}\eta_i, \quad \text{при } C \geq 0,32 \quad (1.3)$$

где α_z и β_z – параметры аппроксимации зависимости относительных максимальных оседаний земной поверхности во времени от степени нагружения междукамерных целиков C , определяемые из выражений:

$$\left. \begin{aligned} \alpha_z &= 1,0 - 11,9509(C - 0,32)^{1,6803} \\ \beta_z &= 0,4 - 2,4616(C - 0,32)^{0,6706} \end{aligned} \right\} \text{при } 0,32 \leq C \leq 0,40 \quad (1.4)$$

$$\left. \begin{aligned} \alpha_z &= 0,8285 - 1,0440(C - 0,40)^{0,5122} \\ \beta_z &= 0,8525 - 4,2500(C - 0,40) \end{aligned} \right\} \text{при } 0,40 < C < 0,70 \quad (1.5)$$

$$\left. \begin{aligned} \alpha_z &= 0,8285 - 1,0440(C - 0,40)^{0,5122} \\ \beta_z &= 0,8525 - 4,2500(C - 0,40) \end{aligned} \right\} \text{при } 0,40 < C < 0,70 \quad (1.6)$$

$$\left. \begin{aligned} \alpha_z &= 0,8285 - 1,0440(C - 0,40)^{0,5122} \\ \beta_z &= 0,8525 - 4,2500(C - 0,40) \end{aligned} \right\} \text{при } 0,40 < C < 0,70 \quad (1.7)$$

Важно отметить, что существуют и другие способы расчета значений $\eta_i(t)$, например, через скорость ползучести междукламерных целиков, что подробно описывается в «Указаниях» 1985 г., с использованием графиков-аналогов [67] или на основе электронно-вычислительных операций [68], а также на основе математического моделирования [55, 59 и др.]. Обозначенные способы, в определенных условиях, позволяют получить наиболее достоверный результат искомой величины оседания $\eta_i(t)$.

При неполной подработке, расчетная величина максимального оседания земной поверхности при отработке одного пласта на рассматриваемый период времени $\eta_i(t)$ определяется по формуле:

$$\eta_i(t) = k_t f_0 \eta_m, \quad (1.8)$$

где f_0 – коэффициент, учитывающий влияние отношения размеров выработанного пространства к глубине разработки на величину максимального оседания земной поверхности, определяемый из выражения:

$$f_0 = 0,5948(3,7694(1,6708\chi^{0,25} - 1) - \chi), \quad (1.9)$$

где χ – коэффициент, определяющий условия подработки земной поверхности. Для его нахождения используется выражение:

$$\chi = 1,12\sqrt{(D_1 - 0,15H)(D_2 - 0,15H)}/H, \quad (1.10)$$

где D_1, D_2 – размеры выработанного пространства в двух перпендикулярных направлениях. При $D_1 < 1,4 H$ и $D_2 > 1,4 H$, в вычислениях используется значение $D_2 = 1,4 H$;

H – глубина разработки, соответствующая среднему расстоянию от земной поверхности до почвы нижнего отработанного пласта.

При значениях $\chi \leq 0,15$ сдвигения земной поверхности не происходит, значения $0,15 < \chi < 1,40$ соответствуют условию неполной подработки, при значениях $\chi \geq 1,40$ подработка характеризуется полной.

За начало процесса сдвигения, как правило, принимается дата начала очистной выемки на рассматриваемом участке шахтного поля, а за окончание – дата, после достижения которой максимальная скорость оседания становится менее 2 мм/год при условии, что достигнутая или прогнозируемая величина максимального оседания $\eta_m(t)$ превышает 90% от конечного η_m .

Среднее значение скорости оседания земной поверхности соответствует отношению измеренной величины приращения оседания рассматриваемого репера (мм) к периоду времени между двумя наблюдениями, приведенному к годовому выражению (год).

Для обеспечения безопасности подрабатываемых поверхностных объектов, а также при планировании строительства на подработанных территориях оцениваются величины возникающих после проведения горных работ деформаций земной поверхности, к которым относятся наклон i , кривизна K , радиус кривизны R и горизонтальная деформация ε . Ожидаемые значения обозначенных величин – $i(z)$, $K(z)$, $R(z)$, $\varepsilon(z)$, в случае наличия данных инструментальных наблюдений на рассматриваемом участке шахтного поля, рассчитываются из выражений:

$$i(z)_n = \frac{\eta(t)_n - \eta(t)_{n-1}}{l_n} q_i, \quad (1.11)$$

$$K(z)_{n,n-1} = \frac{i(z)_n - i(z)_{n-1}}{0,5(l_n + l_{n-1})} q_k, \quad (1.12)$$

$$R(z) = K(z)^{-1}, \quad (1.13)$$

$$\varepsilon(z)_n = (1 - l_p/l) q_\varepsilon, \quad (1.14)$$

где $\eta(t)_n$ и $\eta(t)_{n-1}$ – величины оседания земной поверхности по реперам n и $n-1$ в рассматриваемый период наблюдений;

$i(z)_n$ и $i(z)_{n-1}$ – ожидаемые значения наклона в предыдущем и последующем интервалах;

l_n и l_{n-1} – длины интервалов соответствующие начальным измерениям между реперами n и $n-1$ и реперами $n-1$ и $n-2$;

l_p и l – длины интервалов между реперами n и $n-1$ измеренные соответственно в рассматриваемый период наблюдений и в начале наблюдений;

q_i , q_k и q_ε – коэффициенты приведения значений наклона, кривизны и горизонтальной деформации к 15-метровому интервалу, вводимые для уменьшения ошибок определения указанных деформаций. В общем случае, расчет обозначенных коэффициентов можно выполнить по формуле:

$$q = 1 + \beta \sqrt{\frac{l_o}{15} - 1}, \quad (1.15)$$

где: l_o – расстояние между двумя смежными реперами при расчете наклона и горизонтальной деформации или среднее расстояние между двумя парами смежных реперов при расчете кривизны;

β – коэффициент аппроксимации, принимаемый равным: 0,1414 - для наклона; 0,1768 - для кривизны; 0,3535 - для горизонтальной деформации.

При расстоянии $l_o \leq 15$ м коэффициенты q_i , q_k и q_ε принимаются равными 1, а при $l_o \geq 45$ м их значения соответственно равны 1,20, 1,25 и 1,50.

В случае отсутствия данных инструментальных наблюдений на рассматриваемом участке шахтного поля ожидаемые значения $\eta(z)$, $i(z)$, $K(z)$, $R(z)$ и $\varepsilon(z)$ определяются на период окончания процесса сдвижения в точках главных сечений мульды с использованием безразмерных функций распределения по формулам:

$$\eta(z) = \eta_m S(z), \quad (1.16)$$

$$i(z) = \frac{\eta_m S'(z) q_i}{L}, \quad (1.17)$$

$$K(z) = \frac{\eta_m S''(z) q_k}{L^2}, \quad (1.18)$$

$$R(z) = K(z)^{-1}, \quad (1.19)$$

$$\varepsilon(z) = m_e K(z) L, \quad (1.20)$$

где η_m – максимальное оседание на период окончания процесса сдвижения;

$S(z)$, $S'(z)$ и $S''(z)$ – значения функций распределения относительных оседаний, наклонов и кривизны в краевой части мульды сдвижения;

z – относительная координата рассматриваемой точки в краевой части мульды сдвижения, равная отношению расстояния от точки с максимальным оседанием земной поверхности до рассматриваемой точки к расчетной длине полумульды сдвижения;

q_i и q_k – коэффициенты приведения значений наклона и кривизны к 15-метровому интервалу, вычисляемые из выражения 1.15 при расстоянии l_0 равному произведению расчетной длины полумульды сдвижения и интервала между относительными координатами в типовой функции распределения;

L – длина полумульды сдвижения, значение которой зависит от условий подработки земной поверхности (полная или неполная), глубины разработки на рассматриваемом участке и величин угловых параметров процесса сдвижения. Выражения для определения L , будут рассмотрены в следующих разделах настоящей работы;

m_e – коэффициент перехода от $K(z)$ к $\varepsilon(z)$, принимается равным 0,05 при $K(z) \cdot 10^4 \geq 1$ или вычисляется как $0,05 + 0,09(1 - K(z) \cdot 10^4)^{3,8}$ при $K(z) \cdot 10^4 < 1$.

Погрешность расчета значений ожидаемых сдвижений и деформаций учитывается посредством введения в полученные величины коэффициентов запаса (перегрузки), т. е. ожидаемые величины умножаются на эти коэффициенты и в дальнейшем при выборе мер охраны подрабатываемых объектов принимаются полученные таким образом расчетные величины.

С учетом вышеизложенного, можно отметить, что местоположение и численное значение вычисляемых деформаций при отсутствии данных инструментальных наблюдений тесно связано с угловыми параметрами процесса

сдвижения. Так, если граничные точки, определяющие длину формируемой полумульды сдвижения, смещаются в пределах какого-то интервала, то происходит смещение и изменение численного значения ожидаемых деформаций. Более подробно угловые параметры процесса сдвижения с учетом условия подработки будут рассмотрены в следующем разделе настоящей работы.

1.3 Угловые параметры процесса сдвижения горных пород и земной поверхности

1.3.1 Сущность и основные понятия угловых параметров процесса сдвижения горных пород и земной поверхности

Угловые параметры процесса сдвижения, в обобщенной интерпретации, являются комплексными показателями физико-механических свойств всей сдвигающейся породной толщи. Их значения, как и особенности развития процесса сдвижения, зависят от большого количества влияющих факторов.

К основным, наиболее часто используемым в инженерной практике угловым параметрам можно отнести: граничные углы, углы сдвижения, углы полных сдвижений и угол максимального оседания (рисунок 3).

Граничные углы β_0 , γ_0 , δ_0 – внешние относительно выработанного пространства углы, образованные горизонтальной линией, проходящей через границу выработки, и линией, проведенной от границы выработки в сторону массива горных пород до границы влияния горных работ на земную поверхность, т.е. до точки, в которой инструментальным путем установлены граничные величины деформаций. Углы β_0 и γ_0 откладываются по падению пласта, соответственно у нижней и верхней границ очистной выемки, а угол δ_0 – по простиранию пласта;

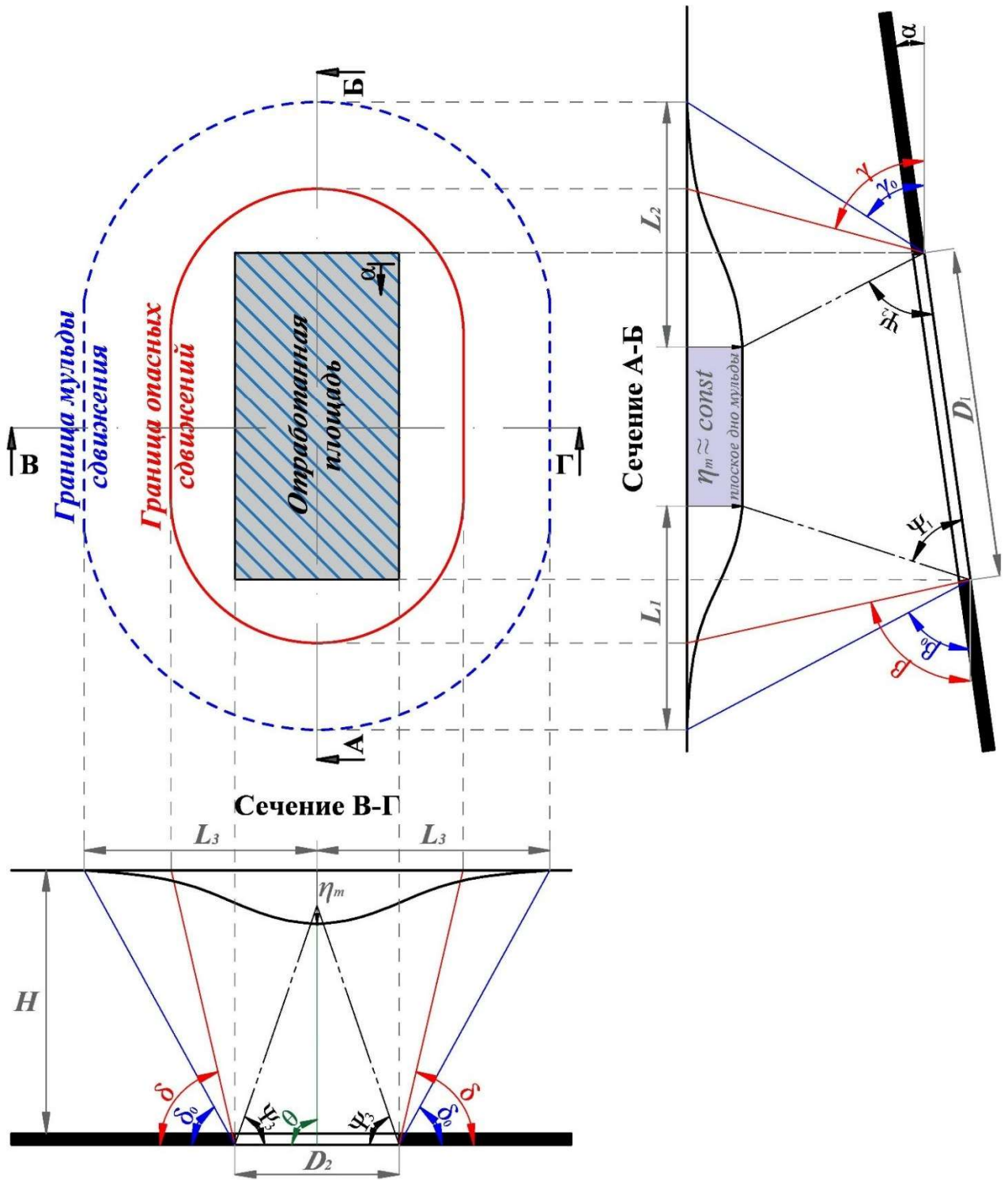


Рисунок 3 – Мульда сдвига и разрез в ее главных сечениях

Углы сдвижения β , γ , δ - внешние относительно выработанного пространства углы, образованные горизонтальной линией, проходящей через границу выработки, и линией, проведенной от границы выработки в сторону массива горных пород до границы зоны опасного влияния на земной поверхности, т.е. до точки, в которой инструментальным путем установлены опасные деформации. Углы β и γ откладываются по падению пласта, соответственно у нижней и верхней границ очистной выемки, а угол δ – по простиранию пласта;

Углы полных сдвижений ψ_1 , ψ_2 , ψ_3 - внутренние относительно выработанного пространства углы, образованные плоскостью пласта и линией, проведенной от границы выработки до границы плоского дна мульды. Углы ψ_1 и ψ_2 откладываются по падению пласта, соответственно у нижней и верхней границ очистной выемки, а угол ψ_3 – по простиранию пласта. Если линии, отстроенные под рассматриваемыми углами, пересекаются ниже земной поверхности, то в мульде будет отсутствовать плоское дно;

Угол максимального оседания θ – это острый угол, составленный горизонтальной линией и линией, соединяющей точку максимального оседания с серединой выработки. Отстраивается на разрезах при неполной подработке.

В определенных условиях, например, при большой вынимаемой мощности и незначительных глубинах ведения горных работ, в мульде сдвижения возможно образование террас и провалов. В этом случае, определение границы зоны обрушения выполняется с помощью углов разрывов - β'' , γ'' и δ'' , представляющих собой внешние относительно выработанного пространства углы, образованные горизонтальной линией, проходящей через границу выработки, и линией, соединяющей границу выработки с крайними трещинами на краях мульды.

Обозначенные углы, как правило, определяются в главных сечениях мульды (проходящих через точки с максимальным оседанием η_m) вкrest простирания (сечение А-Б) и по простиранию (сечение В-Г) пласта для условий полной и неполной подработок.

Значения граничных углов и углов сдвижения зависят от свойств горных пород, ввиду чего их значения могут отличаться в отдельных слоях породной

толщи. Так, например, наличие на земной поверхности достаточной мощности наносов, представляющих собой рыхлые четвертичные отложения, вне зависимости от условий их происхождения (песок, гравий, галечник, глина, суглинок и пр.) сглаживает неравномерность сдвижений и приводит к некоторому удлинению мульды, ввиду чего выделяют углы сдвижения φ и граничные углы φ_0 в наносах.

Вышерассмотренные угловые параметры широко используются во многих методиках, применяемых для оценки геомеханического состояния горных пород и выработок [69]. Практическое назначение углов сдвижения состоит в определении границы зоны опасных сдвижений и построении предохранительных целиков под объекты на земной поверхности [70]. Величины граничных углов и углов полных сдвижений определяют размеры полумульды сдвижения, местоположение и численное значение расчетных деформаций в мульде. Граничные углы также используются при построении целиков под глубокие вертикальные стволы, а углы полных сдвижений определяют размеры плоского дна мульды.

На данное время, среди исследователей, не сформировано единого мнения о зависимости угловых параметров от горно-геологических условий разработки месторождений. Численные значения рассмотренных углов и сформированные подходы к их определению могут в значительной степени отличаться для отдельных месторождений.

1.3.2 Подходы к определению угловых параметров процесса сдвижения при подземном ведении горных работ

Исторически, изучение процесса сдвижения получило наибольшее развитие на угольных месторождениях, для условий которых в вопросе угловых параметров процесса сдвижения проведены наиболее обширные исследования.

В книге профессора Казаковского Д. А. [69], изданной еще в 1953 г. на основе обобщения эмпирических данных по угольным месторождениям, выделены основные факторы, оказывающие влияние на особенности развития процесса сдвижения и величины угловых параметров. Значимость отмеченных факторов впоследствии нашла подтверждение и на других месторождениях полезных ископаемых. К наиболее важным из них для вопроса исследования угловых параметров относятся следующие:

- *Физико-механические свойства горных пород.* Крепкие породы (песчаники, известняки и пр.) приводят к развитию процесса сдвижения в виде обрушения, что способствует увеличению граничных углов и углов полных сдвижений. Слабые породы, наоборот, приводят к плавному протеканию процесса сдвижения в форме прогиба, что способствует уменьшению граничных углов и углов полных сдвижений;

- *Угол падения пласта.* При пологом залегании отрабатываемых пластов наблюдается симметричность полумульд сдвижения. Значения угла δ (см. рисунок 3) практически не зависят от угла падения пласта α . По мере увеличения угла α , угол γ стремится к его значению, а угол β уменьшается;

- *Гидрогеологические условия.* Обводненные слабые породы увеличивают свои пластические свойства, что способствует сдвижению пород в форме прогиба и тем самым вызывает более резкое выполаживание граничных углов. В крепких породах такое явление отсутствует;

- *Глубина разработки.* С ее увеличением происходит уменьшение деформаций земной поверхности, а также увеличение углов сдвижения;

- *Естественная нарушенность пород.* Геологические нарушения в виде дизъюнктивов, трещиноватости и пр. образуют плоскости ослабления массива, вдоль которых активизируется процесс сдвижения, а на поверхности образуются трещины, разрывы и уступы, что приводит к искажению величин угловых параметров;

- *Полнота выемки и размеры выработанного пространства.* Сплошная выемка пласта в сочетании с большими размерами площади отработки, при прочих

равных условиях, способствует проявлению сдвижения пород в виде плавного прогиба, при этом происходит уменьшение граничных углов. Для камерной системы с оставлением большого количества целиков и малыми размерами выработок наблюдается неполное развитие мульды, что приводит к увеличению граничных углов;

- *Нарушенность толщи ранее пройденными выработками.* Приводит к увеличению сдвижений и деформаций по сравнению с первичной подработкой, что сказывается на увеличении граничных углов и уменьшении углов сдвижения.

Среди исследовательских работ последующих лет, посвященных вопросу выявления факторов, влияющих на формирование угловых параметров процесса сдвижения, можно выделить труды таких ученых, как Акимов А. Г. [71], Чураков С. М. [72], Лицкович С. М. [73], Иофис М. А. [74, 75], Медянцев А. Н. [75, 76], Шадрин А. Г. [77], Назаренко В. А. [78, 79], Щедрина Н. Н. [80] и др. В некоторых из обозначенных работ рассматривается вопрос комплексного учета наиболее значимых факторов, влияющих на величины угловых параметров процесса сдвижения, так, например, в работах [75, 76] Иофис М. А. и Медянцев А. Н., проанализировав результаты фактических наблюдений в условиях Донецкого и Карагандинского угольных бассейнов, пришли к выводу, что величина углов сдвижения по простиранию пластов δ является функцией отношения глубины разработки H к величине максимального оседания η_m :

$$\delta_i = f\left(\frac{H}{\eta_m}\right) \quad (1.21)$$

С другой стороны, η_m зависит от мощности пласта m и, следовательно, углы δ являются функциями глубины горных работ H и мощности пластов m .

Другим примером является работа [80], в которой Щедриной Н. Н. предложена зависимость для определения угла сдвижения δ , являющаяся интегральным показателем состояния, строения и механических характеристик массивов осадочных пород:

$$\delta = 50^\circ + 1^\circ \left(3,5 \sqrt{f_{\text{ср.}}} + 3 \sqrt{\frac{\sigma_{\text{сж}}}{\gamma H}} + 2 \sqrt{\frac{D}{H}} + 0,7 \sqrt{\frac{H}{m}} \right), \quad (1.22)$$

где $f_{\text{ср.}}$ – средневзвешенное по мощностям значение крепости основных литологических разностей коренных пород (по шкале М. М. Протодяконова);

m – мощность отрабатываемого пласта, м;

$\sigma_{\text{сж}}$ – предел прочности на одноосное сжатие, т/м²;

γ – объемный вес вышележащей породной толщи, т/м³;

H – глубина залегания горных пород, м;

D – размеры выработанного пространства, м.

Полученное выражение рекомендовано к применению для месторождений с неизученным характером процесса сдвижения.

В вопросах выявления особенностей формирования, установления величин или расчетных зависимостей угловых параметров процесса сдвижения для групп месторождений, отдельных месторождений или их частей на основе результатов инструментальных наблюдений известны работы Онищенко А. В. [81, 82], Назаренко В. А. [82], Мякенького В. И. [82, 83], Ивановой О. В. [84], Тетерина А. В. [85], Шадрина А. Г. [86], Балафина И. Е. [87], Колесник Н. А. [88, 89] и др.

При определении углов сдвижения и граничных углов в краевой части мульды, высокую значимость имеет правильный выбор граничных критериев. Так, например, Казаковским Д. А. [69] было отмечено, что определение истинных величин граничных углов является невыполнимой задачей, поскольку их находят не по нулевым сдвижениям, а по величинам, близким к ошибкам инструментальных наблюдений, поэтому, на практике, ограничиваются определением углов сдвижения по точкам с некоторыми условными критическими значениями сдвижений или деформаций.

В качестве примера наиболее часто используемых на практике граничных критериев можно привести обозначенные в «Правилах охраны» [90, 91] значения деформаций:

- Для определения границы зоны влияния подземных разработок и соответственно граничных углов приняты значения наклона $i = 0,5 \cdot 10^{-3}$ и деформации растяжения $\varepsilon = 0,5 \cdot 10^{-3}$ (при среднем интервале 15-20 м);

- Для определения границы зоны опасного влияния и соответственно углов сдвижения приняты значения наклона $i = 4 \cdot 10^{-3}$, кривизны $K = 0,2 \cdot 10^{-3}$ 1/м и деформации растяжения $\varepsilon = 4 \cdot 10^{-3}$ (при среднем интервале 15-20 м).

В более ранних версиях «Правил охраны» встречались и другие граничные критерии, так, например, при определении границы зоны влияния подземной разработки в версии документа 1972 г., помимо обозначенных значений деформаций, использовалось оседание $\eta = 15$ мм, а до 1972 г. границей мульды считали точку, оседание в которой составляет $\eta = 10$ мм.

Вышеобозначенные граничные критерии неоднократно подвергались критике со стороны ученых, поскольку, в некоторых случаях, не позволяли правильно установить границы зоны влияния подземной разработки и зоны опасного влияния. Исследователями предлагались собственные подходы в решении данного вопроса, так, например, в работе [92] Кулибабой С. Б. предложено устанавливать границу зоны влияния подземной разработки по равенству положительных и отрицательных горизонтальных деформаций:

$$\sum_A^B \varepsilon_i = 0, \quad (1.23)$$

где ε_i – горизонтальная деформация i -го интервала участка А-Б.

Автором, из анализа распределения горизонтальных деформаций в краевых частях мульды для условий Донецкого бассейна при глубинах разработки $H = 200 \dots 400$ м и максимальных растяжениях $\varepsilon_m = (1,1 \dots 2,0) \cdot 10^{-3}$, предложено определять значение горизонтальной деформации $\varepsilon_{(x)}$ в точке с абсциссой x (в системе координат, началом которой является точка с максимальным растяжением ε_m) из выражения:

$$\varepsilon_{(x)} = 1,43 - \frac{x}{9,63 + 0,73x} \quad (1.24)$$

Зная зависимость распределения горизонтальных деформаций и учитывая условие, заданное формулой 1.23, можно найти граничные точки мульды сдвижения путем определения верхнего предела интегрирования функции 1.24. Таким образом, используя принцип равенства положительных и отрицательных горизонтальных деформаций земной поверхности при ее подработке, можно определять наиболее достоверное местоположение границы мульды.

Другим примером является работа [93] в которой Мякенький В. И. приходит к выводу о том, что граничные критерии должны обеспечивать постоянство граничных углов независимо от значимых влияющих факторов, в качестве которых он выделяет мощность пласта m и глубину его разработки H . Автором предложены граничные критерии, каждый из которых отвечает координате одной точки, определяющей начало длины полумульды и значение граничного угла:

$$[\eta] = 6 \cdot 10^{-3} q_0 m, \quad (1.25)$$

$$[i] = 8,6 \cdot 10^{-2} \frac{q_0 m}{L_z}, \quad (1.26)$$

$$[K] = 1,09 \frac{q_0 m}{L_z}, \quad (1.27)$$

где q_0 – относительная величина вертикальных сдвижений;

m – мощность разрабатываемого пласта, м;

L_z – длина полумульды сдвижения при полной подработке, м.

Приведенные значения граничных критериев принадлежат одной точке земной поверхности, отвечающей началу мульды сдвижения, этим обуславливаются единые значения граничных углов, вычисленных для любой мощности пласта m и глубины разработки H .

Еще одним примером является работа Посыльного Ю. В. [94] в которой он отмечает, что непосредственное применение в условиях Донецкого бассейна рекомендуемых «Правилами охраны» граничных критериев процесса сдвижения на фактических и сглаженных кривых соответствующих величин не приводит к однозначному результату в вопросе определения местоположения границы мульды

сдвижения. Для решения обозначенной проблемы автором предложен новый, ранее не известный геометрический элемент – особая точка мульды, которая является виртуальной и ее появление объясняется процессом трансформирования кривых оседания в единичные типовые кривые. Один из предлагаемых Посыльным Ю. В. способов определения границы мульды и, соответственно, граничных углов, можно изложить следующим образом:

- Фактическая кривая оседаний ограничивается точкой максимального оседания и граничной точкой с выбранным граничным критерием;
- Полученная длина полумульды L_i принимается за единицу и делится на 10 (20) равных частей, после чего в точках деления z определяют оседания η и вычисляют отношения их к величине максимального оседания η_m :

$$S_z = \frac{\eta}{\eta_m} \quad (1.28)$$

- Полученная единичная кривая аппроксимируется функцией Гаусса и получается аналитическое выражение единичной кривой следующего вида:

$$S_z = e^{-f(x)z^2} \quad (1.29)$$

- Определяется выражение типовой кривой, для этого, единичные кривые, полученные по отдельным станциям, группируются по выбранным классификационным признакам, например, по коэффициенту подработанности земной поверхности, после чего вычисляются их усреднённые ординаты и аппроксимируются функцией вида:

$$S_z^{TK} = e^{-az^2} \quad (1.30)$$

- Определяются координаты особой точки, используя зависимости:

$$z_m = a^{-0,5}, \quad S_{z_m} = e^{-1} \quad (1.31)$$

- Определяется относительная абсцисса точки z , в которой ордината

единичной кривой совпадает с ординатой особой точки:

$$z = f(z)^{-0,5} \quad (1.32)$$

- Определяется расчетная длина полумульды:

$$L_p = (z/z_m) L_i \quad (1.33)$$

- Устанавливается граница мульды путем откладывания от точки максимального оседания расчетной длины полумульды L_p и определяется граничный угол.

Автор отмечает, что вышеописанный способ позволяет до 2-3 раз снизить погрешность определения граничных углов сдвижения и применим в условиях отсутствия или недостоверности инструментальных измерений в граничной зоне мульды, путем экстраполяции граничной точки при помощи функции Гаусса.

Позже, в работах [34, 95] Посыльным Ю. В. предложен новый граничный критерий – относительное оседание $S_z = 0,03$ (среднее арифметическое значение из относительных оседаний на ряде наблюдательных станций в условиях Донбасса), его использование позволило исключить погрешность типовой кривой, обусловленной использованием ранее определенных граничных критериев, что подтверждается рядом работ [96, 97 и др.].

В дополнение к вышерассмотренным трудам в области исследования угловых параметров процесса сдвижения, основанным, главным образом, на результатах обработки натуральных инструментальных наблюдений по профильным линиям на земной поверхности, можно выделить работы Рена Г. [98], Вязьменского А. [99], Журавкова М.А. [100], Энхтура Л. [101] и др., посвященные решению обозначенного вопроса методами численного моделирования. При этом важно отметить, что независимо выполненное численное моделирование не гарантирует надежного результата в определении угловых параметров процесса сдвижения и его эффективное применение может быть реализовано только в сочетании с результатами инструментальных наблюдений.

1.3.3 Состояние изученности угловых параметров процесса сдвижения в условиях отработки запасов ВКМС

Как было сказано ранее, исследование процесса сдвижения и, в частности, определение угловых его параметров в условиях отработки рассматриваемого месторождения базируется на обработке результатов инструментальных наблюдений по профильным линиям грунтовых реперов на земной поверхности. Анализируя нормативные документы, регламентирующие меры защиты рудников от затопления и охрану подрабатываемых объектов на ВКМС - «Указания» и «Инструкции», периодически издаваемые начиная с 1960 г., можно проследить, как менялись подходы к практическому использованию отдельных углов, что наглядно отражено в таблице 1.

Таблица 1 – Угловые параметры процесса сдвижения, используемые в различных версиях «Указаний» с 1960 г. по 2022 г.

Используемые угловые параметры	Практическое назначение отдельных углов в различных версиях нормативного документа			
	1960 г.	1972 – 2004 гг.	2008 г.	2014 г. и 2022 г.
Углы сдвижения	Построение предохранительных целиков			-
Граничные углы	-	Расчет длин полумульд сдвижения		Построение предохранительных целиков для зданий и сооружений, расчет длин полумульд сдвижения
Углы полных сдвижений	-			Расчет длин полумульд сдвижения в условиях полной и неполной подработок
Углы сдвиговых нарушений	-	-	-	Построение предохранительных целиков (околоскважинных, гидроизолирующих и пр.)
Углы максимальных оседаний	-	Определение местоположения точки с наибольшим оседанием*	-	-
Углы полных сдвижений в условиях неполной подработки	-	-	Расчет длин полумульд сдвижения	

Примечание: * - значение угла приведено в версиях нормативного документа 1976-1994 гг.

При рассмотрении таблицы 1 важно учитывать, что основное внимание до 2008 г. было уделено условию полной подработки земной поверхности, как наиболее распространенной для особенностей отработки запасов на ВКМС. В «Указаниях» 2008 г. затронут вопрос нахождения граничного угла в условиях неполной подработки, а также, дополнительно, был введен угол сдвига в условиях неполной подработки, который, по смысловой нагрузке, соответствует некому аналогу угла полных сдвижений, а его расчет основывается на глубине ведения горных работ, ширине выработанного пространства и значении угла максимальных оседаний 90° . В последних версиях «Указаний» понятие угла сдвига не встречается. Построение предохранительных целиков предложено осуществлять по углам сдвиговых нарушений и по граничным углам, последний из которых также регламентируется к использованию при расчете длин полумульд сдвига. Вследствие принятого допущения о условно горизонтальном залегании калийно-магниевого залежи, классификации угловых параметров по фактору угла падения промышленных пластов не приводилось ни в одной из версий нормативного документа.

Анализируя изложенное, справедливо заметить, что угол полных сдвижений в условиях неполной подработки введен в расчет длины полумульды, как промежуточный этап вычислений и может быть заменен углом максимального оседания. Кроме того, подходы к практическому использованию граничных углов в последних версиях «Указаний» в некоторой степени противоречат их назначению, а вновь введенные углы сдвиговых нарушений (определяют границы опасных деформаций в соляной толще) подобны по смыслу углам сдвига.

Далее уместно рассмотреть то, как изменялись численные значения отдельных углов и подходы к их определению в процессе актуализации «Указаний».

В первой версии «Указаний» 1960 г., ввиду недостаточной изученности процесса сдвига на период издания документа, приводятся только значения углов сдвига, необходимых для построения предохранительных целиков. Ввиду малых углов падения пласта, значения β , γ и δ в надсолевой породной толще

приняты одинаковыми во всех направлениях $\beta = \gamma = \delta = 60^\circ$, а в наносах принято значение $\varphi = 45^\circ$. В следующей версии нормативного документа 1972 г. в дополнение к углам сдвижения, значения которых остались неизменными, добавились граничные углы и углы полных сдвижений. Значения $\beta_0, \gamma_0, \delta_0$ и ψ_1, ψ_2, ψ_3 , по аналогии с углами сдвижения, приняты одинаковыми во всех направлениях соответственно $\beta_0 = \gamma_0 = \delta_0 = 45^\circ$ и $\psi_1 = \psi_2 = \psi_3 = 55^\circ$. Во всех последующих версиях нормативного документа подход о равенстве во всех направлениях отдельных угловых параметров процесса сдвижения был сохранен. Для углов сдвижения и граничных углов приняты упрощенные обозначения, соответственно δ и δ_0 . Вышеобозначенное значение углов полных сдвижений - 55° , за исключением рекомендованного в «Методических указаниях» 1976 г. - 50° , оставалось неизменным во всех версиях нормативного документа.

В работе Нестерова М.П. [102], предшествующей выходу «Методических указаний» 1976 г. предложен метод определения углов сдвижения на заданный период времени исходя из типа и срока службы охраняемого объекта в функции развития максимального оседания во времени с учетом безразмерных распределений наклонов, кривизны и горизонтальных деформаций в краевой части мульды сдвижения. В основу метода положено постоянство граничных углов и углов полных сдвижений, определяющих длину полумульды. Схема к определению угла сдвижения в заданный момент времени представлена на рисунке 4.

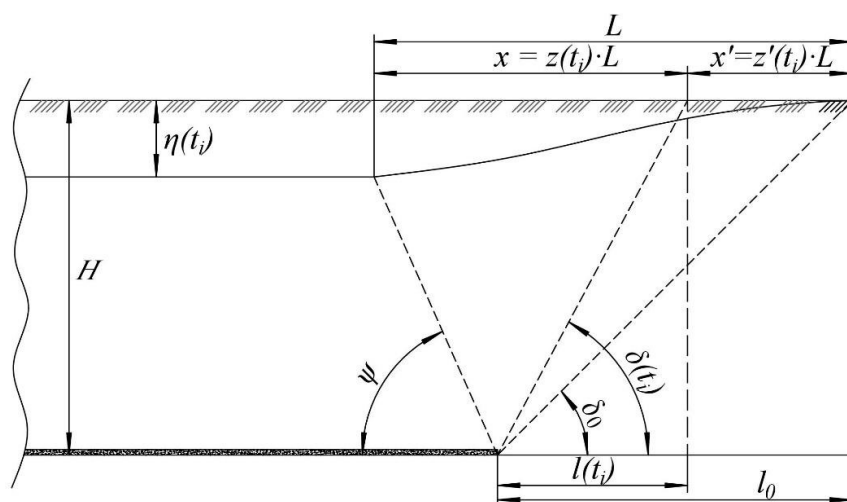


Рисунок 4 – Схема к определению угла сдвижения в заданный момент времени

Как видно из рисунка 4, угол сдвижения для некоторого момента времени может быть выражен следующим образом:

$$\delta(t_i) = \operatorname{arctg} \frac{H}{l(t_i)} = \operatorname{arctg} \frac{H}{H \operatorname{ctg} \delta_0 - L (1 - z(t_i))}, \quad (1.34)$$

где $z(t_i)$ – безразмерная абсцисса точки краевой части мульды сдвижения, в которой в момент времени t_i наблюдаются опасные (критические) величины деформаций, соответствующие значениям $i_o = 4 \cdot 10^{-3}$, $K_o = 2 \cdot 10^{-4}$ и $\varepsilon_o = 2 \cdot 10^{-3}$.

В условиях полной подработки длина полумульды сдвижения L определяется из выражения:

$$L = H (\operatorname{ctg} \delta_0 + \operatorname{ctg} \psi) \quad (1.35)$$

Опираясь на выражение 1.35, зависимость 1.34 можно преобразовать к следующему виду:

$$\delta(t_i) = \operatorname{arctg} \frac{1}{\operatorname{ctg} \delta_0 - (1 - z(t_i))(\operatorname{ctg} \delta_0 + \operatorname{ctg} \psi)}, \quad (1.36)$$

Для определения численного значения $z(t_i)$ предлагается воспользоваться зависимостями для нахождения ожидаемых значений наклона, кривизны и горизонтальных деформаций, актуализированная версия которых приведена выше (выражения 1.17, 1.18, 1.20). Подставляя вместо $i(z)$, $K(z)$ и $\varepsilon(z)$ соответствующие критерии опасных деформаций, можно выразить значения функций распределения наклонов и кривизны через глубину, граничный угол, угол полных сдвижений и прогнозируемую к моменту времени t_i величину максимального оседания земной поверхности:

$$S'(z) = \frac{i_o \cdot L}{\eta(t_i) \cdot q_i} = \frac{4H (\operatorname{ctg} \delta_0 + \operatorname{ctg} \psi)}{1000 \eta(t_i) q_i} \quad (1.37)$$

$$S''(z) = \frac{K_o \cdot L^2}{\eta(t_i) \cdot q_k} = \frac{2H^2 (\operatorname{ctg} \delta_0 + \operatorname{ctg} \psi)^2}{10000 \eta(t_i) q_k} \quad (1.38)$$

$$S''(z) = \frac{\varepsilon_0 \cdot L}{m_e \cdot \eta(t_i) \cdot q_k} = \frac{2H (\operatorname{ctg} \delta_0 + \operatorname{ctg} \psi)}{1000 m_e \eta(t_i) q_k} \quad (1.39)$$

При известных значениях $S'(z)$ и $S''(z)$, используя соответствующие кривые распределений, можно установить безразмерные координаты $z(t_i)^i$, $z(t_i)^K$ и $z(t_i)^e$, наибольшая из которых, впоследствии, подставляется в выражение 1.36 для определения расчетного значения угла сдвижения. В случае, если требуется найти величину угла сдвижения для построения предохранительного целика под охраняемый объект с известным сроком службы и допустимыми для его подработки деформациями, расчет выполняется аналогичным вышеописанному способом при значении максимального расчетного оседания на срок окончания эксплуатации объекта и использовании вместо опасных, допустимых для объекта значений деформаций.

Требования, регламентирующие определение углов сдвижения в функции от достигнутых к заданному сроку оседаний на внутренней границе краевой части мульды сдвижения и распределения в ней наклонов и кривизны, в основе которых лежит вышеописанный метод с обозначенными критериальными значениями опасных деформаций, впоследствии, были внесены в «Методические указания» 1976 г. и следующие версии документа до 2008 г. В «Указаниях» 2008 г. дополнительно, для постоянно оставляемых целиков, определено значение угла сдвижения $\delta = 50^\circ$.

Значения принимаемых в расчет граничных углов в «Указаниях» 1976 г. и 1985 г. были соответственно равны 45° и 50° . В «Инструкции» 1994 г. впервые была установлена взаимосвязь величин граничных углов со степенью нагружения C оставляемых при отработке запасов междукамерных целиков и отношением достигнутого или расчетного оседания на заданный период времени $\eta(t_i)$ к максимальному конечному η_m . Так при $C \leq 0,4$ значение граничного угла принималось равным 50° , а при $C > 0,4$ значение, лежащее в диапазоне от 50° до 75° , определялось по таблице из отношения $k_t = \eta(t_i) / \eta_m$. В качестве граничных величин деформаций приняты значения $i = 3 \cdot 10^{-4}$ и $\varepsilon = 3 \cdot 10^{-4}$. В последующей

версии «Указаний» 2004 г. значение δ_0 при $C \leq 0,4$ осталось неизменным, а табличная форма определения δ_0 при $0,4 < C \leq 0,7$ была преобразована в зависимость:

$$\delta_0 = \text{arcctg} (0,839 k_t^{0,686}) \quad (1.40)$$

В «Указаниях» 2008 г. определена зависимость для нахождения значения граничного угла в условиях неполной подработки:

$$\delta_{\text{оп}} = \text{arcctg} \left((\chi - 0,15) \chi \frac{\text{ctg} \delta_0}{1,75} \right), \quad (1.41)$$

где χ – коэффициент, характеризующий условия подработки, определяемый из выражения 1.10;

δ_0 – значение граничного угла для условий полной подработки, принимаемое равным 50° при $C \leq 0,55$ и вычисляемое при $0,55 < C \leq 0,70$ из выражения:

$$\delta_0 = 50 (1 + 1,334(C - 0,55)) \quad (1.42)$$

Также для условия неполной подработки, дополнительно, был введен угол ψ_0 , являющийся неким аналогом угла полных сдвижений ψ и представляющий собой внутренний относительно выработанного пространства угол, образованный плоскостью пласта и линией, проведенной от границы выработки до точки с максимальным оседанием, определяющим дно мульды сдвижения. Для нахождения значения ψ_0 предложена зависимость:

$$\psi_0 = \text{arcctg} (0,5 \chi) \quad (1.43)$$

При этом, L для условий неполной подработки определялась аналогично выражению 1.35 с подстановкой $\delta_{\text{оп}}$ вместо δ_0 и ψ_0 вместо ψ .

В последних версиях «Указаний» 2014 г. и 2022 г. понятие угла сдвижения не встречается. Построение предохранительных целиков предложено

осуществлять по углам сдвиговых нарушений $\delta = 60^\circ$ и по граничным углам δ_0 , значения которых устанавливаются из соответствия следующим требованиям:

- при построении постоянных предохранительных целиков $\delta_0 = 55^\circ$;
- для временных предохранительных целиков, а также для отдельных зданий или группы зданий, расположенных за границами городской застройки и требующих применения мер охраны, значение принимается равным $\delta_0 = 65^\circ$;
- при малых величинах оседания земной поверхности, при которых расчетные деформации не достигают допустимых значений в течение сроков службы объектов, δ_0 для построения временных предохранительных целиков принимается не более 75° .

Для определения длин полумульд сдвижения L вдоль временно или длительно остановленных границ выработанного пространства используется значение граничного угла $\delta_0 = 65^\circ$, а вдоль постоянных границ значение $\delta_0 = 55^\circ$. При этом, расчеты L для условия неполной подработки выполняются по формуле:

$$L = H (\operatorname{ctg} \delta_0 + \operatorname{ctg} \psi_0), \quad (1.44)$$

где ψ_0 – угол, определяемый из выражения 1.43.

Сформированный и используемый в настоящее время на ВКМС подход к определению размеров предохранительных целиков по фиксированным значениям граничных углов δ_0 не учитывает типы охраняемых объектов и соответствующие для них значения допустимых деформаций, что, в свою очередь, может привести к значительным потерям полезного ископаемого, оставляемого в целиках. Используемые значения δ_0 , ψ и ψ_0 , на практике, далеко не всегда позволяют с достаточной степенью достоверности определить длину полумульды сдвижения, что в конечном итоге приводит к отклонениям в определении ожидаемых деформаций. Также, важно отметить, что процесс сдвижения в рассматриваемых условиях может быть весьма продолжителен во времени, следовательно, длина полумульды будет постоянно меняться до момента полного затухания процесса. Поиск временной зависимости изменения угловых параметров от характера

деформирования и сроков полной реализации выработанного пространства немаловажный актуальный вопрос, для решения которого требуется глубокий анализ и поиск значимых влияющих факторов. Таким образом, опираясь на вышеизложенное, можно заключить, что изученность угловых параметров процесса сдвижения в условиях отработки запасов ВКМС нельзя назвать в достаточной мере полной.

1.4 Цели и задачи исследования

Обобщая все вышеизложенное, можно заключить что для условий отработки запасов на ВКМС характерно разнообразие горнотехнических и геологических факторов, оказывающих влияние на процесс сдвижения и, соответственно, на формирование его угловых параметров. На основании анализа «Указаний» [19] выявлено следующее:

- Используемые на практике величины граничных углов δ_0 , углов полных сдвижений ψ и углов полных сдвижений в условиях неполной подработки земной поверхности ψ_0 далеко не всегда позволяют с достаточной степенью достоверности определить длину полумульды сдвижения, что в конечном итоге приводит к отклонениям в определении ожидаемых деформаций;
- В условиях высокой продолжительности процесса сдвижения длина полумульды будет постоянно меняться до момента его полного затухания и высокой значимостью обладает вопрос поиска временной зависимости изменения угловых параметров от характера деформирования и сроков полной реализации выработанного пространства;
- Угол ψ_0 введен в расчет длины полумульды, как промежуточный этап вычислений и может быть заменен углом максимального оседания θ ;
- Неоднородность сформированной на шахтных полях рудников геомеханической системы, способствующая различной продолжительности

процесса сдвижения в границах отдельных зон, в сочетании с разновременными сроками отработки пластов и внесения закладочного материала (при его наличии), способны приводить к образованию сложной результирующей формы проявления сдвижений. Определение геометрии последней при отсутствии инструментальных наблюдений над анализируемым участком шахтного поля возможно на основании применения подхода сочетания отдельных виртуальных мульд сдвижения, образованных от каждой геомеханической зоны отработки запасов. Сказанное определяет необходимость последующего исследования величин вспомогательных угловых параметров, позволяющих установить виртуальные границы сочетаемых мульд;

- Используемый в настоящее время подход к определению размеров предохранительных целиков по фиксированным значениям углов δ_0 противоречит их смысловому назначению, а также не учитывает типы охраняемых объектов и соответствующие для них значения допустимых деформаций, что, в свою очередь, приводит к образованию повышенных потерь полезного ископаемого, оставляемого в целиках.

Достоверный вывод закономерностей, описывающих изменение отдельных углов из совокупности угловых параметров, возможен лишь на основании натуральных данных инструментальных наблюдений за развитием процесса сдвижения в условиях рассматриваемого месторождения. Сказанное определяет высокую приоритетность последующего использования эмпирических методов исследования, позволяющих наиболее точно учитывать реальные процессы сдвижения в породном массиве.

Целью данной диссертационной работы является обоснование достаточного для практического использования в условиях ВКМС перечня угловых параметров процесса сдвижения с последующим уточнением их величин и установлением аналитических зависимостей от значимых влияющих факторов и параметра времени.

Идея работы состоит в комплексном анализе результатов инструментальных наблюдений за развитием процесса сдвижения в условиях ВКМС с учетом

наиболее значимых влияющих факторов и параметра времени для последующего установления величин исследуемых углов и/или определяющих их аналитических зависимостей.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие основные задачи:

- Исследовать основные факторы, влияющие на вопрос классификации угловых параметров процесса сдвижения в рассматриваемых условиях и обосновать перечень наиболее значимых углов, подлежащих исследованию в рамках настоящей работы;

- Выбрать и обосновать критерии для установления фактических величин рассматриваемых углов по результатам натуральных инструментальных наблюдений за развитием процесса сдвижения в условиях отработки запасов рассматриваемого месторождения;

- Определить величины и установить аналитические зависимости, описывающие изменение принятых во внимание углов от наиболее значимых влияющих факторов и параметра времени;

- Выполнить обсуждение полученных в ходе исследования результатов.

ГЛАВА 2. ОБОСНОВАНИЕ ПЕРЕЧНЯ ИССЛЕДУЕМЫХ УГЛОВЫХ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА СДВИЖЕНИЯ ДЛЯ УСЛОВИЙ ОТРАБОТКИ ЗАПАСОВ ВКМС

2.1 Анализ основных факторов, влияющих на вопрос классификации угловых параметров процесса сдвижения в рассматриваемых условиях

В вопросе классификации угловых параметров процесса сдвижения на ВКМС особенно важно рассмотреть необходимость учета углов падения отрабатываемых пластов и целесообразность выделения отдельных углов в наносах. Условие подработки земной поверхности (полная и неполная) рассматривать не целесообразно вследствие очевидной его актуальности для рассматриваемого месторождения.

Относительно углов падения отрабатываемых пластов в предыдущей главе настоящей работы было отмечено принятое в «Указаниях» допущение о равенстве во всех направлениях отдельных угловых параметров процесса сдвижения. Обозначенное допущение, в целом, можно считать справедливым. Убедиться в этом довольно просто на основе укрупненной оценки распределения углов падения промышленных пластов по площади ВКМС, которую целесообразно осуществить на примере среднего пласта – АБ. В качестве исходного материала здесь послужили значения абсолютных отметок кровли принятого во внимание пласта, полученные на основании данных геологической разведки. Результат обработки обозначенных данных в программе Surfer представлен на рисунке 5.

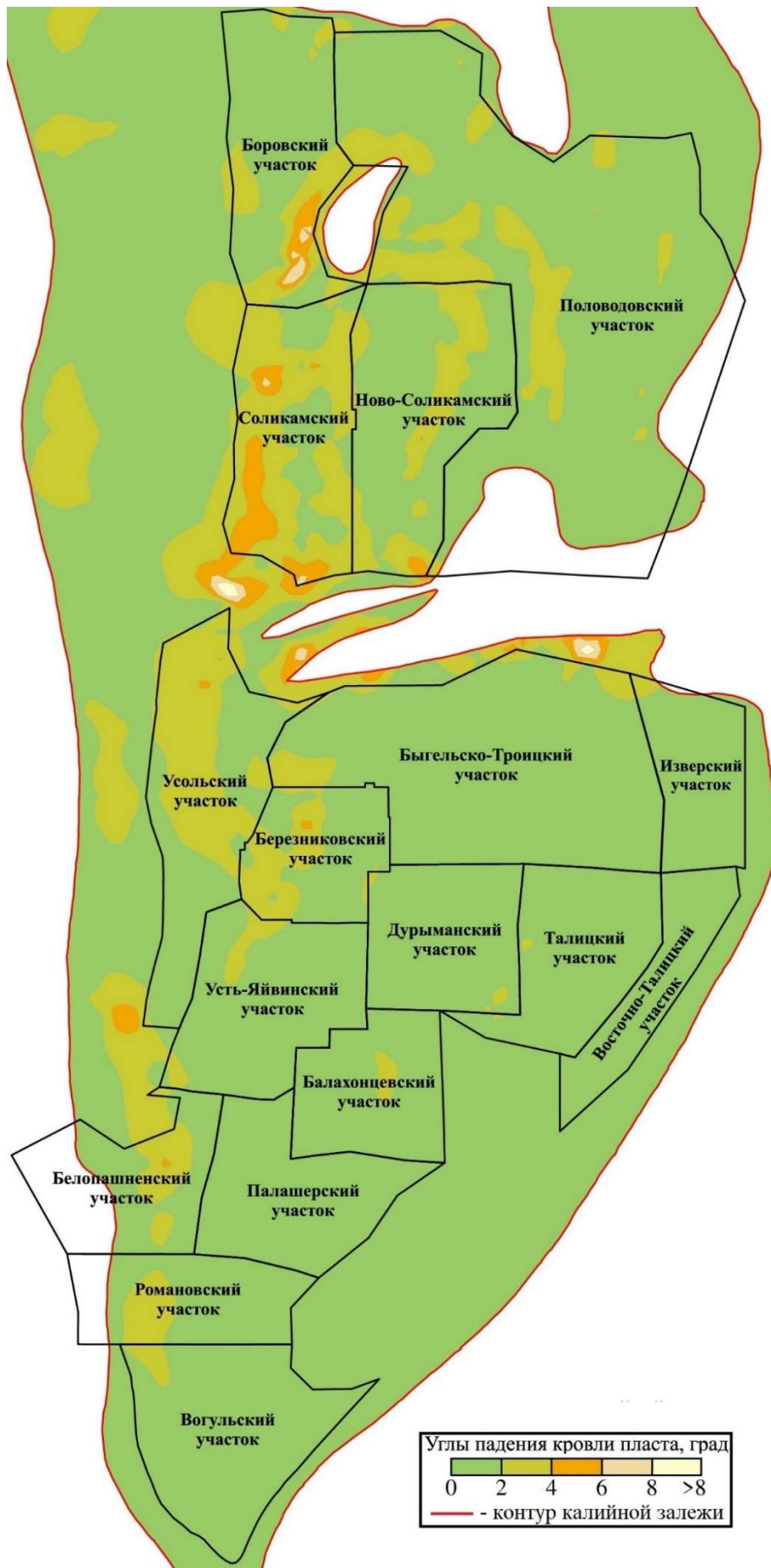


Рисунок 5 – Углы падения кровли пласта АБ на лицензионных участках ВКМС в контуре калийной залежи

На рисунке 5¹ можно заметить, что углы падения кровли пласта АБ в основном лежат в диапазоне от 0 до 4°, что свидетельствует о преимущественно пологом залегании всей свиты промышленных пластов. При этом участки с высокими значениями углов падения (например, 12-15° в западной части Соликамского участка или 12-18° в северо-восточной части Дурыманского участка) локализуются в немногочисленных местах, характеризующихся наличием высокоамплитудных складок. Обозначенные места имеют относительно небольшие размеры, поэтому часть из них не нашла отражение на рисунке 5.

Учитывая изложенное, в рамках настоящей работы, с целью некоторого упрощения, целесообразно не вводить классификацию угловых параметров по фактору угла падения обрабатываемых пластов, что, в свою очередь, не исключает учета последнего при установлении аналитических зависимостей для расчета отдельных углов.

Вопрос о необходимости выделения отдельных углов в наносах особенно актуален для условий, когда наблюдается значительное различие в физико-механических характеристиках пород, слагающих наносы и остальную часть подрабатываемой толщи. Согласно «Правилам охраны» [91], угловые параметры в наносах учитываются при их мощности более 5 м. На ВКМС наносы покрывают подавляющую часть осваиваемой площади месторождения, а их мощность достигает 65 м (скв. №1018), составляя в среднем 10,6 м. Помимо наносов, в разрезе оставшейся части надсолевой толщи присутствуют и другие близкие к ним по крепости породы, представленные, преимущественно, глинами. Для численного подтверждения сказанного можно сопоставить средние значения крепости по шкале М. М. Протодяконова ($f = 0,1 \sigma_p$) основных типов пород, слагающих СМТ, ТКТ, ПЦТ и четвертичные отложения. Результаты расчета, выполненного на

¹ В силу значительного расстояния между узлами используемой сети геологоразведочных скважин (0,5-4 км) отражена приблизительная картина распределения углов падения кровли рассматриваемого пласта

основании данных по исследованию керна геологоразведочных скважин на физико-механические свойства, представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Значения крепости пород, слагающих СМТ, ТКТ и ПЦТ

Толща	Основные слагающие породы	Среднее значение коэффициента крепости, f
ПЦТ	аргиллит	3,3
	алевролит	3,8
	песчаник	4,5
	глина	1,1
ТКТ	известняк	5,0
	песчаник	4,8
	глина	0,7
	алевролит	8,1
СМТ	мергель	2,4
	известняк	3,4
	глина	1,6
	ангидрит	7,8
	гипс	2,6

Как видно из таблицы 2, наиболее слабые породы, сопоставимые по крепости с теми, что слагают наносы (f до 1,3), представлены глинами и располагаются в терригенно-карбонатной и пестроцветной толщах. Глинистые слои в разрезе обозначенных толщ распространены, преимущественно, севернее Дуринского широтного разлома и присутствуют более чем на половине осваиваемой части месторождения, суммарная их мощность на отдельных участках превышает 110 м (скв. №№728, 701, 834, 1026 и др.) и составляет в среднем 25,3 м.

При сочетании слоев слабых пород в четвертичных отложениях, ПЦТ и ТКТ можно получить полную картину их распространения по площади осваиваемой части месторождения. Для выделения слоев, участвующих в суммировании, целесообразно воспользоваться критерием мощности 5 м – по аналогии с ранее обозначенным критерием учитываемой мощности наносов. Результат обработки геологоразведочных данных отражен на рисунке 6.



Рисунок 6 – Суммарные мощности глинистых слоев в разрезе надсолевой ТОЛЩИ

На основании вышеизложенного можно сделать вывод о том, что при исследовании угловых параметров процесса сдвижения в условиях ВКМС, с целью формирования наиболее достоверных результатов расчетного определения местоположения характерных точек мульды, необходим комплексный учет влияния слабых пород во всей подрабатываемой толще. Отмеченный подход, в свою очередь, целесообразно реализовать на этапе выведения аналитических зависимостей для отдельных углов, поэтому, необходимость выделения угловых параметров в наносах отсутствует.

2.2 Определение подлежащих последующему рассмотрению угловых параметров процесса сдвижения для условий отработки запасов на рассматриваемом месторождении

В вопросе классификации угловых параметров по отдельным группам с характерными граничными условиями, необходимо учитывать неоднородность сформированной на шахтных полях рудников геомеханической системы и наличие в границах отработанных площадей целиков различного назначения (междушахтных, гидроизолирующих, околоскваженных и пр.). Опираясь на обозначенные обстоятельства, можно определить три основные характерные граничные условия, требующие детальной проработки с целью установления необходимости выделения отдельных углов:

- Граница выработанного пространства и нетронутого массива с протяженностью последнего в ортогональном к рассматриваемой границе направлении, достаточной для полного формирования краевой части мульды сдвижения (в случае ведения горных работ с двух противоположных сторон от оставленного целика, его размеры должны обеспечивать независимое полное формирование краевых частей обеих мульд) - рисунок 7, тип 1;

- Граница выработанного пространства и оставленного целика с размерами в ортогональном к рассматриваемой границе направлении, недостаточными для полного независимого формирования краевых частей мульд сдвижения - рисунок 7, тип 2;
- Граница смежных участков, различающихся по геомеханическим параметрам отработки запасов - рисунок 7, тип 3.

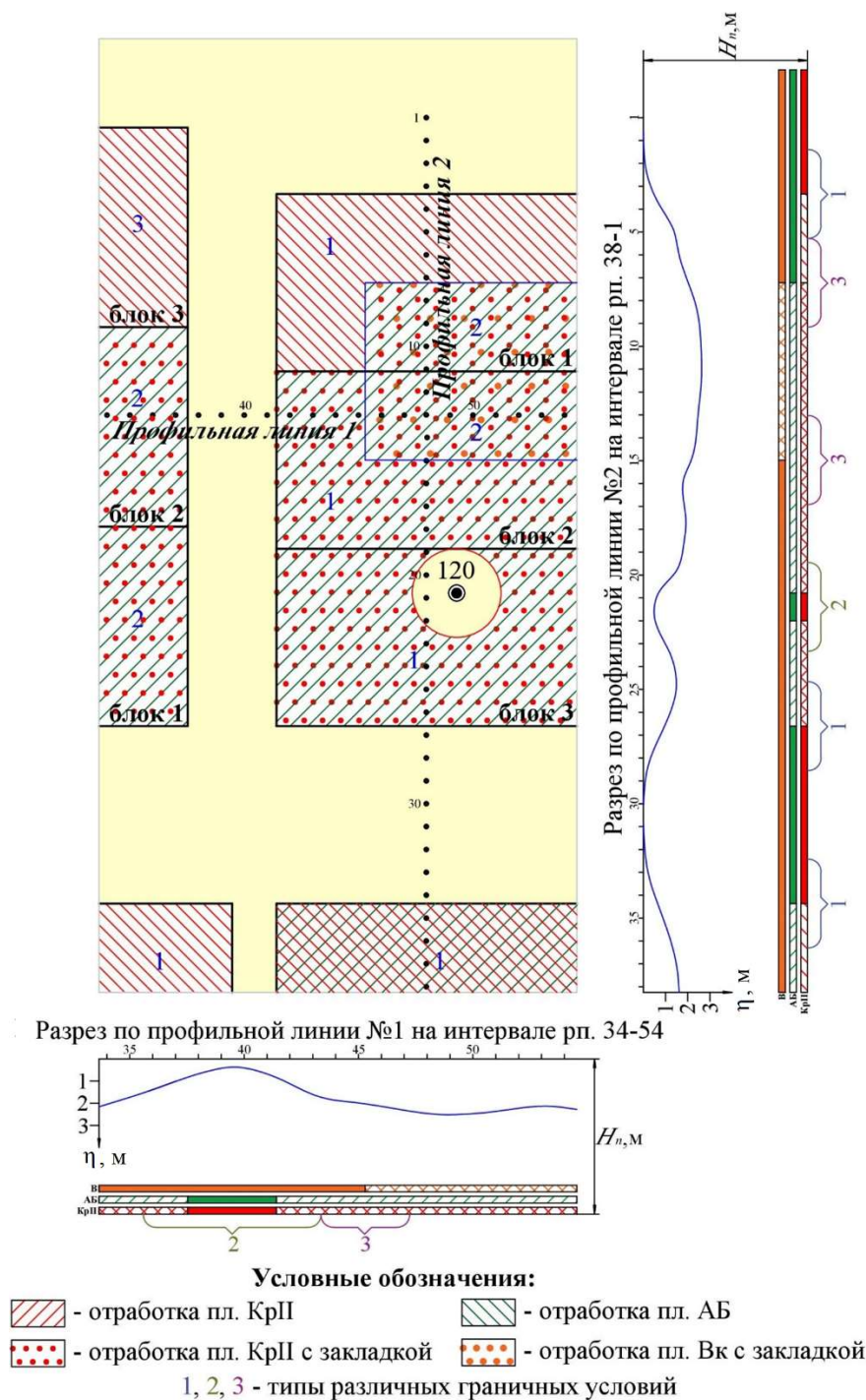


Рисунок 7 - Пример характерных граничных условий, распространенных на шахтных полях рудников ВКМС

Применительно к граничным условиям типа 1 целесообразно использовать рассмотренные ранее основные угловые параметры, такие как граничные углы δ_0 , углы сдвижения δ , углы полных сдвижений ψ и углы максимальных оседаний θ (рисунок 3). При этом, расчет длины полумульды в условиях неполной подработки можно выполнять с учетом следующей зависимости:

$$L = 0,5D + H(\operatorname{ctg} \delta_0 \pm \operatorname{ctg} \theta), \quad (2.1)$$

где D – ширина выработанного пространства, м;

H – глубина до почвы нижнего отработанного пласта на рассматриваемом участке, м.

Знак «-» в зависимости 2.1 применим в том, случае, если дно мульды смещено относительно центра рассматриваемого участка отработки шириной D в сторону удаления от постоянной границы, а знак «+» наоборот – при смещении дна в сторону приближения к постоянной границе.

В случае, если угол максимального оседания близок к 90° , то выражение 2.1 можно преобразовать к следующему виду:

$$L = 0,5D + H \operatorname{ctg} \delta_0, \quad (2.2)$$

Представленная зависимость 2.2 является более простой альтернативой методики расчета длины полумульды сдвижения в условиях неполной подработки, используемой в последних версиях «Указаний». Такой расчет исключает необходимость в промежуточной величине – углах полных сдвижений в условиях неполной подработки.

Для определения численных значений деформаций на участках 2 типа наиболее целесообразно использовать подход сочетания виртуальных краевых частей полумульд в результирующую суммарную форму проявления сдвижений. В основе такого подхода положено непрерывное суммирование парных значений оседаний, устанавливаемых по каждой из рассматриваемых полумульд в точках

пересечения их линией, параллельной оси абсцисс. Пример изложенного представлен на рисунке 8.

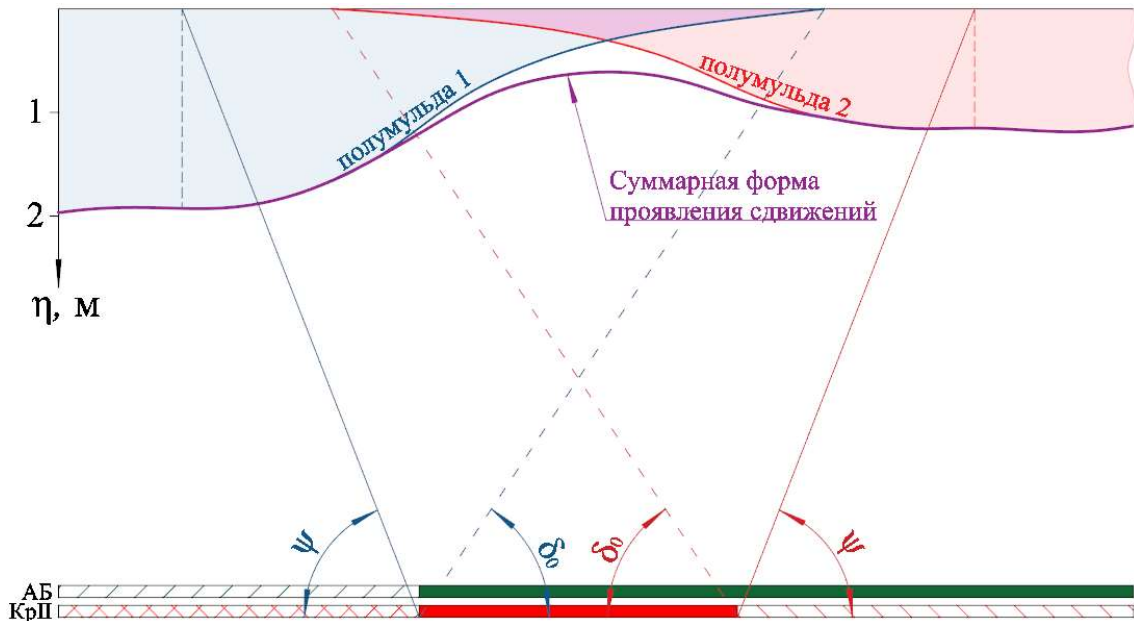


Рисунок 8 – Пример сочетания краевых частей мульд сдвижения для граничных условий типа 2

Из рисунка 8 видно, что нахождение результирующей суммарной формы проявления сдвижений сопряжено с установлением виртуальных размеров сочетаемых полумульд, что, в свою очередь, формирует необходимость использования, в зависимости от условий подработки, углов полных сдвижений ψ или углов максимальных оседаний θ , а также граничных углов δ_0 , позволяющих установить неявные границы краевых частей полумульд сдвижения. Последнее обстоятельство расширяет смысловую нагрузку для углов δ_0 .

Граничные условия типа 3 характеризуются отсутствием постоянных границ выработанного пространства, вследствие чего для них, по определению, не применимы углы δ_0 , ψ и θ . В вопросе определения численных значений деформаций на участках такого типа целесообразно использовать схожий с ранее описанным для граничных условий типа 2, сочетательный подход виртуальных полумульд сдвижения, который, в рассматриваемом случае, может быть реализован несколькими возможными способами. Среди последних уместно рассмотреть два основных, базирующихся на принципиально разных подходах в использовании сочетаемых элементов.

Первый способ основывается на сочетании виртуальных полумульд, образованных от каждой из геомеханических зон, в результирующую суммарную форму проявления сдвижений, что наглядно отражено на рисунке 9.

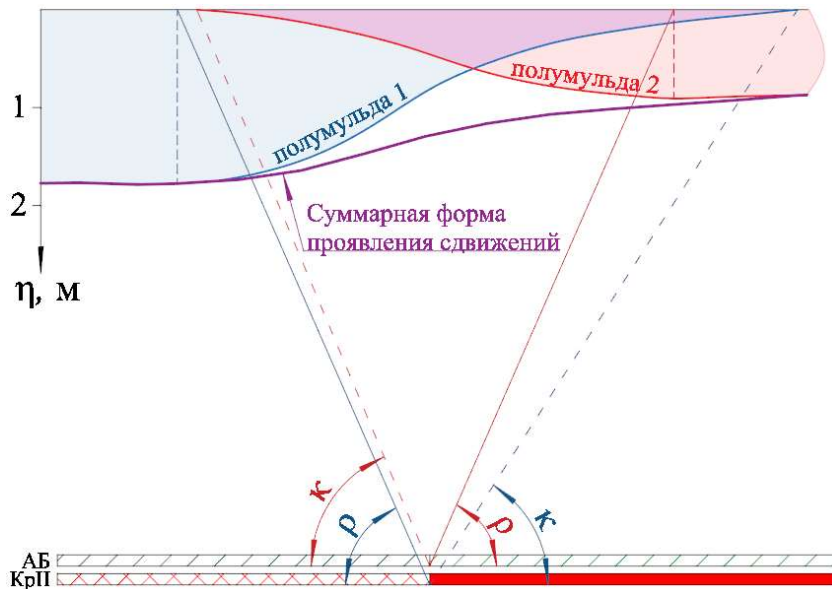


Рисунок 9 – Пример первого возможного способа сочетания краевых частей мульд сдвижения для граничных условий типа 3

Из рисунка 9 видно, что для установления размеров сочетаемых виртуальных полумульд необходимы вспомогательные углы κ и ρ , позволяющие, соответственно, установить неявные границы краевых частей и плоского дна (в случае неполной подработки угол ρ уместно заменить углом θ' , отражающим местоположение предполагаемого максимального оседания в виртуальной мульде).

В основе второго способа лежит следующее допущение: при близости достигнутых оседаний над рассматриваемыми смежными зонами, общая их мульда сдвижения будет соответствовать классическим геометрическим характеристикам, соответствующим условиям полной или неполной подработок земной поверхности. Экстраполируя это допущение на случай, когда в смежных зонах наблюдаются различные достигнутые оседания, результирующую суммарную форму проявления сдвижений можно разложить на сумму двух составляющих:

- общая мульда сдвижения, образованная минимальным оседанием среди рассматриваемых зон;

- дополнительная муфта сдвига от разности достигнутых между зонами оседаний.

Наглядная иллюстрация изложенного отражена на рисунке 10.

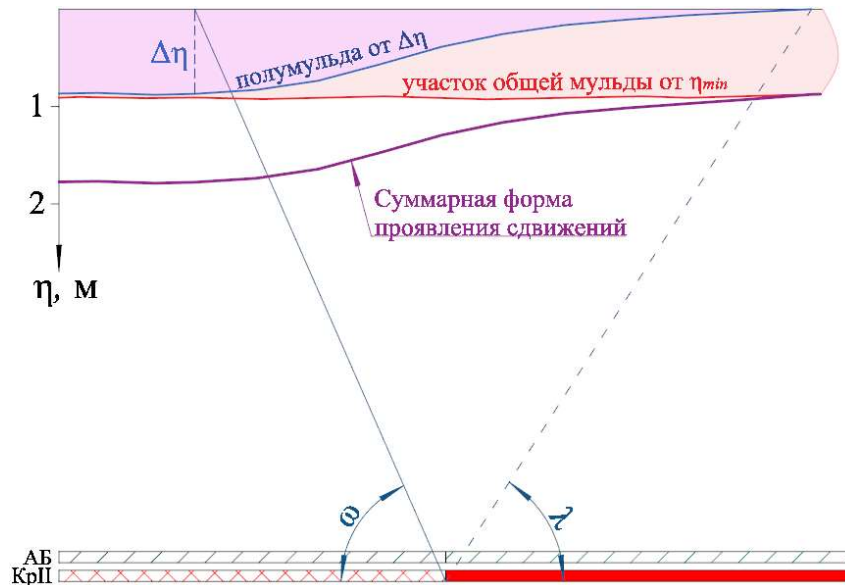


Рисунок 10 – Пример второго возможного способа сочетания краевых частей муфт сдвига для граничных условий типа 3

Из рисунка 10 видно, что определение размеров дополнительной муфты в рассматриваемом способе основывается на использовании вспомогательных углов λ и ω , которые необходимы, соответственно, для установления местоположения неявной границы дополнительной виртуальной муфты и ее плоского дна. В случае неполной подработки углы ω могут быть заменены углами θ' .

Существенным недостатком двух вышерассмотренных способов является невозможность достоверного решения обратных задач, связанных с разложением фактической формы проявления сдвижений на отдельные составляющие, необходимые для эмпирического установления углов κ , ρ , λ , ω и θ' . Совокупность последних по смысловой нагрузке близка к граничным углам δ_0 , углам полных сдвижений ψ и максимальных оседаний θ , что дает основание предположить о идентичности величин или зависимостей, определяющих эти угловые параметры. Тогда можно записать: $\kappa \sim \delta_0$, $\rho \sim \psi$, $\omega \sim \psi$, $\lambda \sim \delta_0$ и $\theta' \sim \theta$.

На основании вышеизложенного, предлагаемые к последующему рассмотрению в рамках настоящей работы угловые параметры процесса сдвига

для условий отработки запасов ВКМС можно свести в результирующую таблицу 3, составленную с учетом рассмотренных типов граничных условий.

Таблица 3 – Обобщающая информация о принятой в рамках настоящей работы классификации угловых параметрах процесса сдвижения для условий ВКМС

Угловые параметры процесса сдвижения	Типы характерных граничных условий		
	1	2	3
граничные углы, δ_0	✓	-	✓
углы полных сдвижений, ψ	✓	✓	✓
углы максимальных	✓	✓	✓
углы сдвижения, δ	✓	-	-

Как видно из таблицы 3, для решения различных инженерных и научных задач, относящихся к вопросу сдвижения горных пород и земной поверхности в условиях отработки запасов ВКМС, предлагаются к использованию 4 основных угла, для которых ниже будет осуществлен выбор и обоснование соответствующих критериев.

2.3 Выводы

1. По результатам проведенных исследований установлено отсутствие необходимости введения классификации угловых параметров по фактору угла падения отрабатываемых пластов ввиду относительной пологости залегания последних. Также выявлено отсутствие целесообразности выделения угловых параметров в наносах, обусловленное важностью комплексного учета слабых пород во всей подрабатываемой породной толще. Обозначенные обстоятельства не исключают возможности учета рассмотренных факторов при определении величин или выявлении аналитических зависимостей для отдельных углов;

2. Предлагаемые к рассмотрению в рамках настоящей работы угловые параметры процесса сдвижения для условий отработки запасов ВКМС

представлены четырьмя основными углами: граничными δ_0 , полных сдвижений ψ , максимальных оседаний θ и сдвижения δ ;

3. Для установления фактических величин вышеотмеченных угловых параметров по результатам натуральных инструментальных наблюдений за развитием процесса сдвижения земной поверхности в условиях отработки запасов ВКМС необходимо обоснование соответствующих критериальных значений оседаний и деформаций, которое будет выполнено в следующей главе настоящей работы.

ГЛАВА 3. ВЫБОР КРИТЕРИЕВ ДЛЯ УСТАНОВЛЕНИЯ ФАКТИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН ИССЛЕДУЕМЫХ УГЛОВЫХ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА СДВИЖЕНИЯ В УСЛОВИЯХ ОТРАБОТКИ ЗАПАСОВ ВКМС

3.1 Граничные углы

Фактической границей мульды считается точка в ее краевой части, характеризующая нулевыми величинами сдвижений и деформаций. Определение истинного местоположения такой точки является невыполнимой задачей вследствие неизбежного наличия погрешностей инструментальных наблюдений, поэтому, на практике, в качестве граничных критериев используются некоторые условные значения сдвижений или деформаций, соответствующие возможным ошибкам их определения [69]. Из первой главы настоящей работы известно, что на ВКМС в «Указаниях», изданных с 1994 г. по 2008 г. в качестве граничных величин деформаций приняты значения $i = 0,3 \cdot 10^{-3}$ и $\varepsilon = 0,3 \cdot 10^{-3}$, а в последующих версиях упомянутого документа, изданных после 2013 г., информации о регламентируемых граничных критериях отсутствует. Обозначенные величины достаточно продолжительное время сохраняли свою актуальность и близки к регламентируемым «Указаниями» 1985 г. значениям $i = 0,4 \cdot 10^{-3}$ и $\varepsilon = 0,3 \cdot 10^{-3}$, что формирует необходимость их пересмотра с учетом накопленного опыта, технологического совершенствования измерительного оборудования и области применения (натурные инструментальные наблюдения или численное моделирование процесса сдвижения).

Принимая во внимание вышеобозначенные интервальные граничные критерии i и ε , справедливо заметить невозможность независимого достоверного их использования на начальной стадии и в условиях медленного развития процесса сдвижения, когда между смежными реперами в краевой части мульды наблюдаются небольшие разности оседаний или не происходит значимого

изменения длин интервалов. С другой стороны, интервальные критерии i и ε характеризуются большей однозначностью использования их на практике по сравнению с точечным критерием оседания η . Для численного подтверждения сказанному можно оценить вычисляемые по результатам натуральных инструментальных наблюдений погрешности наклона, горизонтальной деформации и оседания, которые, в свою очередь, можно найти как погрешности функции общего вида.

Для функции общего вида $y = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$, согласно [103, 104], математическое выражение погрешности будет выглядеть следующим образом:

$$m_y = \pm \sqrt{\sum_1^n \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} m_{x_i} \right)^2}, \quad (3.1)$$

где $\partial f / \partial x_i$ – частные производные данной функции, вычисленные для соответствующих значений аргументов;

m_{x_i} – средние квадратические погрешности соответствующих аргументов.

Погрешность определения наклона i возможно определить, применяя формулу 3.1 к выражению 1.11, заменив разность $\eta(t)_n - \eta(t)_{n-1}$ превышением h и игнорируя эмпирический коэффициент q_i , не определяющий погрешность инструментальных наблюдений:

$$m_i = \pm \sqrt{\left(\frac{\partial i(z)_n}{\partial l_n} \right)^2 m_{l_n}^2 + \left(\frac{\partial i(z)_n}{\partial h} \right)^2 m_h^2}, \quad (3.2)$$

Учитывая, что

$$\frac{\partial i(z)_n}{\partial l_n} = \frac{h}{l_n^2} \approx 0 \text{ т.к. } l_n^2 \gg h,$$

$$\frac{\partial i(z)_n}{\partial h} = \frac{1}{l_n},$$

тогда выражение 3.2, можно представить в виде:

$$m_i = \pm \frac{m_h}{l_n} \quad (3.3)$$

Если учесть в выражении 3.3, что погрешность определения превышения m_h на станции, в соответствии с ЕППМР [105], составляет $\pm 0,7$ мм, а расстояние l_n в условиях наблюдений за процессом сдвижения на ВКМС варьируется от 15 м до 60 м, то погрешность определения наклона m_i не превысит $\pm 0,05 \cdot 10^{-3}$. Полученное значение обусловлено влиянием лишь инструментальных ошибок измерения и при рассмотрении других влияющих факторов величина погрешности возрастет. Принимая за предельную ошибку определения превышения $m_h^{\text{пр}}$ тройную среднюю квадратическую [104], предельная ошибка определения наклона $m_i^{\text{пр}}$ составит $\pm 0,15 \cdot 10^{-3}$. Эта величина в 2 раза меньше ранее регламентированного критерия по наклону и может быть использована как актуализированное его значение применительно к стадии активного развития процесса сдвижения, а также после нее.

Рассматривая критерий горизонтальной деформации ε можно отметить некоторую органичность его использования на практике, обусловленную, прежде всего, малым количеством профильных линий, где ведутся интервальные наблюдения длин с момента начала ведения горных работ.

В случае наличия своевременных систематических интервальных наблюдений в краевой части мульды сдвижения, погрешность определения горизонтальной деформации m_ε можно найти аналогично ранее выполненным расчетам с использованием формулы 3.1 применительно к выражению 1.14, игнорируя при этом эмпирический коэффициент q_ε , не определяющий погрешность инструментальных наблюдений:

$$m_\varepsilon = \pm \frac{\sqrt{2} m_l}{l} \quad (3.4)$$

Если учесть, что относительная погрешность определения длины интервала m_l/l , в соответствии с ЕППМР [105], не должна превышать $1/10000$, тогда значение m_ε составит $\pm 0,14 \cdot 10^{-3}$.

В этом случае, используемый в настоящее время граничный критерий горизонтальной деформации $\varepsilon = 0,3 \cdot 10^{-3}$ будет приблизительно соответствовать двойной среднеквадратической ошибке m_ε , что позволяет учесть большую часть случайных ошибок при определении длины интервала. Наиболее достоверное определение границы мульды с использованием рассмотренного критерия может быть реализовано только на стадии активного развития процесса сдвижения и после нее.

В случае отсутствия результатов фактических наблюдений длин интервалов возможно лишь вычислить ожидаемое значение горизонтальной деформации в краевой части мульды по формуле 1.20, которое можно также связать и с ожидаемым наклоном $i(z)$. Для этого параметр $K(z)$, с учетом выражений 1.18 и 1.17, можно преобразовать к виду:

$$K(z) = \frac{S''(z) q_k i(z)}{S'(z) q_i L} \quad (3.5)$$

Значения применяемых в настоящее время функций распределения относительных наклонов $S'(z)$ и кривизны $S''(z)$ [19] отражены в таблице 4.

Таблица 4 – Значения типовых функций распределения относительных оседаний $S(z)$, наклона $S'(z)$ и кривизны $S''(z)$ в полумульде сдвижения

z	$S(z)$	$S'(z)$	$S''(z)$
0,0	1,000	1,00	0,0
0,1	0,950	0,80	-7,5
0,2	0,840	1,50	-6,7
0,3	0,655	2,00	0,0
0,4	0,440	1,75	+4,5
0,5	0,290	1,25	+5,5
0,6	0,188	0,85	+2,8
0,7	0,120	0,60	+2,0
0,8	0,072	0,45	+1,5
0,9	0,034	0,30	+1,0
1,0	0,000	0,00	0,0

Как видно из таблицы 4, каждая последующая точка со середины полумульды (при абсциссах $z \geq 0,5$) по направлению к ее границе характеризуется меньшими сдвигами и деформациями относительно предыдущей. При линейной интерполяции значений $S'(z)$ и $S''(z)$ на участке z от 0,9 до 1,0, отношение $S''(z_{0,9-1,0}) / S'(z_{0,9-1,0})$ будет соответствовать величине 10/3, а отношение q_k / q_i на интервалах, длиной 15-60 м не превысит величины 1,05. При подстановке обозначенных величин в выражение 3.5, а итогового результата в формулу 1.20, получается:

$$\varepsilon(z_{0,9-1,0}) = 3,5 m_e i(z_{0,9-1,0}) \quad (3.6)$$

Если учесть, что кривизна $K(z)$ на границе мульды сдвига стремится к нулю, тогда коэффициент m_e составит:

$$m_e = \lim_{K(z) \rightarrow 0} (0,05 + 0,09(1 - K(z) \cdot 10^4)^{3,8}) = 0,14$$

Подставляя значение коэффициента m_e в зависимость 3.6 и выражая параметр $i(z)$, получается:

$$i(z_{0,9-1,0}) \approx 2 \varepsilon(z_{0,9-1,0}) \quad (3.7)$$

Учитывая величину вышерассмотренного критерия ε , несложно определить соответствующее ему расчетное значение наклона $i_r \approx 0,6 \cdot 10^{-3}$, которое значительно больше вышеопределенного критериального $i = 0,15 \cdot 10^{-3}$, следовательно, расчетные горизонтальные деформации не позволяют найти границу мульды сдвига с достаточной точностью, характерной для инструментальных наблюдений. Таким образом, в случае отсутствия систематических своевременных интервальных наблюдений по профильной линии, наиболее достоверное определение границы мульды будет соответствовать использованию критерия наклона i .

Рассматривая погрешность определения оседания $\eta(t)$, уместно заметить, что последнее вычисляется как разность высотных отметок, полученных в результате

первоначального нивелирования H_0 и нивелирования на рассматриваемую дату H_i , тогда погрешность $m_{\eta(t)}$ можно, с учетом формулы 3.1, представить в виде:

$$m_{\eta(t)} = \pm \sqrt{\left(\frac{\partial \eta(t)}{\partial H_0}\right)^2 m_{H_0}^2 + \left(\frac{\partial \eta(t)}{\partial H_i}\right)^2 m_{H_i}^2} \quad (3.8)$$

Учитывая, что

$$\frac{\partial \eta(t)}{\partial H_0} = \frac{\partial \eta(t)}{\partial H_i} = 1,$$

$$m_{H_i} \approx m_{H_0} = m_H,$$

тогда выражение 3.8, можно привести к виду:

$$m_{\eta(t)} = \pm \sqrt{2} m_H \quad (3.9)$$

Численное значение погрешности m_H в выражении 3.9 невозможно определить однозначно ввиду наличия различных влияющих на ее величину факторов, таких как тип хода (замкнутый полигон, замкнутый или висячий ходы), его длина, местоположение в нем исследуемых реперов и т.д. Для примера можно рассмотреть одиночный замкнутый ход геометрического нивелирования, погрешность m_H для которого выражается формулой:

$$m_H = \pm f \sqrt{\frac{N}{n}}, \quad (3.10)$$

где f – величина невязки в замкнутом полигоне, мм;

N – число наблюдательных станций до рассматриваемого пункта;

n – общее число наблюдательных станций в полигоне.

В качестве величины невязки f уместно ограничиться допустимым ее значением, которое для условий производства наблюдений за процессом сдвижения на ВКМС составляет $5\sqrt{L}$, мм (при числе станций на 1 км хода меньше

15) или $6\sqrt{L}$, мм (при числе станций на 1 км хода больше 15) [105]. Опираясь на изложенное, выражение 3.9 можно привести к виду:

$$m_{\eta(t)} = \pm 8,5 \sqrt{\frac{L \cdot N}{n}}, \quad (3.11)$$

где L – длина хода, км.

Как видно из выражения 3.11, значение погрешности $m_{\eta(t)}$ может в значительной степени изменяться в зависимости от величин слагающих ее параметров, следовательно, для каждой исследуемой границы мульды необходим отдельный подсчет показателя $m_{\eta(t)}$, что на практике формирует некоторую неоднозначность и усложняет независимое использование точечного критерия оседания η . С другой стороны, если учесть преимущественное наличие опорных реперов в краевой части профильной линии, выходящей на постоянную границу выработанного пространства, то несложно оценить наибольшую возможную погрешность на интервале реперов от границы отработки до ближайшего опорного репера. При этом, погрешность m_H можно определить из выражения:

$$m_H = \pm m_h \sqrt{K} = \pm m_h \sqrt{\frac{L_u}{l_n}}, \quad (3.12)$$

где K – количество станций до рассматриваемого пункта от ближайшего исходного опорного пункта;

L_u – длина участка профильной линии от рассматриваемого пункта до ближайшего исходного опорного пункта, м.

На участке профильной линии от границы отработки до ближайшего опорного репера величина L_u будет приблизительно соответствовать выражению:

$$L_{u(\text{гр.от.}-\text{оп.рп.})} \approx 100 + H \operatorname{ctg} \delta, \quad (3.13)$$

где H – глубина разработки до подошвы нижнего отработанного пласта, м;

$\delta = 50^\circ$ – величина граничного угла, принимаемая для расчета рабочей длины профильной линии в [105].

Подставляя выражение 3.13 в 3.12, а результат в формулу 3.9 и учитывая вышеобозначенное значение погрешности $m_h = \pm 0,7$ мм, получается:

$$m_{\eta(t)(\text{гр.от.-оп.рп.})} \approx \pm \sqrt{\frac{100 + 0,84H}{l_n}} \quad (3.14)$$

Учитывая, что среди имеющихся лицензионных участков месторождения наибольшая глубина отработки запасов нижнего пласта КрII достигает величины, близкой к 450 м, а наименьшая длина интервала $l_n = 15$ м, тогда, наибольшее значение погрешности $m_{\eta(t)(\text{гр.от.-оп.рп.})}$ в выражении 3.14 составит 6 мм. На практике, вследствие того, что местоположение границы мульды тяготеет к опорным реперам, расстояние между смежными реперами в большинстве случаев больше 15 м, фактическое значение $m_{\eta(t)(\text{гр.от.-оп.рп.})}$ будет кратно меньше 6 мм, таким образом, в обозначенной величине погрешности имеется некоторый запас, позволяющий компенсировать влияние ряда факторов, не связанных с инструментальными ошибками измерения. Опираясь на сказанное, можно заключить, что при наличии опорных реперов в краевой части исследуемого участка профильной линии граничным критерием оседания η может служить величина 6 мм. Полученное значение наиболее целесообразно использовать для определения области возможного применения критериев i и ε . Учитывая ранее сделанный вывод о уменьшении оседания по направлению к краевой части мульды, несложно заметить, что при применении на практике пары критериев $\eta-i$, в большинстве случаев, определяющим будет являться первый из них, что наглядно отражено на рисунке 11.

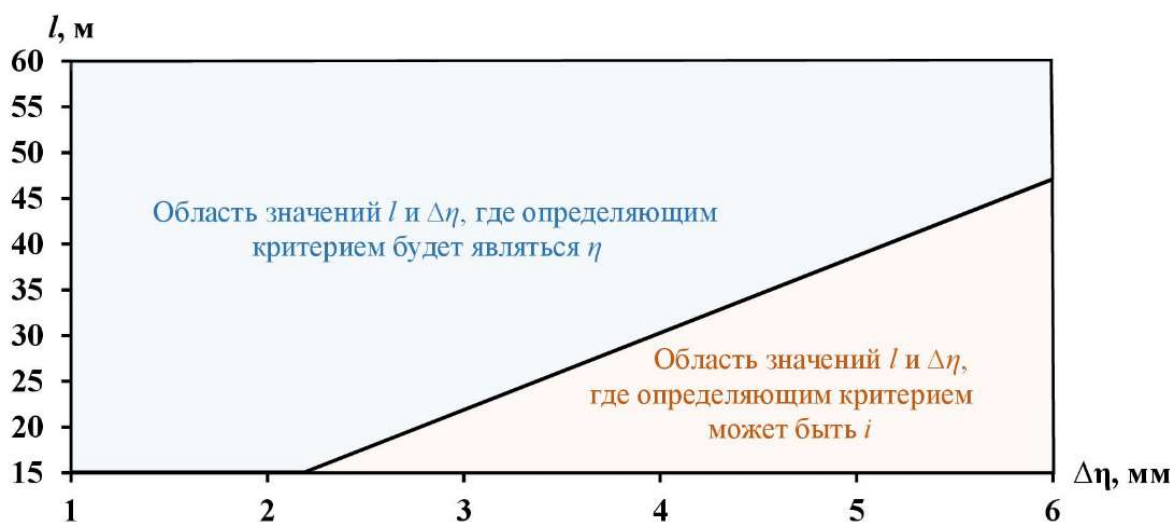


Рисунок 11 – Анализ использования пары критериев η - i при возможных значениях l и $\Delta\eta$ на границе мульды

Из рисунка 11 видно, что критерий i может быть определяющим при разности оседаний $\Delta\eta$ от 3 до 6 мм и длинах интервалов l от 15 м до 47 м соответственно. Обозначенное обстоятельство, в условиях наличия опорных реперов в краевой части исследуемого участка профильной линии, позволяет считать критерий η основным.

Для сравнительной проверки «старых» и «новых» критериев уместно ограничиться использованием i и η - i соответственно. Такой выбор объясняется, прежде всего, отсутствием возможности практического применения критерия ε и не изменившимся его значением. По результатам обработки данных инструментальных наблюдений по 15 профильным линиям на ВКМС, можно отметить что «новые» критерии η - i по сравнению со «старым» критерием i определяют ожидаемо меньшие величины граничных углов δ . Разности между последними $\Delta\delta$ имеют значительный разброс в диапазоне от 1° до 23° , при этом прослеживается общая тенденция к их снижению с увеличением достигнутого оседания $\eta_{(t)}$ по отношению к максимальному расчетному η_m , что наглядно видно из рисунка 12.

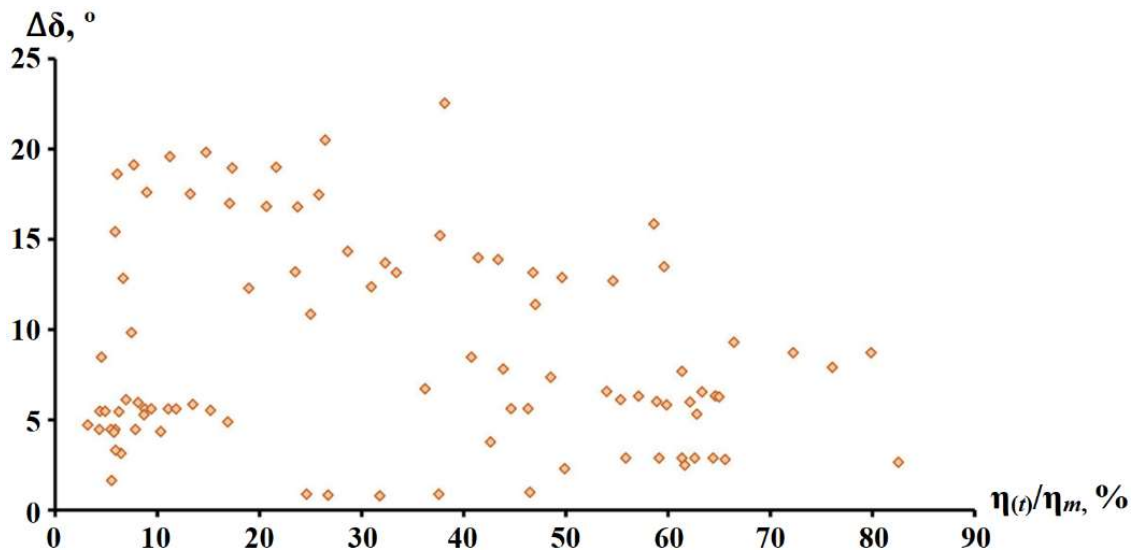


Рисунок 12 – Распределение величин разностей граничных углов $\Delta\delta$, получаемых при использовании старого i и новых критериев $\eta-i$

Также нельзя не отметить, что «старый» критерий i в отличие от новых $\eta-i$ не позволяет определять границу мульды при отношении $\eta(t) / \eta_m$ до 5%, т.е. на начальном этапе процесса сдвижения. Учитывая изложенное, можно сделать следующий вывод: пара критериев $\eta-i$ позволяет идентифицировать местоположение границы мульды на большем удалении от площадей ведения горных работ и применима на начальной стадии, а также в условиях медленного развития процесса сдвижения.

В способах исследования процесса сдвижения, где отсутствуют характерные для нивелирных ходов погрешности, например, при численном моделировании, также уместно использовать критерий η . Параметр $m_{\eta(t)}$ в этом случае не сложно выразить через погрешность определения превышения m_h , найденную аналогично вышеприведенным расчетам способом с учетом формулы 3.1:

$$m_{\eta(t)} \approx \pm \frac{m_h}{\sqrt{2}} \quad (3.15)$$

Подставляя в выражение 3.15 вышеобозначенную величину погрешности $m_h = \pm 0,7$ мм, получается, что $m_{\eta(t)} = \pm 0,5$ мм. Принимая за предельную ошибку определения превышения $m_h^{\text{пр}}$ тройную среднюю квадратическую [104], предельная ошибка определения оседания $m_{\eta(t)}^{\text{пр}}$ составит $\pm 1,5$ мм, а с учетом округления до целого значения - ± 2 мм. Полученное значение можно считать

точечной альтернативой интервального критерия наклона при определении границ мульды способами, исключаящими характерные для нивелирных ходов погрешности, например, в условиях, численного моделирования.

3.2 Углы полных сдвижений

Выбор критериев для определения углов полных сдвижений ψ неразрывно связан с установлением границы плоского дна мульды. Как правило, за границу плоского дна принимают ближайшую к границе мульды сдвижения точку с максимальным оседанием, деформации в которой близки к нулю [106].

Для условий отработки запасов ВКМС в «Указаниях» 1976 г. в качестве критериев определения границы плоского дна мульды предложены значения деформаций: $i = 1,6 \cdot 10^{-3}$, $K = 0,8 \cdot 10^{-4} \text{ м}^{-1}$, $\varepsilon = 2,5 \cdot 10^{-3}$. В других версиях обозначенного нормативного документа аналогичных значений не приводилось, что, от части, можно связать с некоторой сложностью применения их на практике, обусловленной частым отсутствием выраженного плоского дна мульды вследствие неоднородности сформированной геомеханической системы. Последнее определяется, прежде всего, различиями в величинах максимально возможных оседаний, продолжительностях и скоростях развития процесса сдвижения в отдельных геомеханических зонах отработки запасов. Учитывая сказанное, нельзя однозначно говорить о неактуальности граничных критериев для определения углов полных сдвижений на ВКМС.

Принимая во внимание ранее упомянутую информацию о нулевых деформациях на границе плоского дна мульды и учитывая равенство предельных ошибок определения наклона i и горизонтальной деформации ε как на границе плоского дна мульды, так и в ее краевой части, можно сделать вывод о возможности использования ранее определенных критериев для углов δ_0 $i = 0,15 \cdot 10^{-3}$ и $\varepsilon = 0,3 \cdot 10^{-3}$ применительно к углам ψ . Здесь немаловажно отметить, что критерий ε также

будет являться дополнительным и его использование возможно лишь в отдельных случаях при наличии своевременных систематических интервальных наблюдений на исследуемом участке профильной линии.

Анализируя ранее используемый критерий K , можно отметить, что близость кривизны к нулевому значению в районе плоского дна мульды отражает близость величин наклонов двух смежных интервалов. Если при этом принять во внимание то, что величина наклона на границе плоского дна мульды стремится к нулю, тогда, для использования критерия кривизны, наклон на смежном интервале также должен стремиться к нулю. Следовательно, в рассматриваемом случае необходимо наличие близких по значению оседаний у трех смежных реперов на границе плоского дна мульды. Учитывая неоднородность геомеханической системы, формируемой при отработке запасов ВКМС, наличие вышеупомянутого постоянства оседаний на границе плоского дна мульды является малораспространенным случаем, поэтому использование критерия K применительно к углам полных сдвижений не уместно.

Сказанное также свидетельствует о невозможности достоверного использования численно выраженного критерия максимального оседания, который при независимом применении в условиях рассматриваемого месторождения не будет отражать истинного местоположения границы плоского дна мульды (вследствие слабой выраженности постоянства значений η_m). С другой стороны, максимальное оседание является неотъемлемой характеристикой плоского дна мульды и должно быть задействовано для идентификации местоположения его границы. В рассматриваемой ситуации наиболее уместным будет применение вышерассмотренных критериев i и ε в предварительно сглаженной «области максимальных оседаний», характеризующей наличие плоского дна мульды. При этом, «областью максимальных оседаний» можно считать визуально определяемый из разреза сдвижений и деформаций профильной линии участок мульды, где наблюдается тенденция к сохранению относительного постоянства максимальных оседаний, минимальных наклонов и горизонтальных деформаций среди группы смежных реперов.

3.3 Углы максимальных оседаний

В условиях неполной подработки земной поверхности, когда в мульде сдвижения отсутствует плоское дно, точка, характеризующая максимальным оседанием является главным критерием для определения соответствующего угла.

3.4 Углы сдвижения

С целью охраны различных объектов на земной поверхности от вредного воздействия подземной разработки на ВКМС «Указаниями» 1976-2008 гг. установлены следующие опасные величины деформаций при среднем интервале 15-20 м между наблюдаемыми реперами: наклон $i = 4 \cdot 10^{-3}$, кривизна $K = 2 \cdot 10^{-4} \text{ м}^{-1}$, деформация растяжения $\varepsilon = 2 \cdot 10^{-3}$. За искомую границу зоны опасных сдвижений принимают ближайшую к границе мульды точку, соответствующую одной из вышеприведенных величин деформаций. В последних версиях «Указаний» 2014 г. и 2022 г. аналогичных величин не приводилось.

Использование подобных величин опасных деформаций прослеживается и в других действующих нормативных документах, не относящихся к рассматриваемому месторождению, например, в [91] или в [107], что, в свою очередь, свидетельствует о их высокой распространённости. Учитывая также, что рассматриваемые значения критических деформаций получены с учетом конструктивных особенностей различных сооружений и их пересмотр подразумевает проведение обширных практических и научно-исследовательских работ, можно заключить об отсутствии целесообразности их актуализации в рамках настоящей работы. Для практического использования уместно ограничиться ранее установленными величинами опасных деформаций.

3.5 Выводы

1. При рассмотрении углов δ_0 в случае наличия опорных реперов в краевой части исследуемого участка профильной линии в качестве основного граничного критерия уместно принять величину оседания $\eta = 6$ мм. Дополнительными уточняющими критериями в области оседаний до 6 мм могут служить наклон $i = 0,15 \cdot 10^{-3}$ и горизонтальная деформация $\varepsilon = 0,3 \cdot 10^{-3}$, последний из которых применим лишь в случае наличия своевременных систематических интервальных наблюдений. При отсутствии опорных реперов в краевой части исследуемого участка профильной линии необходим дополнительный предрасчет критерия η , который можно осуществить путем нахождения погрешности определения оседания последнего, наиболее удаленного от границы ведения горных работ репера. В случае невозможности осуществления вышеобозначенного предрасчета критерия η , определение местоположения границы мульды следует выполнять с использованием критериев i и ε ;

2. При рассмотрении углов ψ для определения границы плоского дна мульды при полной подработке земной поверхности основным критерием в «области максимальных оседаний» является величина наклона $i = 0,15 \cdot 10^{-3}$, а дополнительным, при наличии своевременных систематических интервальных наблюдений по профильной линии, значение горизонтальной деформации $\varepsilon = 0,3 \cdot 10^{-3}$;

3. Для определения угла максимальных оседаний θ в условиях неполной подработки уместно ограничиться точкой, получившей развитие наибольшего оседания;

4. При рассмотрении углов δ за границу зоны опасных сдвижений уместно принимать ближайшую к границе мульды точку, соответствующую одной из следующих величин деформаций: $i = 4 \cdot 10^{-3}$, $K = 2 \cdot 10^{-4} \text{ м}^{-1}$, $\varepsilon = 2 \cdot 10^{-3}$;

5. Использование вышепредставленных критериев применительно к данным натурных инструментальных наблюдений позволит установить фактические

величины рассматриваемых угловых параметров, необходимые для последующего анализа и вывода объективных закономерностей, описывающих их изменение во времени. Сказанное будет реализовано в рамках следующей части настоящей работы.

ГЛАВА 4. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЕЛИЧИН И УСТАНОВЛЕНИЕ АНАЛИТИЧЕСКИХ ЗАВИСИМОСТЕЙ УГЛОВЫХ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА СДВИЖЕНИЯ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ ПРИ ОТРАБОТКЕ ЗАПАСОВ НА ВКМС

4.1 Граничные углы

4.1.1 Выявление наиболее значимых факторов, которые могли бы оказать влияние на формирование граничных углов в условиях ВКМС

Первым этапом исследования граничных углов δ_0 будет являться выявление наиболее значимых факторов, которые могли бы оказать влияние на их формирование. Рассматривая этот вопрос в широком смысле, уместно отметить, что местоположение граничной точки мульды на отдельно взятом участке шахтного может быть связано с особенностями развития процесса сдвижения, которые, в свою очередь, формируются особенностями отработки полезного ископаемого и особенностями строения породного массива.

Особенности отработки полезного ископаемого являются первопричиной развития процесса сдвижения и тесно связаны с сформированной геомеханической системой, образованной четырьмя основными элементами – камера, закладка, междукамерный целик, междупласть. Первые два из перечисленных элементов задают возможный потенциально реализуемый объем пустот, а постепенное разрушение двух последних определяет характер и скорость развития процесса сдвижения. Как правило, в широкой инженерной практике при расчете сдвижений не прибегают к прямому использованию возможного потенциально реализуемого объема пустот, а применяют вместо этого параметра его линейную альтернативу – расчётное значение максимального оседания η_m .

Скорость разрушения оставляемых целиков в условиях отработки запасов ВКМС определяются, главным образом, величиной степени их нагружения C , которую также можно отнести к косвенным показателям оценки характера развития процесса сдвижения. Разрушение оставляемых целиков и погашение пустот выработанного пространства, наиболее точно, можно отследить по результатам обработки натуральных инструментальных наблюдений по профильным линиям реперов на земной поверхности. В рассматриваемом случае, наиболее значимым критерием являются достигнутые оседания $\eta(t_i)$ над центром зоны, непосредственно примыкающей к границе выработанного пространства.

Особенности строения породного массива определяют характер его поведения под воздействием факторов, формируемых особенностями отработки полезного ископаемого. В рассматриваемом случае, влияние на местоположение граничной точки можно связать с:

- общей мощностью надсолевой породной толщи (глубиной разработки до кровли верхнего отработанного пласта H) на отдельно взятом анализируемом участке шахтного поля;
- углами залегания отрабатываемых пластов α ;
- наличием в ее разрезе определенных групп пород, выделяющихся от остальных по физико-механическим свойствам.

Последние 2 фактора подробно рассмотрены в разделе 2.1 настоящей работы. Дополнительно стоит отметить, что наряду со слабыми породами в разрезе надсолевой толщи встречаются и довольно крепкие породы (f от 5 до 8) мощностью более 5 м. Представлены они, преимущественно, алевролитами терригенно-карбонатной толщи. В отдельных точках опробования средняя крепость f обозначенных пород близка к 10. Наибольшее распространение рассматриваемых пород наблюдается в юго-восточной части ВКМС, при этом на остальной площади месторождения встречаются они лишь на отдельных локальных участках. Суммарные мощности рассматриваемых алевролитов по отдельным скважинам превышают 20 м (например, скв. №№ 96С, 575, 11/2, 577 и др.).

Обобщая вышеизложенное, можно заключить, что для следующего этапа исследования, направленного на выявление зависимости граничных углов δ_0 от основных возможных влияющих факторов, стоит принять во внимание: расчётные значения максимальных оседаний η_m , достигнутые оседания $\eta(t_i)$, степени нагружения оставляемых целиков C , углы залегания отработанных пластов α , глубины разработки H , а также суммарные мощности слабых $\sum m_{сп.}$ и крепких $\sum m_{кп.}$ пород в разрезе надсолевой толщи. Такой комплексный параметр, как C , ввиду возможных различий его значения на разных отработанных пластах в анализируемых зонах, нуждается в отдельном подходе анализа.

4.1.2 Обоснование величин граничных углов

С целью оценки влияния вышеобозначенных факторов сформирован соответствующий массив данных. Для этого на различных участках шахтных полей рудников ВКМС отобраны 17 краевых частей профильных линий, имеющих выход на постоянную границу выработанного пространства и по которым ведутся систематические инструментальные наблюдения с момента, близкого к началу отработки запасов. По отобранным участкам профильных линий определены величины граничных углов δ_{0i} на различные даты инструментальных наблюдений. Расчет значений δ_{0i} производился из зависимости:

$$\delta_{0i} = \arctg \frac{H_i}{z_{\delta_{0i}}}$$

где H_i – глубина разработки, соответствующая расстоянию от земной поверхности до почвы нижнего отработанного пласта в точке пересечения профильной линией постоянной границы, м;

$z_{\delta_{0i}}$ – абсцисса граничной точки на рассматриваемую дату наблюдений с началом отсчета от границы горных работ, пересекаемой профильной линией, м.

При определении абсциссы $z_{\delta 0i}$ высокую значимость имеет правильный выбор граничных критериев. В соответствии с разделом 3.1, за границу мульды, при наличии опорных реперов в краевой ее части, может быть принята точка, получившая оседание $\eta = 6$ мм. В качестве дополнительного уточняющего критерия может быть использована величина наклона $i = 0,15 \cdot 10^{-3}$.

В случаях, когда профильная линия пересекала постоянную границу выработанного пространства в направлении не близком к ортогональному, рассматривалась проекция ее реперов на вертикальный разрез, проходящий перпендикулярно к рассматриваемой границе.

Затем в центральных частях зон, пересекаемых отобранными профильными линиями и непосредственно примыкающих к границам выработанного пространства, определены величины достигнутых к датам инструментальных наблюдений оседаний $\eta(t_i)$. Также для рассматриваемых зон, опираясь на фактические горнотехнические параметры отработки запасов, в соответствии с методикой нормативного документа [19], определены показатели степени нагружения отработанных пластов C и расчетные суммарные значения максимальных оседаний η_m .

Такие параметры, как углы залегания отработанных пластов α , суммарные мощности слабых $\sum m_{сп.}$ и крепких $\sum m_{кп.}$ пород в разрезе надсолевой толщи определены на основании данных геологической разведки.

После нахождения основных параметров сформирован исходный массив данных и рассчитана матрица линейных значений корреляции (без учета параметра C), представленная в таблице 5.

Таблица 5 – Корреляционная матрица исходного массива данных

	$\delta_0, \text{ }^\circ$	$\eta(t)_i, \text{ м}$	$\sum m_{сп.}, \text{ м}$	$\sum m_{кп.}, \text{ м}$	$\alpha, \text{ }^\circ$	$H, \text{ м}$	$\eta_m, \text{ м}$
$\delta_0, \text{ }^\circ$	1,00						
$\eta(t)_i, \text{ м}$	-0,44	1,00					
$\sum m_{сп.}, \text{ м}$	-0,06	0,55	1,00				
$\sum m_{кп.}, \text{ м}$	0,14	-0,18	-0,02	1,00			
$\alpha, \text{ }^\circ$	-0,01	-0,29	-0,23	-0,42	1,00		
$H, \text{ м}$	0,04	0,12	0,11	-0,54	0,12	1,00	
$\eta_m, \text{ м}$	0,14	0,19	0,30	0,52	-0,58	-0,30	1,00

Из таблицы 5 видно, что некоторая линейная взаимосвязь δ_0 прослеживается лишь с параметром $\eta(t_i)$, также видно отсутствие мультиколлинеарности между парами отдельных параметров. Поиск линейной многофакторной модели зависимости δ_0 от $\eta(t_i)$, $\sum m_{сп.}$, $\sum m_{кл.}$, α , H , η_m с последовательным исключением из рассмотрения факторов, обладающих малой значимостью по t -критерию Стьюдента, ожидаемо, не привел к получению адекватного уравнения. В ходе моделирования было замечено, что распределение остатков величин $\eta(t)_i$, имеет вид, близкий к степенной функции, что дает основание для дальнейшего рассмотрения многофакторной степенной регрессии.

При поиске степенной математической модели зависимости δ_0 от рассматриваемых возможных влияющих факторов, с последовательным исключением из рассмотрения тех из них, которые обладают малой значимостью по t -критерию Стьюдента, получено следующее уравнение регрессии:

$$\delta_{0i} = 53,91 \frac{\eta_m^{0,05}}{\eta(t_i)^{0,07}} \quad (4.1)$$

где $\eta(t_i)$ – достигнутое на заданный момент времени оседание над центром зоны, непосредственно примыкающей к границе выработанного пространства, м;

η_m – расчётное значение максимального оседания над зоной, непосредственно примыкающей к границе выработанного пространства, м.

Зависимость 4.1 статистически значима по критерию Фишера ($F_{факт}=92,7 > F_{таб}=3,1$), составляющие ее коэффициенты η_m и $\eta(t_i)$ статистически значимы по критерию Стьюдента ($t_{\eta_m} = 5,1 > t_{таб} = 2,0$; $t_{\eta(t_i)} = 14,1 > t_{таб}=2,0$), средняя относительная ошибка определения граничного угла $\varepsilon_{ср.} = 5,3\%$, максимальная $\varepsilon_{макс.} = 19,3\%$, коэффициент детерминации $R^2 = 0,64$. В рассматриваемом случае, несмотря на приемлемое значение $\varepsilon_{ср.}$, ввиду наличия ряда значительных относительных ошибок ε , равномерно распределенных по анализируемой совокупности данных с разбросом от 10% до 19,3%, полученное уравнение нельзя считать приемлемым для практического использования.

Принимая во внимание параметры η_m и $\eta(t_i)$ справедливо заметить, что первый из них является расчетной величиной, постоянной для каждого из рассматриваемых участков профильных линий, в то время как значения граничных углов δ_0 не постоянны на различные даты инструментальных наблюдений, поэтому оценивать взаимосвязь пары параметров δ_0 и η_m напрямую не целесообразно. Относительно второго параметра $\eta(t_i)$ прослеживается выраженная нелинейная сгруппированность величин δ_0 , наглядно отраженная на рисунке 13.

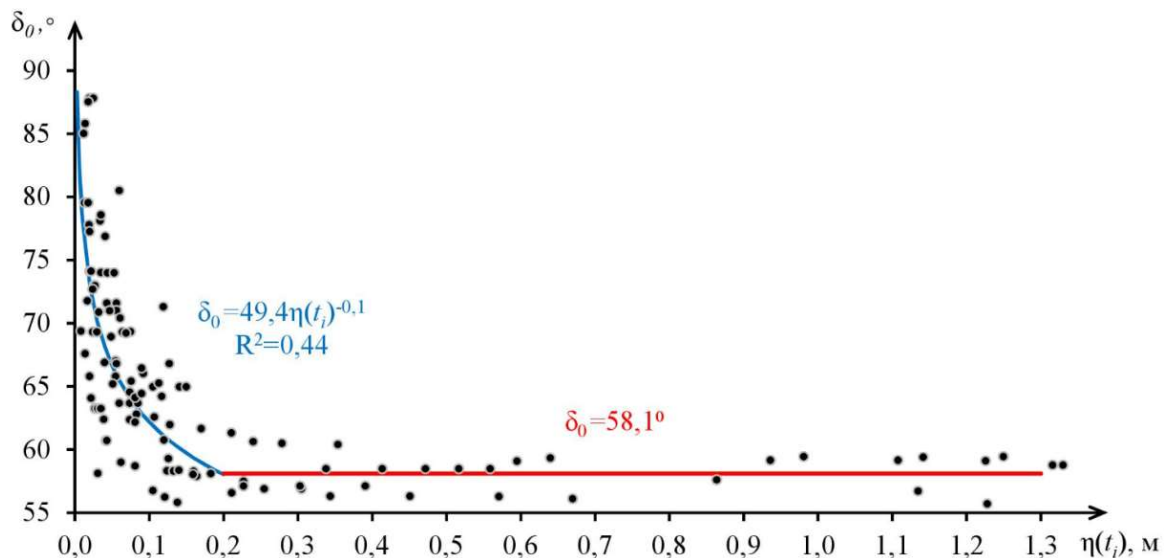


Рисунок 13 – Корреляционное поле значений граничных углов δ_0 и достигнутых оседаний $\eta(t_i)$

Из рисунка 13 можно заметить, что величины δ_0 лежат в диапазоне от $55,1^\circ$ до $87,8^\circ$, а значения $\eta(t_i)$ изменяются от $0,008$ м до $2,048$ м. Наибольшие изменения величин δ_0 прослеживаются на интервале $\eta(t_i)$ от 0 м до $0,2$ м, после чего наблюдается выраженная консолидация их значений на уровне $55,1-61,3^\circ$.

В диапазоне $\eta(t_i) \in (0;0,2)$ м изменение граничных углов может быть определено зависимостью:

$$\delta_{0i} = 49,4\eta(t_i)^{-0,1} \quad (4.2)$$

Выражение 4.2 характеризуется средней относительной ошибкой определения граничного угла $\epsilon_{\text{ср.}} = 6,6\%$, а максимальная ошибка составляет $\epsilon_{\text{макс.}} = 21,2\%$. Наибольшие относительные ошибки тяготеют к первой половине

интервала, т.е. $\eta(t_i) \in (0;0,1]$ м. На второй половине интервала $\eta(t_i) \in [0,1;0,2)$ $\varepsilon_{\text{макс.}}$ составляет 14,3%. На интервале $\eta(t_i) \geq 0,2$ м, представляющем наибольший практический интерес, величины δ_0 имеют разброс от $55,1^\circ$ до $61,3^\circ$, составляя в среднем $\delta_{0\text{ср.}} = 58,1^\circ$. Относительные ошибки отклонения фактических величин δ_0 от $\delta_{0\text{ср.}}$ равны $\varepsilon_{\text{ср.}} = 2,3\%$, $\varepsilon_{\text{макс.}} = 5,4\%$.

Для принятия решения о значимости и дальнейшем использовании ранее упомянутого критерия максимального расчетного оседания η_m , уместно рассмотреть некоторое усложнение полученной модели зависимости граничных углов δ_0 от достигнутого оседания $\eta(t_i)$ путем комбинирования критериев $\eta(t_i)$ и η_m . Среди возможных их комбинаций, в первую очередь, необходимо рассмотреть отношение достигнутого оседания $\eta(t_i)$ к максимальному расчетному η_m , которое ранее уже использовалась на практике.

Оценивая распределение δ_0 относительно $\eta(t_i)/\eta_m$, можно также отметить выраженную нелинейную сгруппированность данных, наглядно отраженную на рисунке 14.

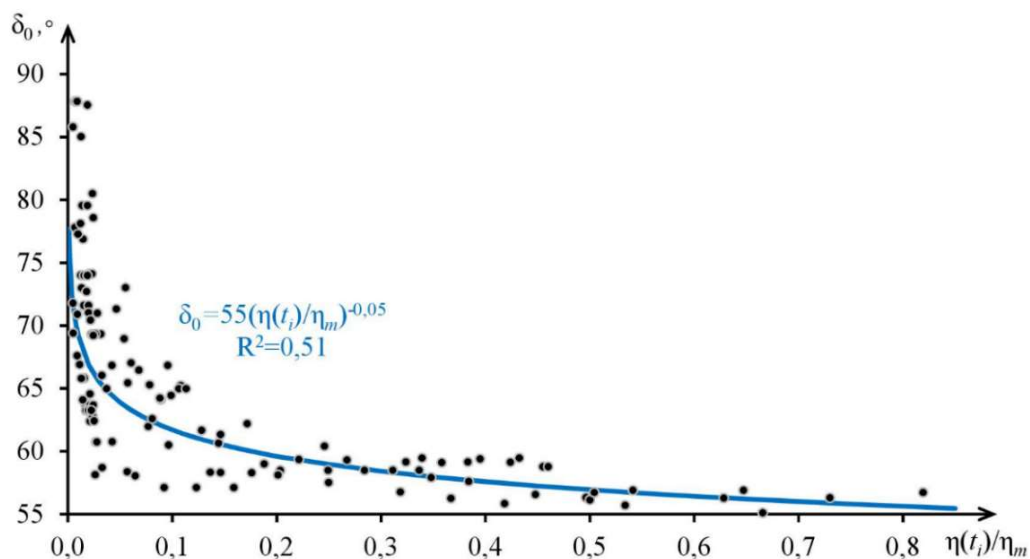


Рисунок 14 – Корреляционное поле значений граничных углов δ_0 и отношений достигнутого оседания к максимальному расчетному $\eta(t_i)/\eta_m$

Из рисунка 14 видно, что наибольшие изменения δ_0 прослеживаются в диапазоне $\eta(t_i)/\eta_m$ от 0 до 0,1, после чего наблюдается плавное уменьшение их величин до значения близкого к 55° . Изменение граничных углов δ_0 в рассматриваемом случае может быть охарактеризовано зависимостью:

$$\delta_{0i} = 55 \left(\frac{\eta(t_i)}{\eta_m} \right)^{-0,05} \quad (4.3)$$

Выражение 4.3 характеризуется средней относительной ошибкой определения граничного угла $\varepsilon_{\text{ср.}} = 5,4\%$, а максимальная ошибка составляет $\varepsilon_{\text{макс.}} = 23,3\%$. Наибольшие относительные ошибки тяготеют к малозначимому для практического использования интервалу $\eta(t_i)/\eta_m \leq 0,1$. На остальной части интервала $\eta(t_i)/\eta_m > 0,1$ относительные ошибки равны $\varepsilon_{\text{ср.}} = 2,2\%$, $\varepsilon_{\text{макс.}} = 6,9\%$, что приемлемо для практического использования.

Сравнивая полученные модели зависимости граничных углов δ_0 от факторов $\eta(t_i)$ и $\eta(t_i)/\eta_m$ можно отметить сопоставимую простоту их практического использования и схожие величины относительных погрешностей определения искомой величины. Основной отличительной особенностью моделей является описание области, следующей за начальной стадией развития процесса сдвижения. В первом случае предлагается фиксированная величина граничного угла, а во втором функциональная зависимость, описывающая плавное уменьшение искомой величины до значения, близкого к 55° . Учитывая тенденцию распределения величин δ_0 на начальном этапе развития процесса сдвижения, вторая из моделей выглядит более достоверной, поэтому предпочтение стоит отдать ей.

Таким образом, можно сделать вывод о том, что наиболее значимые изменения величин граничных углов δ_0 прослеживаются на начальном этапе процесса сдвижения до достижения фактического оседания $\eta(t_i)$ над центральной частью краевой зоны величины 10% от максимального расчетного η_m . При дальнейшем развитии процесса сдвижения происходит плавное изменение местоположения граничной точки мульды в сторону граничного угла, близкого к 55° . Полученный результат частично согласуется с фиксированными величинами граничных углов $\delta_0 = 55^\circ$, регламентируемых последними версиями «Указаний» 2014 г. и 2022 г., которые можно считать приемлемыми лишь для расчетов длины полумульды на конец процесса сдвижения.

Последним не рассмотренным фактором является показатель степени нагружения C . Анализируя распределение δ_0 относительно C нельзя отметить

наличия какой-либо видимой их взаимосвязи. В рассматриваемом случае, как было отмечено ранее, основной сложностью учета величины C являются различные значения этого показателя на разных отработанных пластах в рассмотренных зонах, кроме того, рассчитанные показатели C нельзя считать достоверными для всех этапов развития процесса сдвижения, поскольку выработанная на сегодняшний день методика приближенной оценки C базируется на условиях:

- Действующая на целик нагрузка равна весу породного столба, приходящегося на поддерживаемую им площадь выработанного пространства и на площадь самого целика;
- Несущая способность целика равна тому значению, которое он имеет сразу же после оконтуривания его горными выработками.

Учитывая, что несущая способность целика изменяется в процессе разрушения геомеханической системы, справедливо отметить, что полученные показатели C не отражают реального значения этого параметра в определенный временной промежуток.

Наиболее простым способом оценки влияния рассматриваемого показателя C является разбиение исходного массива данных δ_0 на два диапазона по максимальным значениям степени нагружения целиков среди отработанных пластов в анализируемых зонах ($C \leq 0,4$ и $C > 0,4$) с последующей оценкой их эмпирического корреляционного отношения $\eta_{\text{эмп}}$ [108]. Рассчитанная величина $\eta_{\text{эмп}} \approx 0,01$, что свидетельствует об отсутствии связи между δ_0 и C .

Альтернативным способом оценки влияния степени нагружения C на формирование величин граничных углов δ_0 является рассмотрение этого параметра как фактора, определяющего скорость развития процесса сдвижения η'_t , т.е.

$$\eta'_t = f(C).$$

В такой постановке задачи уместно оценить взаимосвязь годовых скоростей изменения граничных углов δ'_0 и фактических оседаний η'_t , что наглядно отражено на рисунке 15.

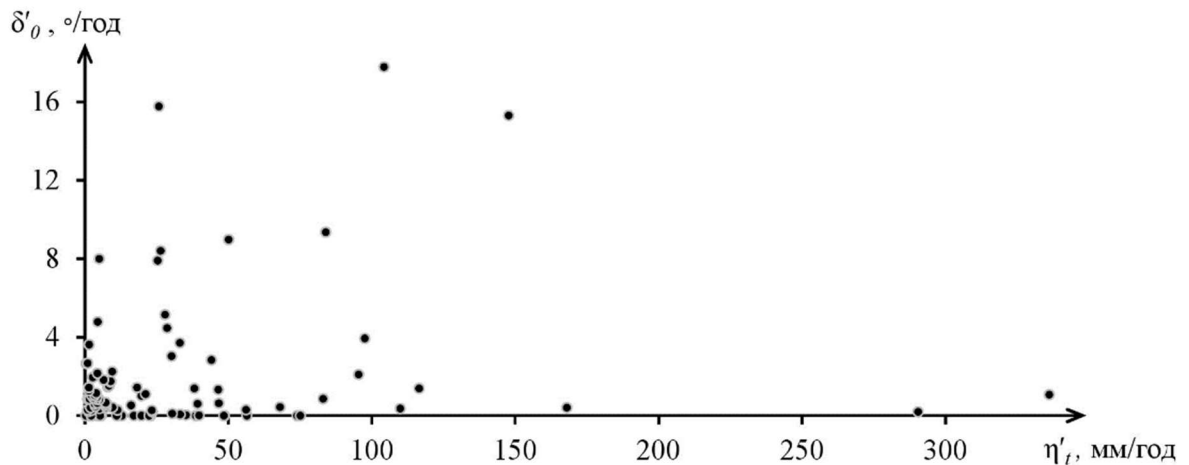


Рисунок 15 – Корреляционное поле скоростей изменения граничных углов δ'_0 и скоростей фактических оседаний η'_t

Из рисунка 15 видно отсутствие видимой взаимосвязи между параметрами δ'_0 и η'_t , следовательно, степень нагружения C , нельзя отнести к значимым факторам, оказывающим влияние на формирование величин граничных углов δ_0 . Таким образом, вышерассмотренные методики определения граничных углов δ_0 , использовавшиеся до 2008 г. можно считать недостоверными, чем и объясняется последующий отказ от их использования.

4.2 Углы полных сдвижений и максимальных оседаний

4.2.1 Выбор и обоснование характерных геомеханических условий для последующего рассмотрения исследуемых угловых параметров

Рассматривая представленную на рисунке 7 геомеханическую систему, можно отметить, что в целом, подработку земной поверхности на ВКМС правильнее считать комбинированной, т.е. состоящей из отдельных участков полной и неполной подработок, впоследствии сочетающихся в результирующую суммарную форму проявления сдвижений. Последняя характеризуется сложной формой, изменяющейся во времени на разных ее участках по различным законам.

Отмеченное обстоятельство в совокупности со смысловой нагрузкой исследуемых угловых параметров, позволяет натурно установить исследуемые углы лишь на отдельных интервалах результирующей формы проявления сдвижений, среди которых, главным образом, выделяются краевые части, т.е. участки, непосредственно примыкающим к постоянным границам выработанного пространства, которым и будет уделено основное внимание в рамках текущего раздела настоящей работы. Для отмеченных участков можно выделить три основные возможные геомеханические ситуации:

1. Условия относительной однородности строения геомеханической системы от постоянной границы выработанного пространства до области плоского дна мульды сдвижения. В рассматриваемых условиях, количество обрабатываемых пластов, сроки и параметры отработки запасов в зоне, непосредственно примыкающей к постоянной границе выработанного пространства будут близко соответствовать смежным зонам, что создает предпосылки для равномерного развития процесса сдвижения вдоль краевой части мульды;

2. Условия, при которых зоны, непосредственно примыкающие к постоянным границам выработанного пространства (граничные зоны или зоны смягчения), характеризуются более поздними сроками отработки запасов и/или меньшими расчетными значениями показателей степени нагружения оставляемых междукамерных целиков C и/или меньшими суммарными максимальными оседаниями $\sum \eta_m$ относительно остальной совокупности смежных с ними зон. Описанный случай довольно часто встречается на практике вследствие необходимости формирования у постоянных границ выработанного пространства «зон смягчения» или «граничных зон» (согласно требованиям «Указаний» различных лет), обеспечивающих некоторое сглаживание и удлинение полумульды мульды сдвижения, что находит отражение в уменьшении углов полных сдвижений ψ ;

3. Условия, при которых размеры граничной зоны недостаточны для независимого формирования полумульды сдвижения с выраженным плоским дном и параметры отработки запасов в ней будут обеспечивать меньшую устойчивость

геомеханической системы и, как следствие, более высокую интенсивность развития процесса сдвижения относительно смежных зон. Рассматриваемый случай довольно редко встречается на практике. В описанных условиях не происходит формирования выраженного плоского дна мульды и пропадает целесообразность практического использования углов полных сдвижений ψ .

Принимая во внимание вышеизложенное, справедливо заметить, что первые две из вышеперечисленных геомеханических ситуаций тематически относятся к вопросу исследования углов полных сдвижений ψ . Третья ситуация сопряжена с необходимостью использования углов максимальный оседаний θ . При этом, область практического использования последних распространяется и на другие возможные ситуации, например, на участки неполной подработки, характеризующихся значительно большей интенсивностью развития процесса сдвижения относительно смежных с ними зон или на отдельные локальные участки небольших размеров, заключенные между оставленными предохранительными целиками различного назначения.

4.2.2 Обоснование величин углов полных сдвижений

Исследование углов полных сдвижений ψ целесообразно начать с анализа фактических их величин в рамках первой из вышеперечисленных геомеханических ситуаций. Для этого на шахтных полях рудников ВКМС были отобраны 7 локальных участков над которыми, с момента близкого к началу отработки запасов, проводились систематические инструментальные наблюдения за процессом сдвижения земной поверхности.

Определение величин углов полных сдвижений ψ_i на различные даты инструментальных наблюдений производилось из зависимости:

$$\psi_i = \operatorname{arctg} \frac{H_i}{z_{\psi t}}, \quad (4.4)$$

где H_i – глубина разработки, соответствующая среднему расстоянию от земной поверхности до почвы нижнего отработанного пласта на рассматриваемом участке шахтного поля, м;

$z_{\psi t}$ – абсцисса границы плоского дна мульды на рассматриваемую дату наблюдений с началом отсчета от границы горных работ, пересекаемой профильной линией, м.

При определении абсциссы $z_{\psi t}$ высокую значимость имеет правильный выбор критериев границы плоского дна мульды. В соответствии с разделом 3.2 настоящей работы, в качестве основного критерия принята величина наклона $i = 0,15 \cdot 10^{-3}$, учитываемая в «области максимальных оседаний».

В случаях, когда профильная линия пересекала постоянную границу выработанного пространства в направлении не близком к ортогональному, рассматривалась проекция ее реперов на вертикальный разрез, проходящий перпендикулярно к рассматриваемой границе.

Произведенные вычисления показали выраженное постоянство во времени численных значений углов ψ_i на каждой из рассмотренных наблюдательных станций. Для наглядного отображения сказанного, на рисунке 16 целесообразно привести один из рассмотренных разрезов сдвижений и деформаций за период наблюдений с 1976 г. по 1985 г.

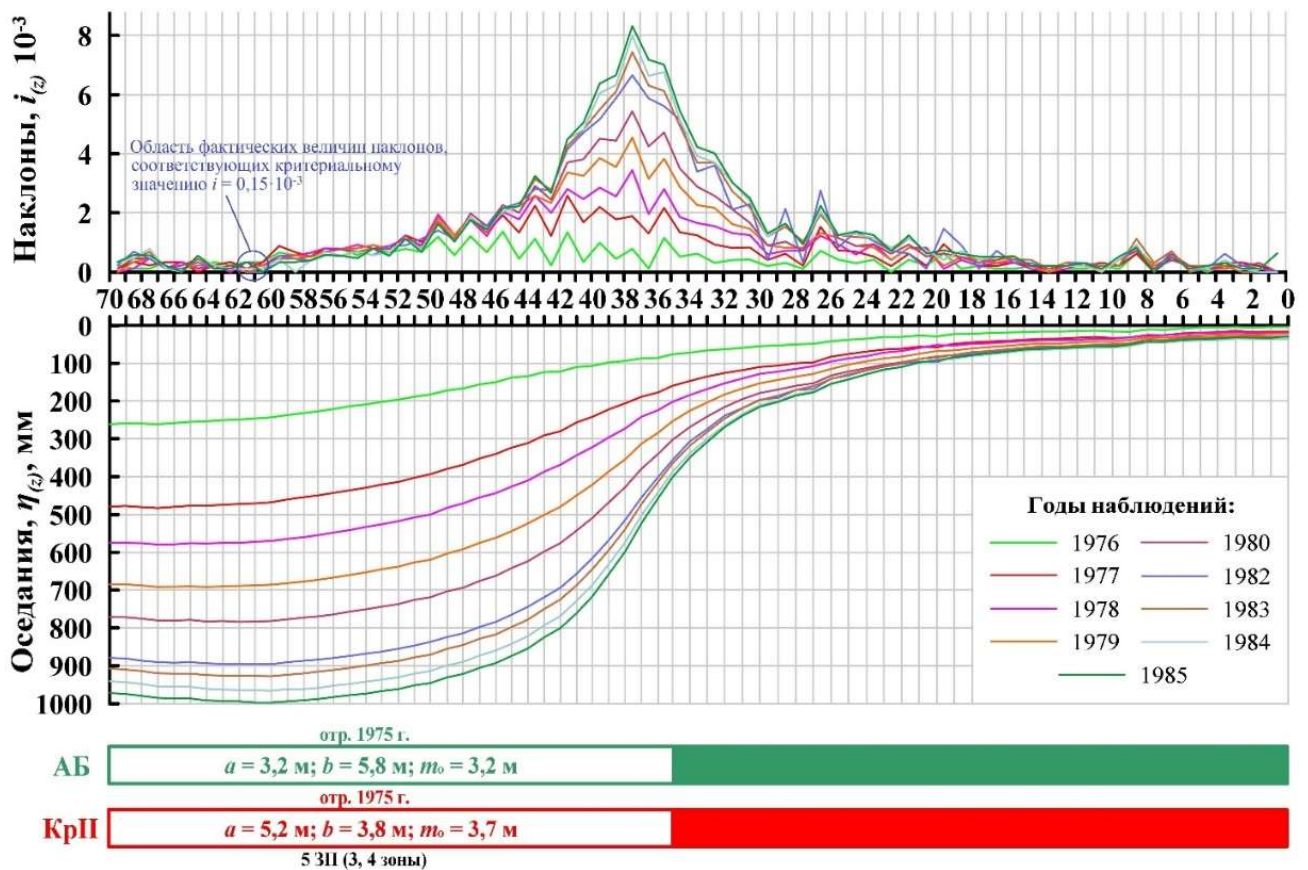


Рисунок 16 - Разрез сдвижений и деформаций по одной из рассмотренных профильных линий за период наблюдений с 1975 г. по 1985 г.

Принимая во внимание выделенную на рисунке 16 область фактических величин наклонов, соответствующих критерию $i = 0,15 \cdot 10^{-3}$, справедливо отметить близость вычисленных углов ψ_i , что, в рассматриваемом случае, определяет целесообразность нахождения среднего значения угла полных сдвижений $\psi_{\text{ср.}}$. Аналогичный подход к определению величины $\psi_{\text{ср.}}$ справедлив и для остальных наблюдательных станций.

Для первичного анализа вычисленных величин углов полных сдвижений $\psi_{\text{ср.}}$ информацию о них целесообразно дополнить численными показателями основных возможных влияющих факторов. Опираясь на ранее изложенное обоснование выбора последних применительно к исследованию величин граничных углов, а также, учитывая вышеупомянутое постоянство значений ψ_i , свидетельствующее о потенциальном влиянии на их формирование факторов, не склонных к значительным изменениям во времени, для настоящего исследования приняты во внимание:

- количество обрабатываемых пластов;

- расчётные значения максимальных оседаний η_m ;
- степени нагружения оставляемых целиков C ;
- средние углы залегания отработанных пластов α ;
- средние глубины разработки $H_{кр.ср.}$ до кровли верхнего отработанного пласта;
- суммарные мощности слоев (более 5 м) слабых $\sum m_{сп.}$ (наносы, глины в ТКТ и ПЦТ) и крепких $\sum m_{кп.}$ (f от 5 до 8) пород в разрезе надсолевой толщи.

Полученный массив данных представлен в таблице 6.

Таблица 6 - Сводная таблица средних значений углов полных сдвижений $\psi_{ср.}$ и величин основных влияющих факторов принятых во внимание

№ участков п/п	Пласты	$H_{кр.ср.}$, м	C	$\sum \eta_m$, м	α , °	$\sum m_{сп.}$	$\sum m_{кп.}$	$\psi_{ср.}$, °
1	АБ	354	0,37	2,97	0,1	14,8	0,0	57,8
	Кр.П	360	0,62					
2	АБ	284	0,25	2,46	0,6	9,5	23,3	55,7
	Кр.П	290	0,52					
3	АБ	317	0,30	1,77	0,1	0,0	0,0	45,0
	Кр.П	325	0,30					
4	АБ	332	0,35	1,97	0,7	12,5	0,0	47,7
	Кр.П	340	0,33					
5	АБ	359	0,29	0,77	1,1	5,0	0,0	56,2
	Кр.П	365	0,53					
6	Кр.П	365	0,76	2,37	0,5	13,0	0,0	63,5
7	Кр.П	390	0,73	2,73	0,1	8,9	0,0	63,5

Из таблицы 6 видно, что вычисленные углы $\psi_{ср.}$ имеют разброс от 45° до 63,5°, среднее их значение составляет $\bar{\psi}_{ср.} = 55,4$ °, что близко к величине 55°, регламентируемой различными версиями «Указаний». Относительные ошибки отклонения величин $\psi_{ср.}$ от $\bar{\psi}_{ср.}$ равны $\epsilon_{ср.} = 10,7\%$, $\epsilon_{макс.} = 22,8\%$. Опираясь на данные таблицы 6 нельзя отметить наличия какой-либо выраженной взаимосвязи величин углов $\psi_{ср.}$ с факторами $H_{кр.}$, $\sum \eta_m$, α , $\sum m_{сп.}$, $\sum m_{кп.}$ что, от части, может объясняться малой размерностью сформированного массива данных. Прямая оценка влияния степени нагружения оставленных междукамерных целиков C осложнена различными значениями рассматриваемого показателя на отработываемых пластах. Для решения этой проблемы, параметр C уместно

рассмотреть, как один из основных факторов, определяющих интенсивность разрушения геомеханической системы и, как следствие, формирующих скорость развития процесса сдвижения $\dot{\eta}$ над рассматриваемым участком отработки запасов. Учитывая изложенное, для анализируемых профильных линий на рисунке 17 отражены скорости развития процесса сдвижения по данным первого из реперов, попадающих в границу плоского дна мульды.

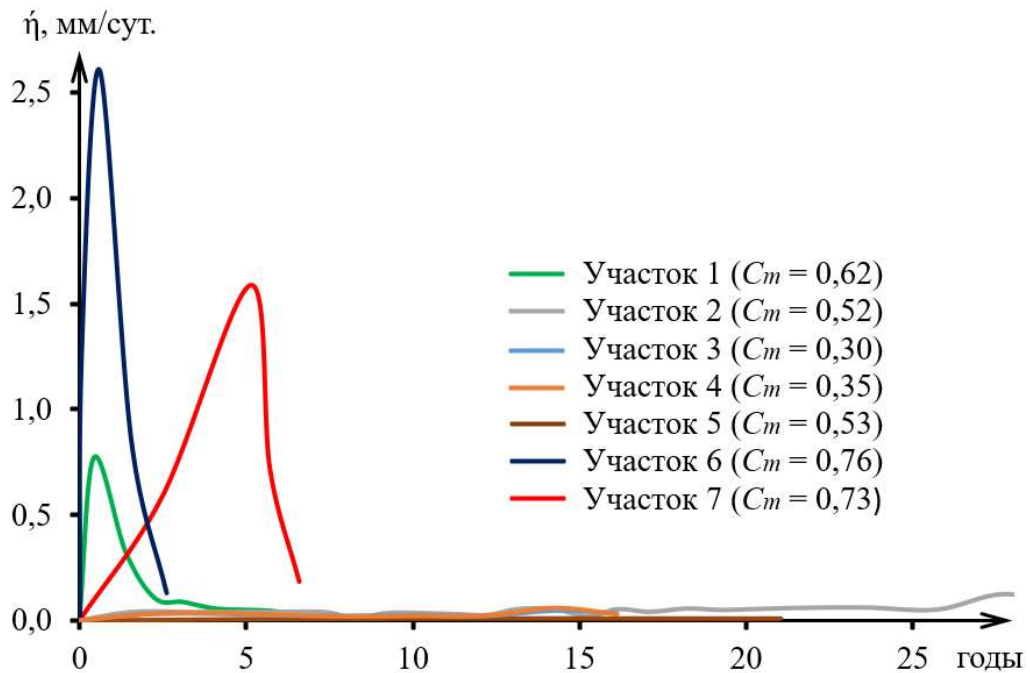


Рисунок 17 - Кривые скоростей оседаний над рассматриваемыми профильными линиями

Анализируя рисунок 17, можно заметить, что участки шахтных полей с наибольшими величинами рассчитанных углов полных сдвижений $\psi_{\text{ср.}}$, характеризуются высокими скоростями оседаний $\dot{\eta}$ и наличием активной стадии погашения пустот выработанного пространства в первые 5 лет с момента начала отработки запасов. Наименьшие величины углов $\psi_{\text{ср.}}$ характеризуются планомерным развитием процесса сдвижения без наличия активной стадии. Описанное свидетельствует о потенциальной возможности установления зависимости углов полных сдвижений ψ от наибольших показателей степени нагружения C_m среди пластов в анализируемых зонах. Поиск такой зависимости наиболее удобно выполнить на основе корреляционного поля показателей $\psi_{\text{ср.}}$ и C_m , которое отражено на рисунке 18.

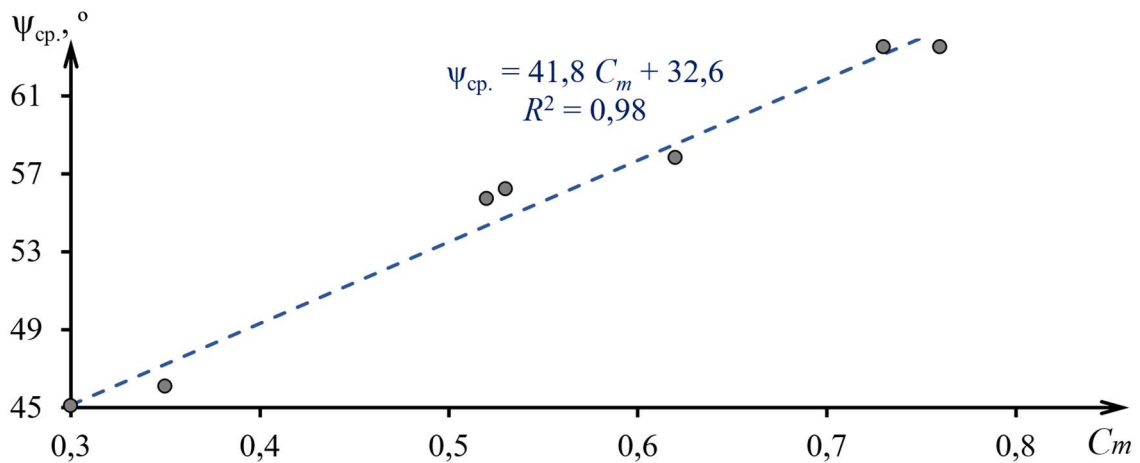


Рисунок 18 - Корреляционное поле показателей $\psi_{ср.}$ и C_m

Из рисунка 18 видно, что полученная зависимость углов полных сдвижений при $C_m \in [0,30;0,75]$ соответствует выражению $\psi = 41,8 C_m + 32,6$, которое характеризуется высоким коэффициентом детерминации $R^2 = 0,98$. Относительные ошибки отклонения фактических величин $\psi_{ср.}$ от расчётных значений $\psi_{расч.}$ составляют $\varepsilon_{ср.} = 1,5\%$, $\varepsilon_{макс.} = 2,6\%$. Сказанное позволяет считать полученную зависимость приемлемой для практического использования в границах обозначенного интервала, однако, принимая во внимание малую размерность исходного массива данных, формируется необходимость в последующих ее корректировках с учетом получения новых результатов инструментальных наблюдений над участками отработки запасов, соответствующих рассматриваемым условиям.

Для степеней нагружения соответствующих условиям $C_m < 0,30$ и $C_m > 0,75$ вследствие недостатка имеющихся данных, уместно временно ограничиться фиксированными значениями углов полных сдвижений $\psi = 45^\circ$ и $\psi = 64^\circ$ соответственно. Обозначенные величины нуждаются в уточнении после накопления необходимых данных.

Опираясь на вышеизложенное, можно скорректировать коэффициент χ , характеризующий условие полной подработки:

- $\chi > 2 \operatorname{ctg} 45^\circ = 2,00$ (при $C_m < 0,30$);
- $\chi \geq 2 \operatorname{ctg} (41,8 C_m + 32,6)$ (при $0,30 \leq C_m \leq 0,75$);
- $\chi > 2 \operatorname{ctg} 64^\circ = 0,97$ (при $C_m > 0,75$).

Исследование второй из вышеперечисленных геомеханических ситуаций, целесообразно начать с формирования представлений о механизме удлинения полумульды сдвижения за счет влияния зон, смежных с граничными. Сделать это наиболее удобно на примере рассмотрения простого случая, когда размеры геомеханически однородных зон или отдельной зоны, следующих/следующей за граничной, достаточны для минимизации стороннего влияния отработки на видимую границу плоского дна мульды. Результирующую полумульду сдвижения в этом случае удобно представить в виде двух составляющих:

- общая мульда сдвижения, образованная от минимального среди достигнутых оседаний $\eta_{min\ 1-2}$ над центральными частями рассматриваемых зон;
- дополнительная мульда сдвижения, образованная от разности достигнутых оседаний $\Delta\eta_{2-1}$ над центральными частями рассматриваемых зон.

Непрерывное суммирование парных значений оседаний, устанавливаемых по каждой из двух обозначенных составляющих мульд в точках пересечения их линией, параллельной оси абсцисс позволяет получить геометрию результирующей полумульды сдвижения. Наглядное представление изложенного отражено на рисунке 19.

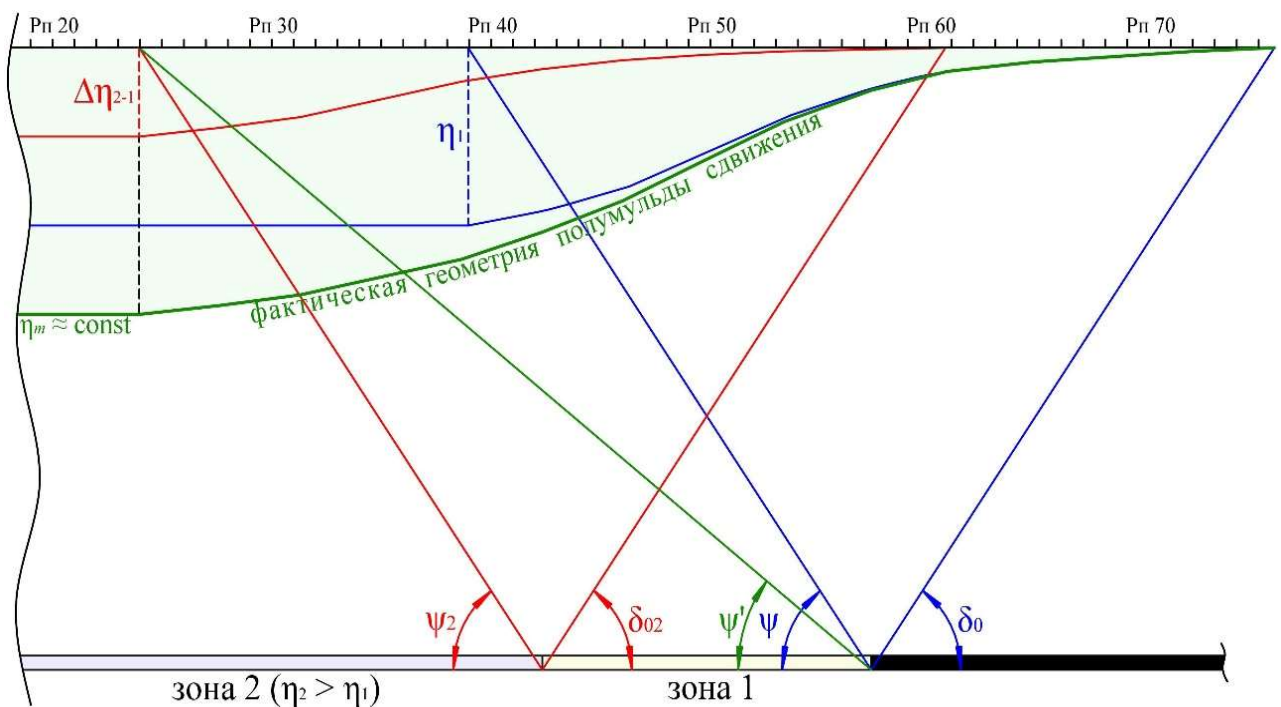


Рисунок 19 - Схематическое представление получения результирующей полумульды сдвижения из двух составляющих мульд

Из рисунка 19 видно, что удлинение полумульды сдвижения происходит вследствие наличия разности оседаний $\Delta\eta_{2-1}$ и формируемого влияния от этой величины. При обосновании уменьшения углов полных сдвижений ψ' , вследствие удлинения полумульды сдвижения, особую важность имеют вспомогательные углы ψ_2 , представляющие собой внутренние относительно рассматриваемого участка выработанного пространства углы, образованные плоскостью пласта и линией, проведенной от границы смежных участков, различающихся по геомеханическим параметрам отработки запасов до видимой границы плоского дна мульды сдвижения. Взаимосвязь углов ψ' и ψ_2 может быть охарактеризована простой зависимостью:

$$\psi' = \operatorname{arctg} \frac{H_{\text{гр.}}}{D_{\text{гр.з.}} + H_{\text{с.гр.}} \operatorname{ctg} \psi_2}, \quad \text{при } \psi_2 \in [\psi; 90^\circ) \quad (4.5)$$

где $H_{\text{гр.}}$ и $H_{\text{с.гр.}}$ – глубины разработки, соответствующие среднему расстоянию от земной поверхности до почвы нижнего отработанного пласта, соответственно, над граничной зоной и над смежным участком отработки запасов до границы плоского дна мульды, м;

$D_{\text{гр.з.}}$ – размеры граничной зоны в направлении, ортогональном к рассматриваемой постоянной границе выработанного пространства (обычно, около 200 м), м.

Нижняя и верхняя предельные величины угла ψ_2 , использованные в зависимости 4.5 нуждаются в последующем пересмотре и приняты первично на основании нижеприведенных рассуждений:

- Представим, что параметры отработки в 1 зоне обеспечивают настолько высокую устойчивость геомеханической системы, что достигнутые оседания над упомянутой зоной достаточно длительное время сохраняются на уровне, близком к нулю. Тогда, при условии $\eta_{2i} \gg \eta_{1i}$ граница между 1 и 2 зонами, по свойствам, будет приближена к постоянной и краевая часть мульды будет формироваться от зоны 2, т.е. сместится по направлению от постоянной границы выработанного

пространства в сторону подрабатываемого массива. В описанном случае, численному значению нижнего предела угла ψ_2 будет близко соответствовать ранее определенная величина угла полных сдвижений ψ ;

- Учитывая, что в рассматриваемой ситуации достигнутые над 1 и 2 зонами оседания должны соответствовать условию $\eta_{2i} > \eta_{1i}$, а также принимая во внимание то, что граница плоского дна мульды не может располагаться над зоной 1, характеризуемой меньшими величинами достигнутых оседаний, тогда, угол ψ_2 не может превышать значения 90° , которое и является его предполагаемой верхней предельной величиной.

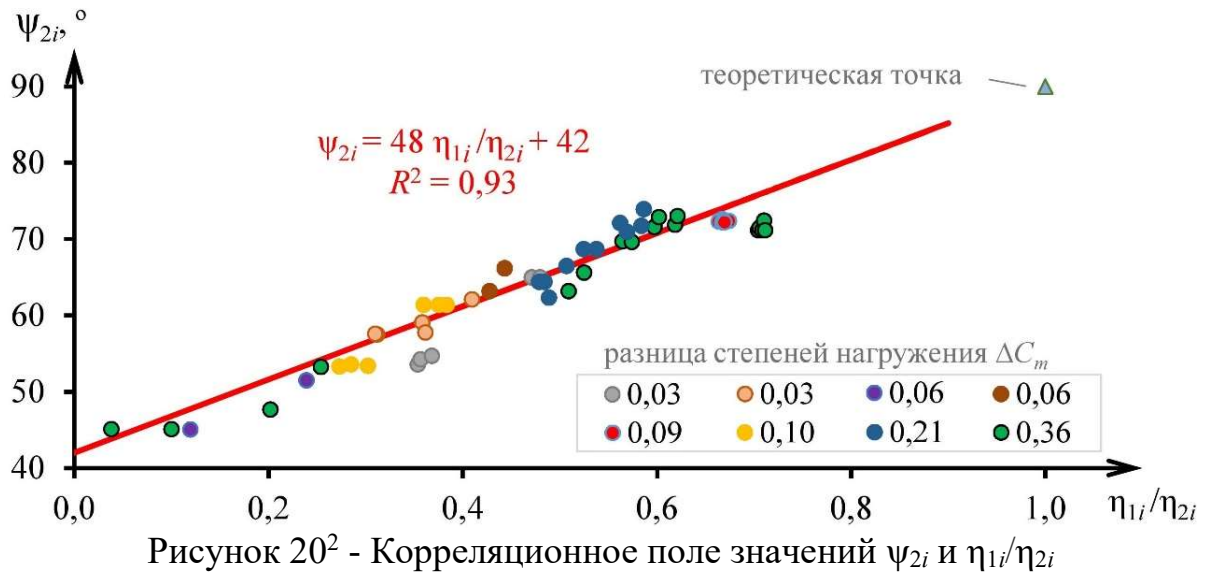
Дальнейшее исследование будет сводиться к установлению зависимости вспомогательных углов ψ_2 от возможных влияющих факторов, среди которых, в первую очередь, принята во внимание степень нагружения оставляемых междукамерных целиков C смежных зон. Рассуждая в направлении возможно влияния упомянутого показателя C , справедливо отметить, что в рассматриваемой ситуации важны не столько абсолютные его значения в каждой отдельной зоне, сколько разность ΔC в смежных зонах, характеризующая различия в интенсивности протекания процесса сдвижения над анализируемыми участками шахтных полей. Учитывая смысловую нагрузку формирования граничной зоны (зоны смягчения), уместно сделать вывод о потенциально невысоких значениях ΔC . Так, например, согласно требованиям нормативных документов [19, 109], в различных горно-геологических условиях отработки запасов допустимые величины степени нагружения $[C]$ в граничной зоне (зоне смягчения) варьируются от 0,30 до 0,40, а в смежной с ней зоне могут составлять от 0,30 до 0,50. Учитывая, что $C \rightarrow [C]$, тогда разность $\Delta C \in [0;0,2]$. Полученный диапазон возможных значений ΔC имеет высокую распространенность на практике, при этом на некоторых ранее отработанных участках шахтных полей рудников, особенно с применением податливых целиков в непосредственной близости от постоянной границы выработанного пространства, могут встречаться и гораздо большие разности ΔC . Последние нуждаются в анализе для выявления возможного влияния на формирование величин углов ψ_2 .

Реализацию вышеизложенного целесообразно начать с вычисления углов ψ_2 на различные даты инструментальных наблюдений. В рамках рассматриваемого случая, с целью некоторого расширения исходного массива данных, уместно также принять во внимание и наблюдения по отдельным участкам профильных линий над смежными зонами отработки запасов не имеющих непосредственного примыкания к постоянной границе выработанного пространства при условии наличия над одной из зон выраженного плоского дна. Учитывая сказанное, на шахтных полях рудников ВКМС были отобраны 7 подходящих локальных участков над которыми, с момента близкого к началу отработки запасов, проводились систематические инструментальные наблюдения за процессом сдвижения земной поверхности. Определение фактических величин углов ψ_{2i} на различные даты инструментальных наблюдений производилось из зависимости, аналогичной выражению 4.4:

$$\psi_{2i} = \operatorname{arctg} \frac{H_{c.гp.}}{z_{sti}}, \quad (4.6)$$

где z_{sti} – абсцисса границы плоского дна мульды на рассматриваемую дату наблюдений с началом отсчета от точки между граничной и смежной с ней зонами.

Произведенные расчеты показали выраженную тенденцию к изменению величин углов ψ_{2i} на различные даты инструментальных наблюдений. В такой ситуации прямая оценка влияния расчетной разности степеней нагружения ΔC_m не уместна, следовательно, необходимо использование другого подхода, позволяющего установить возможное влияние рассматриваемого показателя. Например, уместно сопоставить отдельные группы пар значений углов ψ_{2i} (соответствующие различным величинам разности степеней нагружения ΔC_m) и какого-либо высоко коррелируемого с ними фактора. В качестве последнего выделяется отношение оседаний η_{1i}/η_{2i} , достигнутых над рассматриваемыми смежными зонами на различные даты инструментальных наблюдений. Корреляционное поле вычисленных значений ψ_{2i} и η_{1i}/η_{2i} с цветовым обозначением отдельных групп, соответствующих различным величинам ΔC_m , представлено на рисунке 20.



Анализируя рисунок 20, справедливо отметить выраженную нелинейную сгруппированность данных, при этом отдельные группы значений углов ψ_{2i} (соответствующие различным величинам ΔC_m) выразенно не выделяются из общей тенденции распределения, что свидетельствует о малой значимости показателя ΔC_m для формирования величин углов ψ_{2i} . Оценивая полученное корреляционное поле в целом, можно заметить, что наиболее значимые изменения углов ψ_{2i} прослеживаются на интервале $\eta_{1i}/\eta_{2i} \in [0,2;0,6]$, а на остальной части оси абсцисс углы ψ_{2i} изменяются незначительно. В рассматриваемом случае, в качестве аппроксимирующей функции для переменной величины ψ_2 хорошо проходит линейная функция, представленная ниже:

$$\psi_2 = 48 \frac{\eta_{1i}}{\eta_{2i}} + 42, \text{ при } \eta_{1i} \leq \eta_{2i} \quad (4.7)$$

где η_{1i} и η_{2i} - оседания над рассматриваемыми смежными зонами, достигнутые на различные даты инструментальных наблюдений, м.

Выражение 4.7 характеризуется высоким коэффициентом детерминации $R^2 = 0,93$. Относительные ошибки отклонения фактических величин ψ_{2i} от расчётных значений ψ_2 составляют $\varepsilon_{\text{ср.}} = 3,0 \%$, $\varepsilon_{\text{макс.}} = 10,1\%$. Сказанное позволяет считать полученную зависимость 4.7 приемлемой для дальнейшего использования.

² Теоретическая точка добавлена на основании рассуждений о необходимости соответствия углов ψ' и ψ при равенстве η_{2i} и η_{1i}

Принимая во внимание то, что наименьшая расчетная величина угла ψ_2 из зависимости 4.7 равна 45° и должна соответствовать ранее определенной в выражении 4.5 области допустимых значений $\psi_2 \in [\psi; 90^\circ]$, можно сделать дополнительный вывод о правильности выбора наименьшего значения угла полных сдвижений $\psi = 45^\circ$ в условиях однородности строения геомеханической системы.

Далее, подставляя зависимость 4.7 в выражение 4.5 и заменяя обозначения отдельных переменных, получается:

$$\psi' = \operatorname{arctg} \frac{H_{\text{гр.}}}{D_{\text{гр.з.}} + H_{\text{с.гр.}} \operatorname{ctg} \left(48 \frac{\eta_{\text{гр.з.}i}}{\eta_{\text{с.гр.}i}} + 42 \right)}, \text{ при } \psi' < \psi \quad (4.8)$$

Очевидно, что величины углов ψ' , полученные из зависимости 4.8 не могут быть больше значений углов ψ . В случае, если $\psi' \geq \psi$ анализируемую геомеханическую систему из совокупности зон можно условно считать однородной и в качестве угла полных сдвижений использовать величину ψ .

При использовании выражения 4.8 важно учитывать, что получено оно на основании рассмотрения наиболее простого случая, когда размеры геомеханически однородных зон или отдельной зоны, следующих/следующей за граничной, достаточны для минимизации стороннего влияния отработки на видимую границу плоского дна мульды. Дальнейшее усложнение полученного выражения 4.8 путем учета ряда различных комбинаций геомеханических зон, следующих за граничной не целесообразно. Объясняется это, прежде всего, ограниченными потенциальными возможностями применяемой методики. Одним из наиболее простых способов, позволяющих учесть выраженную неоднородность строения геомеханической системы в совокупности зон, следующих за граничной, является усреднение параметров отработки запасов на участке, протяженностью $H_{\text{с.гр.}} \operatorname{ctg} 45^\circ = H_{\text{с.гр.}}$.

4.2.3 Обоснование величин углов максимальных оседаний

Исследование углов максимальных оседаний θ целесообразно начать с косвенного установления ранее используемых на практике их величин, поскольку в нормативной документации [19, 109] нет прямых данных по этому вопросу.

Расчет длины полумульды сдвижения в условиях напольной подработки выполняется из зависимости 1.44, тогда с учетом выражения 1.43 можно записать:

$$L = H(\operatorname{ctg} \delta_0 + \operatorname{ctg} \psi_0) = H(\operatorname{ctg} \delta_0 + 0,5D/H) = 0,5D + H \operatorname{ctg} \delta_0 \quad (4.9)$$

Аналогичный расчет длины полумульды сдвижения с использованием угла θ вместо ψ_0 , может быть представлен зависимостью 2.1. Соответствие выражений 4.9 и 2.1 будет наблюдаться лишь в случае, когда $\operatorname{ctg} \theta = 0$, т.е. при $\theta = 90^\circ$. Таким образом, можно утверждать, что в настоящее время расчёт длины полумульды сдвижения L в условиях неполной подработки базируется на величине угла максимальных оседаний θ , равном 90° .

Нет основания предполагать, что значение угла θ будет значительно отличаться от вышеопределенной величины 90° в наиболее простом случае, когда геомеханически однородный участок неполной подработки характеризуется пологостью, равными глубинами залегания свиты промышленных пластов и располагается между двумя постоянными границами выработанного пространства. Объясняется сказанное прежде всего тем, что место локализации наиболее высокого горного давления и, как следствие, более интенсивного погашения пустот выработанного пространства будет приходиться на центральную часть упомянутого участка отработки запасов.

Вышеописанное нельзя считать справедливым для ряда реальных условий. Так, например, при выраженной неоднородности строения геомеханической системы и/или наличии влияния со стороны смежной отработки, а также при возможном присутствии участков локального повышения горного давления и/или снижения несущей способности междукамерных целиков, местоположение

области наиболее интенсивного разрушения сформированной геомеханической системы может не совпадать с центральной частью анализируемой площади неполной подработки. Описанное, в сочетании с относительно низкой интенсивностью развития процесса сдвижения, характерной для большинства отработанных на ВКМС площадей, способствует формированию предпосылок для отклонения значений угла θ от 90° .

Проверку вышеизложенного целесообразно выполнить на основании анализа фактических величин углов максимальных оседаний θ в условиях отработки запасов рассматриваемого месторождения. Для этого на шахтных полях рудников ВКМС отобраны 7 локальных участков неполной подработки, над которыми велись систематические инструментальные наблюдения за сдвижением земной поверхности с момента, близкого к началу отработки запасов. Определение фактических величин углов θ на различные даты инструментальных наблюдений производилось из зависимости:

$$\theta_i = \operatorname{arctg} \frac{H_i}{z_{(\eta_m)i}}, \quad (4.10)$$

где H_i – глубина разработки в центральной части анализируемого локального участка отработки запасов, соответствующая расстоянию от земной поверхности до почвы нижнего отработанного пласта, м;

$z_{(\eta_m)i}$ – абсцисса точки максимального оседания η_m , определяемая по сглаженной кривой на рассматриваемую дату наблюдения с началом отсчета от центральной части анализируемого участка отработки запасов, м.

Выполненные расчеты показали выраженное постоянство во времени фактических углов θ_i на каждой из рассмотренных наблюдательных станций, что является основанием для возможности определения обобщенных их значений $\theta_{\text{ср.}}$ над анализируемыми участками отработки запасов. Величины углов $\theta_{\text{ср.}}$ лежат в диапазоне от $94,5^\circ$ до $97,7^\circ$, а их среднее $\bar{\theta}_{\text{ср.}}$ составляет $95,6^\circ$. Относительные ошибки отклонения величин $\theta_{\text{ср.}}$ от $\bar{\theta}_{\text{ср.}}$ достаточно малы и равны $\varepsilon_{\text{ср.}} = 1,0\%$, $\varepsilon_{\text{макс.}} = 2,1\%$.

Поиск факторов, способствующих отклонениям фактических местоположений точек максимальных достигнутых оседаний от центральных частей рассмотренных участков не привел к получению однозначных результатов. В каждом конкретном из рассмотренных случаев наиболее вероятными причинами упомянутых отклонений выступали различные обстоятельства, среди которых можно выделить такие, как неоднородность геомеханической системы, различия в сроках отработки запасов и закладки выработанного пространства на рассматриваемом и смежных участках отработки, а также наличие локальных областей наибольших глубин. Граница дна мульды сдвижения во всех рассмотренных случаях смещалась в сторону локализации вышеупомянутых факторов. Опираясь на изложенное и принимая во внимание незначительный разброс величин вычисленных углов $\theta_{ср.}$, а также малость исходного массива данных, можно сделать вывод о том, что в сложившейся ситуации установление степени влияния каждого отдельного из обозначенных факторов не уместно. Для практического использования, при наличии факторов, потенциально способствующих отклонению границы дна мульды сдвижения, наиболее целесообразно ограничиться вышеприведенным средним значением угла θ , равным $95,6^\circ$.

4.3 Углы сдвижения

В разделе 1.3.3 настоящей работы было замечено, что применяемый в настоящее время подход для построения предохранительных целиков под охраняемые поверхностные объекты, в некотором смысле, противоречит смысловой нагрузке используемых граничных углов δ_0 . Упомянутой задаче наибольшим образом соответствует практическое назначение углов сдвижения δ , что и обуславливает целесообразность возврата к их использованию.

Очевидно, что местоположение точки с опасными (критическими) значениями деформаций имеет тесную связь с геометрией полумульды сдвижения, а точнее с ее формой и размерами. Оба параметра, в условиях отработки запасов рассматриваемого месторождения, характеризуются непостоянством. Сказанное, в сочетании с наблюдаемыми выраженными различиями в фактических величинах углов δ , позволяет сделать вывод о потенциальной нестационарности местоположения границы зоны опасных сдвижений. В этом случае, к главному недостатку построения предохранительных целиков по существующим фиксированным значениям углов δ_0 будут относиться повышенные потери полезного ископаемого. Так, например, использование угла сдвижения меньше оптимально достаточного на 1° , при средней глубине разработки 350 м сопровождается повышением потерь площади запасов на величину около 8 тыс. м², приходящуюся на 1 погонный км отстраиваемой границы.

Вышеизложенное свидетельствует о целесообразности стремления к соблюдению некоего баланса между безопасностью подрабатываемых объектов и минимизацией потерь полезного ископаемого. Отмеченный баланс является основной смысловой составляющей ранее используемой на практике методики определения угла δ , предложенной Нестеровым М.П. На основании зависимости 1.34 можно сделать вывод о наибольшей значимости для достоверности определения угла $\delta(t_i)$ величин углов δ_0 и ψ , а также функций безразмерных распределений наклонов $S'(z)$, кривизны $S''(z)$ и горизонтальных деформаций $F'(z)$ в различных горно-геологических условиях отработки запасов. Отмеченные функции $S'(z)$ и $S''(z)$ являются, соответственно, первой и второй производными от безразмерной кривой оседаний $S(z)$, а функция $F'(z)$ является первой производной от безразмерной кривой горизонтальных смещений $F(z)$. Численные значения базовых функций $S(z)$ и $F(z)$ определяются на основании результатов инструментальных наблюдений по профильным линиям грунтовых реперов на земной поверхности.

Анализируя ранее применяющиеся и используемые в настоящее время на практике функции безразмерных распределений $S(z)$, $S'(z)$, $S''(z)$, $F(z)$, $F'(z)$ важно

отметить отсутствие в «Указаниях» информации о значениях двух последних кривых. При этом, в основе расчета ожидаемых горизонтальных деформаций $\varepsilon(z)$ лежит функция кривизны $K(z)$, корректируемая коэффициентом перехода от $K(z)$ к $\varepsilon(z)$. Отмеченное обстоятельство можно связать с довольно малым количеством профильных линий со своевременными систематическими инструментальными наблюдениями за горизонтальным сдвижением грунтовых реперов.

Первые типовые функции $S(z)$, $S'(z)$, $S''(z)$ регламентированы «Указаниями» 1976 года и делились на две группы по степени нагружения C оставляемых при отработке запасов междукамерных целиков. В «Указаниях» 1984 года в качестве дополнительного классификационного фактора введен показатель степени заполнения камер закладочным материалом A . Последующими версиями нормативного документа с 1994 г. по 2004 г. регламентируется многообразие типовых функций в зависимости от ряда влияющих факторов, к которым, помимо вышеперечисленных, добавлено отношение достигнутого оседания земной поверхности на заданный момент времени η_i к максимальному расчетному на конец процесса сдвижения η_m . В «Указаниях» 2008 года ранее использовавшаяся система типовых функций была упразднена и приведен единственный вариант, применимый для отработки сильвинитовых пластов и пластов каменной соли со степенями нагружения $C \leq 0,4$, а также карналлитовых пластов с закладкой $A > 0,75$. Для остальных случаев, значения функций $S(z)$, $S'(z)$, $S''(z)$ регламентировано устанавливать на основании данных инструментальных наблюдений с привлечением, при необходимости, специализированных научных организаций. В последних версиях «Указаний» 2014 г. и 2022 г. также приведен единственный вариант типовых функций для условий отработки запасов, регламентируемых этими нормативными документами (сильвинитовые пласты при $C \leq 0,55$, пласты каменной соли при $C \leq 0,30$, карналлитовые пласты при $C \leq 0,3$ и $A > 0,80$).

Дополнить сказанное уместно замечанием о близости геометрии применяемых в настоящее время на практике функций $S(z)$, $S'(z)$ и $S''(z)$ с некоторыми отдельными кривыми, регламентированными более ранними версиями нормативной документации, например, «Указаниями» 1976 года (при

степени нагружения междукамерных целиков сильвинитовых пластов $C \leq 0,4$), «Указаниями» 1984 года (при условии закладки пустот выработанного пространства сильвинитовых пластов с коэффициентом $A \geq 0,75$), «Указаниями», изданными за период с 1994 года по 2008 год (при степени нагружения междукамерных целиков сильвинитовых пластов $C \leq 0,4$, а также при условии закладки пустот выработанного пространства карналлитовых пластов с коэффициентом $A \geq 0,75$).

Для наглядного отражения вышеизложенного, на рисунке 21 представлено сравнительное сопоставление применявшихся на ВКМС за период с 1976 г. по настоящее время безразмерных распределений кривых $S(z)$, $S'(z)$ и $S''(z)$.

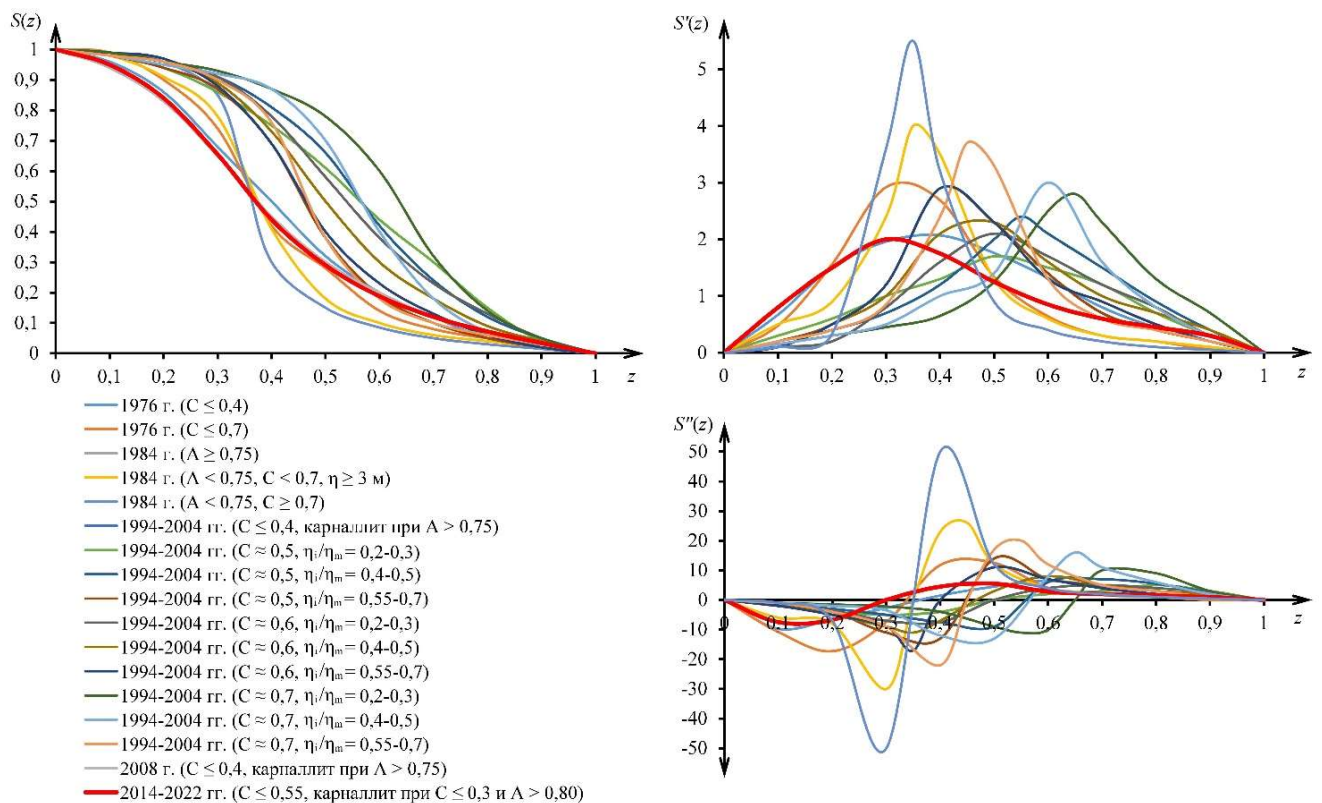


Рисунок 21 - Сравнительное сопоставление функций $S(z)$, $S'(z)$ и $S''(z)$ применявшихся на ВКМС за период с 1976 г. по настоящее время

Рассматривая рисунок 21, можно отметить выраженную изменчивость функций $S(z)$, $S'(z)$ и $S''(z)$ для различных условий отработки запасов и стадий развития процесса сдвижения. Местоположения и абсолютные значения положительных экстремумов функций $S'(z)$ и $S''(z)$, имеющих особую важность в вопросе исследования углов сдвижения δ , также характеризуются выраженным

непостоянством в сочетании с отсутствием информации о положении постоянной границы выработанного пространства. Сказанное, в дополнении с полученными результатами исследования граничных углов δ_0 , углов полных сдвижений ψ и максимальных оседаний θ определяет необходимость разработки актуализированной методики расчета углов сдвижения δ_i на рассматриваемый момент времени. Существенным упрощающим обстоятельством в рассматриваемом вопросе является возможность лишь локального исследования распределений $S'(z)$, $S''(z)$ и $F'(z)$ в области сдвижения над нетронутым массивом.

4.3.1 Исследование особенностей формирования краевой части мульды сдвижения в условиях полной подработки земной поверхности

На начальном этапе исследования углов δ важно развить правильные представления о механизме формирования полумульды сдвижения при полной подработке земной поверхности в условиях отработки запасов на ВКМС. Учитывая сложность проведения прямых исследований по изучению деформирования породной толщи в результате ее подработки, несложно прийти к выводу о том, что характер перемещения слоев массива может быть определен лишь при рассмотрении качественных характеристик его физических или численных моделей, а также на основании теоретических представлений, согласованных как с ранее накопленным опытом по исследуемой тематике, так и с результатами проводимых инструментальных наблюдений за процессом сдвижения земной поверхности. Ни один из вышеотмеченных способов исследования нельзя считать более приоритетным по сравнению с остальными, т.к. все они основываются на ряде неизбежно принимаемых допущений и упрощений относительно фактических процессов, протекающих в реальном породном массиве после его подработки. В рамках текущего раздела настоящей работы механизм формирования полумульды сдвижения будет рассмотрен на основании существующих теоретических

представлений об особенностях деформирования подрабатываемой породной толщи.

На основании анализа работ [27, 34, 69, 110-116 и др.] можно сделать вывод о том, что характер сдвижения породного массива не обладает свойством универсальности и может в значительной степени отличаться на отдельных месторождениях. Среди основных факторов, формирующих вышеупомянутые возможные отличия, особенно выделяются такие как способ отработки запасов, особенности залегания пород толщи и полезного ископаемого в сочетании с их физико-механическими свойствами. Принимая во внимание то, что в условиях ВКМС подрабатываемый массив представляет собой ряд чередующихся разнопородных слоев относительно невысокой крепости, а также учитывая пологость залегания свиты промышленных пластов, для дальнейшего рассмотрения уместно принять во внимание наиболее простую модель деформирования породной толщи, которая, применительно к условию полной подработки земной поверхности, наглядно отражена на рисунке 22. Из него видно, что сдвижение слоев массива происходит в виде распространяющегося от границы зоны обрушения [34] в сторону земной поверхности последовательного их прогиба на интервалах, заключенных между некими условными поверхностями характерных смещений. Контур последних в разрезе породного массива (ортогональном к постоянной границе выработанного пространства) близок к линиям, образуемым при построении углов полных сдвижений ψ и граничных углов δ_0 . По мере удаления от выработанного пространства геометрия кривой прогиба слоев массива претерпевает последовательную трансформацию и, в конечном результате, проявляется на земной поверхности в виде полумульды сдвижения.

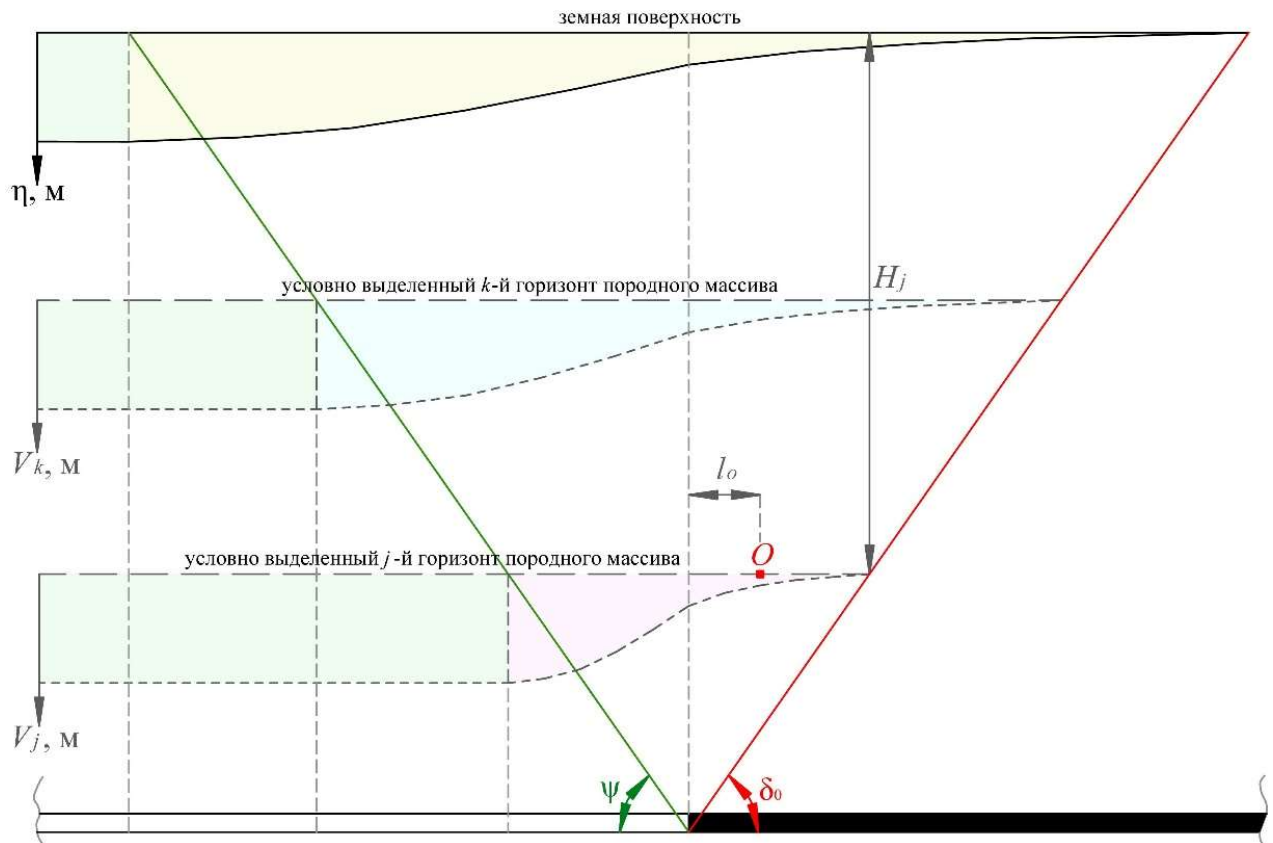


Рисунок 22 - Модель формирования краевой части мульды сдвижения при полной подработке земной поверхности

Для полноты понимания особенностей формирования полумульды сдвижения в условиях рассматриваемого месторождения важно оценить характер перемещения грунтовых реперов во времени в ее разрезе. Реализация сказанного осложнена малочисленностью профильных линий со своевременными систематическими инструментальными наблюдениями за горизонтальными (в сочетании с вертикальными) смещениями грунтовых реперов - удалось отобразить лишь четыре подходящие наблюдательные станции над участками сдвижения с полной подработкой земной поверхности. Последующая обработка результатов инструментальных наблюдений производилась нижеследующим образом.

В качестве вертикальной составляющей перемещения реперов использовалось их оседание $\eta_{\text{рп.}i}^{t_k}$ на рассматриваемую дату инструментальных наблюдений. Вычисление горизонтальной составляющей перемещений реперов профильной линии производилось с использованием зависимости:

$$\xi_{\text{Рп.}i}^{t_k} = \sum_{i=\text{Рп.Оп.}}^{i=\text{Рп.}i} l_i^{t_k} - \sum_{i=\text{Рп.Оп.}}^{i=\text{Рп.}i} l_i^{t_0}, \quad (4.11)$$

где $\sum_{i=\text{Рп.Оп.}}^{i=\text{Рп.}i} l_i^{t_k}$ – сумма проекций (на линию, ортогональную к рассматриваемой постоянной границе выработанного пространства) измеренных в k -м году длин интервалов, заключенных между ближайшим к границе выработанного пространства опорным репером и произвольным рассматриваемым i -м репером, м;

$\sum_{i=\text{Рп.Оп.}}^{i=\text{Рп.}i} l_i^{t_0}$ – сумма проекций (на линию, ортогональную к рассматриваемой постоянной границе выработанного пространства) первоначально измеренных длин интервалов, заключенных между ближайшим к границе выработанного пространства опорным репером и произвольным рассматриваемым i -м репером, м.

Вследствие некоторого отличия в датах наблюдений высотных отметок реперов и длин интервалов, полученные результаты вычисления $\eta_{\text{Рп.}i}^{t_k}$ или $\xi_{\text{Рп.}i}^{t_k}$ путем линейной интерполяции приведены к общим датам наблюдений.

Для численного выражения отклонения траектории смещения каждого репера от вертикали использованы углы $\tau_{\text{Рп.}i}^{t_k}$:

$$\tau_{\text{Рп.}i}^{t_k} = \text{arctg} \frac{\xi_{\text{Рп.}i}^{t_k}}{\eta_{\text{Рп.}i}^{t_k}}, \quad (4.12)$$

где $\eta_{\text{Рп.}i}^{t_k}$ – оседание i -го репера на рассматриваемую k -ю дату наблюдений, мм;

$\xi_{\text{Рп.}i}^{t_k}$ – горизонтальное смещение i -го репера на рассматриваемую k -ю дату наблюдений, мм.

Пример результата обработки данных по одной из рассмотренных наблюдательных станций представлен на рисунке 23.

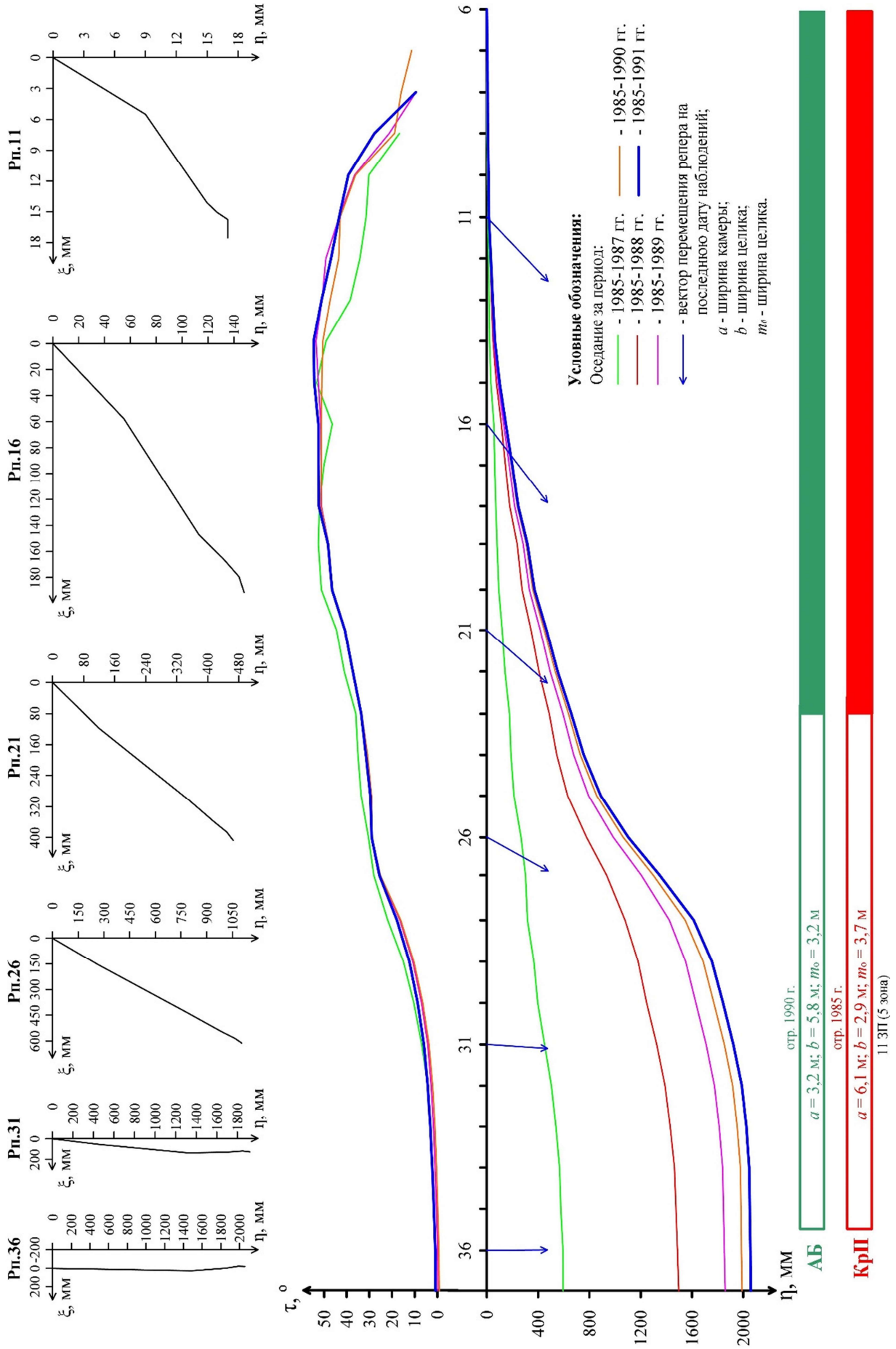


Рисунок 23 - Характер перемещения реперов при развитии процесса сдвижения на примере одной из рассмотренных профильных линий

Как видно из рисунка 23, направления перемещения реперов изменяются вдоль плоскости разреза сдвижения земной поверхности, при этом минимальные значения углов τ наблюдаются в области плоского дна мульды, а максимальные локализуются над нетронутым массивом. Аналогичная ситуация наблюдается на каждом из рассмотренных участков профильных линий и в целом согласуется с общими представлениями о направлениях перемещения реперов, ранее изложенными в работах [27, 69, 113 и др.].

Дополнить представленную информацию уместно комплексным сравнительным сопоставлением вида кривых вертикальных η и горизонтальных ξ сдвижений в сочетании с рассчитываемыми на их основе кривыми наклонов i , кривизны K , горизонтальных деформаций ε и углов τ . Сделать это наиболее удобно после преобразования отмеченных кривых в безразмерный вид, соответствующий функциям $S(z)$, $S'(z)$, $S''(z)$, $F(z)$, $F'(z)$ и $T(z)$. Пример полученного результата представлен на рисунке 24 из которого видно следующее:

- геометрия кривых $S(z)$ и их производные $S'(z)$, $S''(z)$ изменяются по мере развития процесса сдвижения, при этом, наименее существенные изменения прослеживаются в области сдвижения над нетронутым массивом;

- экстремумы функций $S'(z)$ располагаются над выработанным пространством, при этом, их местоположение по мере роста величины максимального достигнутого оседания изменяется не значительно (исключение составляет начальный этап развития процесса сдвижения, характеризуемый наибольшими погрешностями определения исходной функции $S(z)$);

- местоположение положительных экстремумов функций $S''(z)$ также изменяется не значительно по мере роста величины максимального достигнутого оседания (за исключением начального этапа развития процесса сдвижения). В целом наблюдается некоторая близость (с возможными небольшими отклонениями в одну из сторон) местоположений положительных экстремумов функций $S''(z)$ с границей выработанного пространства;

- наблюдается некоторая визуальная схожесть осредненных по рассмотренным наблюдательным станциям кривых $S'(z)$ и $F(z)$, $S''(z)$ и $F'(z)$, что

нашло применение в существующей методике [19] расчёта горизонтальных деформаций ϵ на основе кривизны K . Абсциссы положительных экстремумов кривых $F(z)$ и $F'(z)$, в отличие от $S'(z)$ и $S''(z)$, не подвержены значительным отклонениям на начальной стадии развития процесса сдвижения;

- кривые $T(z)$ имеют схожий вид и изменяются от нуля (в области плоского дна мульды) до значения близкого к 0,2 (у границы мульды). Абсциссы максимума кривых $T(z)$ располагаются над нетронутым массивом и не имеют видимой взаимосвязи с местоположением абсцисс положительных экстремумов функций $S'(z)$, $S''(z)$, $F(z)$ и $F'(z)$.

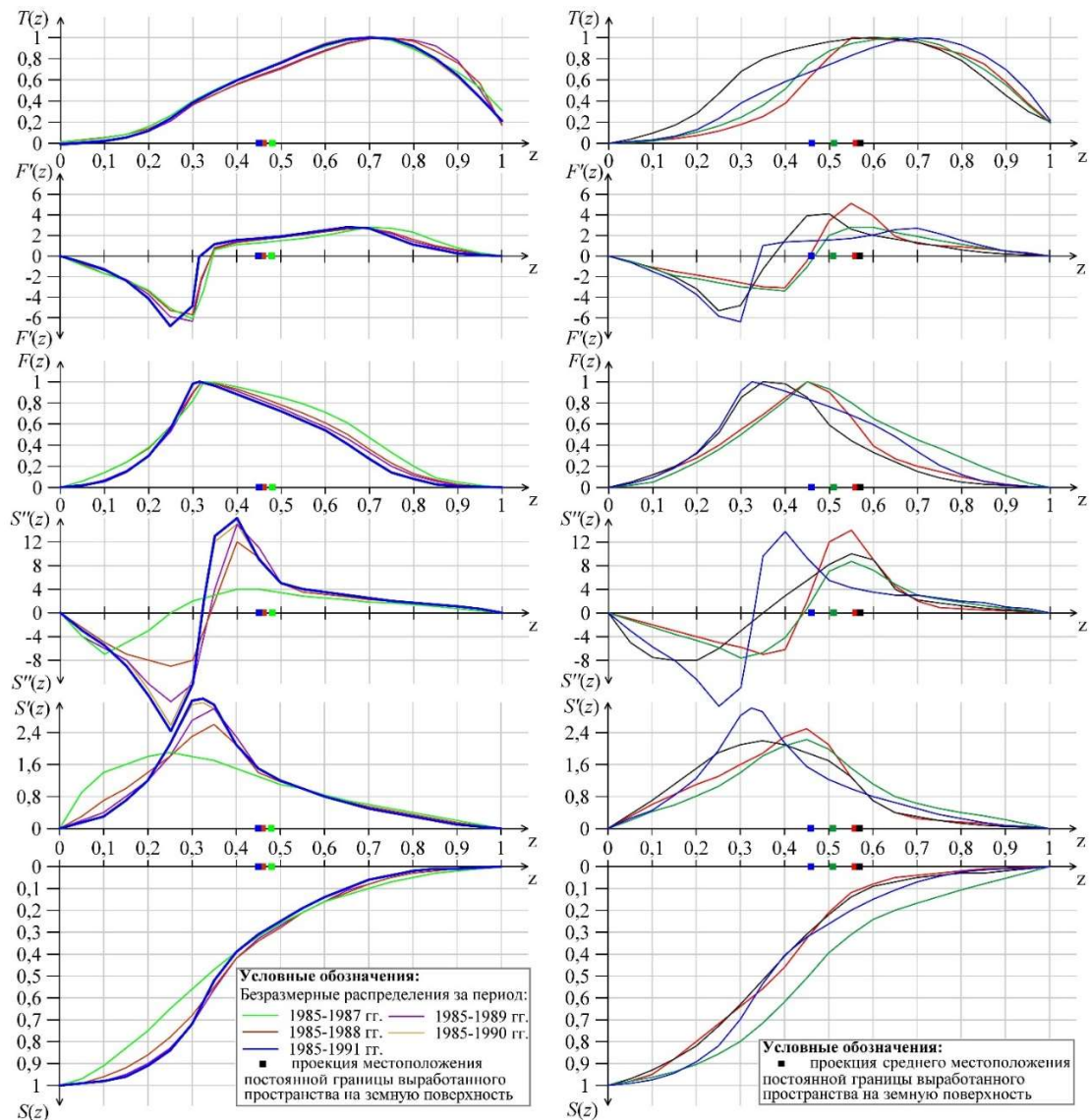


Рисунок 24 - Функции $S(z)$, $S'(z)$, $S''(z)$, $F(z)$, $F'(z)$ и $T(z)$, рассчитанные на различные даты наблюдений для представленной на рисунке 23 профильной линии (левая часть графиков) и осредненные для каждой из рассмотренных наблюдательных станций (правая часть графиков)

При рассмотрении рисунка 24 важно учитывать, что достигнутые максимальные горизонтальные сдвигения ξ_{mi} кратно меньше достигнутых максимальных оседаний η_{mi} . Принимая во внимание отношение величин ξ_{mi} и η_{mi} справедливо отметить выраженную его стационарность на каждой из рассмотренных наблюдательных станций (абсолютные отклонения от среднего до 0,02), при этом, вычисленные средние значения упомянутого отношения находится в довольно широком диапазоне от 0,13 до 0,31. Сказанное, вероятно, является следствием различия скоростей оседаний, состава, мощности и характера залегания верхних слоев породного массива [27], однако достоверно подтвердить это нельзя по причине малочисленности принятых во внимание наблюдательных станций. При отсутствии результатов измерений длин интервалов между заложенными реперами профильной линии возможна лишь приблизительная (грубая) оценка величины ξ_{mi} , на основании величины η_{mi} и кривой $S(z)$, суть которой в следующем: кривые $T(z)$ на рисунке 24 наглядно демонстрируют наличие точки в которой при развитии процесса сдвижения наблюдается паритет между приращением достигнутых оседаний и горизонтальных смещений, а средняя абсцисса такой точки составляет $z = 0,65$, далее учитывая, что среднее значение функций $F(z=0,65)$ составляет 0,39, можно записать выражение:

$$\xi_{mi} \approx 2,56 \eta_{mi} S(z = 0,65), \quad (4.13)$$

где η_{mi} – наибольшее достигнутое оседание в полумульде сдвижения, м;

$S(z=0,65)$ – значение функции безразмерного распределения оседания в точке с абсциссой $z = 0,65$.

При использовании зависимости 4.13 важно учитывать, что получена она на основании обработки данных по участкам шахтных полей, характеризующихся максимальной степенью нагружения C_m среди пластов в выемочных зонах между постоянной границей выработанного пространства и границей плоского дна мульды, превышающей значение 0,48. В этом случае особый практический интерес представляет исследование параметра ξ_{mi} в условиях оставления «жестких» ($C_m \leq$

0,4) междукамерных целиков, деформирующихся в режиме затухающей ползучести.

Еще одним немаловажным фактором, на который стоит обратить внимание, является относительно небольшая фактическая площадь $S_{п.г.}$ участка полумульды, приходящегося на область сдвижения над нетронутым массивом. По рассмотренным наблюдательным станциям, в среднем, показатель $S_{п.г.}$ составляет 11% от общей площади полумульды сдвижения $S_{п.м.}$, что довольно мало и свидетельствует о незначительном переносе объемов погашенных пустот выработанного пространства в рассматриваемую область сдвижения.

Обобщая все вышеизложенное, можно сделать вывод о том, что развитие процесса сдвижения над нетронутым массивом имеет выраженные характерные особенности и несколько отличается от остальной части полумульды сдвижения. Очевидно, что механизм перемещения пород в рассматриваемой области сдвижения имеет тесную взаимосвязь с большим числом влияющих факторов, среди которых наиболее сильно выделяются такие как объем сформированных пустот выработанного пространства и интенсивность его погашения, количество отрабатываемых пластов, глубина разработки, геологические особенности строения породной толщи в сочетании с физико-механическими свойствами слагающих ее пород. При этом ФМС определяют модель поведения пород (упругое, вязкое, пластическое деформирование, ползучесть, течение материала в теле и пр.), а их влияние наиболее выражено при относительно простом строении подрабатываемого массива, прослеживающегося и на ВКМС.

Рассуждая в направлении обоснования величин углов сдвижения δ_i на заданный момент времени несложно прийти к выводу о возможности их определения не только из результатов инструментальных наблюдений за развитием процесса сдвижения, но и на основании теоретических методов исследования, а также методов численного и физического моделирования. При этом, несмотря на малочисленность профильных линий со своевременными систематическими измерениями длин интервалов между заложенными грунтовыми реперами, можно утверждать, что вывод объективных закономерностей, позволяющих оценить

величины δ_i над различными участками отработки запасов возможен лишь на основании результатов инструментальных наблюдений. Сказанное определяет высокую приоритетность выбора в рамках настоящей работы эмпирического метода исследования. В качестве дополнительного метода выбраны теоретические исследования, дополненные учетом результатов обработки данных натурных инструментальных наблюдений за развитием процесса сдвижения. Далее будет выполнено подробное рассмотрение и сравнительное сопоставление двух отмеченных способов определения угла δ_i .

4.3.2 Определение углов сдвижения в условиях полной подработки земной поверхности на основании «теоретико-эмпирического» подхода

Рассматривая вопрос вывода аналитических зависимостей, позволяющих оценить величины углов сдвижения δ_i на локальном участке шахтного поля на заданный момент времени несложно прийти к выводу о высокой сложности, а порой и невозможности получения точного их вида на основании теоретических методов исследования процесса сдвижения. Совокупность таких факторов, как сложность геометрии массива, неоднородность свойств слагающих его пород, нелинейное их поведение, ограничения математических моделей, требующих идеализации, временная динамика процессов и пр. вынуждают использовать упрощения и эмпирические поправки, позволяющие получить лишь приближенные решения. Один из возможных наиболее простых вариантов таких приближенных решений для условий ВКМС рассмотрен ниже.

Для простоты дальнейших рассуждений, в первую очередь, целесообразно ввести упрощающее допущение относительно модели подрабатываемого породного массива на ВКМС, представив ее в виде чередующихся изотропных горизонтально залегающих породных слоев выдержанной мощности с осредненными физико-механическими свойствами. Формирование области

сдвижения над нетронутым массивом, в первом приближении, удобно представить следствием развития деформаций упругого расширения пород после приложения растягивающих напряжений, вызванных развитием оседания (прогиба) над участком отработки запасов полезного ископаемого. Вывод простой аналитической зависимости, позволяющей оценить приблизительную величину оседания (прогиба) над произвольной точкой рассматриваемой области сдвижения уместно начать с рассмотрения напряженного состояния элементарного, бесконечно малого объема кубической формы, выделенного в точке O на глубине H_j (см. рис. 22), учитывая при этом, что оси z (вертикальное направление) и y (горизонтальное направление) расположены в плоскости разреза краевой части мульды сдвижения, а ось x направлена к ней ортогонально.

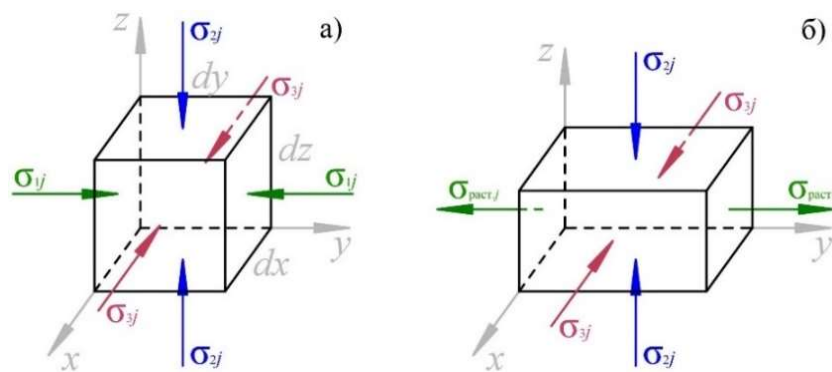


Рисунок 25 - Напряженное состояние в точке O породного массива до а) и после б) отработки запасов полезного ископаемого

Принимая во внимание низкую актуальность для условий рассматриваемого месторождения гидродинамических и геотермических силовых полей, а также предполагая малость тектонических напряжений, можно сделать вывод о формировании природного напряженно-деформированного состояния массива преимущественно за счет гравитационного силового поля. В условиях равновесия (рис. 25а)), касательные напряжения τ в элементарном кубике точки O будут отсутствовать и напряженное состояние пород будет характеризоваться лишь главными нормальными напряжениями σ_{1j} , σ_{2j} и σ_{3j} , приблизительные значения которых можно определить из следующих зависимостей:

$$\sigma_{2j} \approx \gamma_{\text{ср.}} H_j^3, \quad (4.14)$$

$$\sigma_{1j} \approx \sigma_{3j} \approx \frac{\sigma_{2j} \nu_{\text{ср.}}}{1 - \nu_{\text{ср.}}} \approx \frac{\nu_{\text{ср.}} \gamma_{\text{ср.}} H_j}{1 - \nu_{\text{ср.}}}, \quad (4.15)$$

где $\gamma_{\text{ср.}}$ – средний объемный вес налегающей толщии пород массива, принимаемый на основании [19] равным $2200 \text{ кг/м}^3 \cdot 9,81 \text{ Н/кг} = 21582 \text{ Н/м}^3$;

H_j – расстояние от земной поверхности до рассматриваемой точки породного массива, лежащей на j -м условно выделенном горизонте, м;

$\nu_{\text{ср.}}$ – средневзвешенный коэффициент Пуассона для пород на рассматриваемом участке шахтного поля.

После отработки запасов происходит перераспределение начального поля напряжений в массиве. В этом случае развитие процесса сдвижения над участком отработки запасов полезного ископаемого будет способствовать появлению растягивающих напряжений $\sigma_{\text{раст.}i}$ вместо изначальных сжимающих σ_{1i} . При этом, в рамках решаемой задачи, возникающие касательные напряжения τ на гранях рассматриваемого кубика при его деформировании, будем считать пренебрежимо малыми, а изменение начальных нормальных напряжений σ_{2i} и σ_{3i} несущественными. Тогда, на основе обобщенного закона Гука [119-120] применительно к условиям рисунка 25б) можно записать следующие выражения:

$$d\varepsilon_{zi} = \frac{1}{E_{\text{ср.}}} [\sigma_{2j} + \nu_{\text{ср.}} (\sigma_{\text{раст.}j} - \sigma_{3j})] = \frac{\gamma_{\text{ср.}} H_j}{E_{\text{ср.}}} \left(1 - \frac{\nu_{\text{ср.}}^2}{1 - \nu_{\text{ср.}}} \right) + \frac{\nu_{\text{ср.}} \sigma_{\text{раст.}j}}{E_{\text{ср.}}} = \frac{\Delta dH_j}{dH_j} \Rightarrow^4$$

$$\Rightarrow \Delta dH_j = \frac{\gamma_{\text{ср.}} H_j}{E_{\text{ср.}}} \left(1 - \frac{\nu_{\text{ср.}}^2}{1 - \nu_{\text{ср.}}} \right) dH_j + \frac{\nu_{\text{ср.}} \sigma_{\text{раст.}j}}{E_{\text{ср.}}} dH_j, \quad (4.16)$$

$$d\varepsilon_{yi} = \frac{1}{E_{\text{ср.}}} [\sigma_{\text{раст.}j} + \nu_{\text{ср.}} (\sigma_{2j} + \sigma_{3j})] = \frac{\sigma_{\text{раст.}j}}{E_{\text{ср.}}} + \frac{\gamma_{\text{ср.}} H_j}{E_{\text{ср.}}} \left(\frac{\nu_{\text{ср.}}}{1 - \nu_{\text{ср.}}} \right) = \frac{\Delta dL_j}{dL_j} \Rightarrow^5$$

³ Вертикальное напряжение σ_{2j} более точно можно определить на основании результатов работ [117-118]

⁴ Для удобства восприятия сжимающие напряжения приняты положительными, а растягивающее отрицательным

⁵ Для удобства восприятия сжимающие напряжения приняты отрицательными, а растягивающее положительным

$$\Rightarrow \Delta dL_j = \frac{\gamma_{\text{ср.}} H_j}{E_{\text{ср.}}} \left(\frac{\nu_{\text{ср.}}}{1 - \nu_{\text{ср.}}} \right) dL_j + \frac{\sigma_{\text{раст.}j}}{E_{\text{ср.}}} dL_j, \quad (4.17)$$

где $E_{\text{ср.}}$ – средневзвешенный модуль Юнга для пород на рассматриваемом участке шахтного поля, Н/м²;

$\sigma_{\text{раст.}j}$ – растягивающие напряжения на j -м горизонте массива, Н/м²;

ΔdH_j – абсолютная деформация на которую уменьшается размер ребра кубика вдоль оси z , м;

dH_j – первоначальная высота ребра кубика, м;

ΔdL_j – абсолютная деформация на которую уменьшается размер ребра кубика вдоль оси y , м;

dL_j – первоначальная длина ребра кубика, м.

Анализируя зависимости 4.16 и 4.17, довольно просто прийти к выводу о том, что суммарная величина прогиба (оседания) $\sum V_o$ ($\sum \eta_o$) и горизонтального смещения ξ_o в произвольной точке O рассматриваемой области массива будут являться интегралами полученных выражений соответственно по высоте (на интервале значений от H_j до $H - l_o \text{tg } \delta_{0i}$) и длине (на интервале значений от 0 до $(H - H_j) \text{ctg } \delta_{0i} - l_o$), где l_o – расстояние в плане от произвольной точки рассматриваемой области массива до постоянной границы выработанного пространства, м; H – глубина до подошвы нижнего пласта над границей отработки запасов, м; δ_{0i} – значение граничного угла на заданный момент времени, °. Перед проведением процедуры интегрирования необходимо знать величину $\sigma_{\text{раст.}j}$ или иметь приближенную аналитическую зависимость для ее определения.

Очевидно, что в рассматриваемых условиях для отдельно взятой полумульды сдвига значение $\sigma_{\text{раст.}j}$ будет зависеть, главным образом, от физико-механических свойств пород, слагающих рассматриваемый горизонт массива, а также от величины максимального прогиба (оседания) и его местоположения. Для приблизительного описания такой взаимосвязи можно воспользоваться существующими близкими по аналогии к рассматриваемым условиям математическими моделями механики, среди которых наиболее выделяются

модели изгиба пластины [121] или изгиба балки [122] под действием равномерно распределенной поперечной нагрузки. При этом, важно учитывать, что стремление к получению более достоверной аналитической зависимости для определения $\sigma_{\text{раст},j}$ на основании отмеченных моделей сопряжено с необходимостью неизбежного их усложнения (задание нестандартных граничных условий, учет межслойного взаимодействия и пр.), что, в свою очередь, способствует значительному повышению трудности получения итогового результата. Вывести зависимость для нахождения величины $\sigma_{\text{раст},j}$ в наиболее простом приближении можно если представить, что элементарный кубик, выделенный в точке O находится в поперечном сечении длинного стержня, ортогонально расположенного к постоянной границе выработанного пространства. Над границей отработки запасов упомянутый стержень имеет жесткое защемление, а оставшаяся его часть характеризуется постоянством возникающих растягивающих напряжений $\sigma_{\text{раст},j}$. В условиях зеркального отражения полумульды сдвижения поиск упрощенного решения можно свести к рассмотрению модели прогиба балки с жестко защемленными противоположными концами, для которой, согласно [122], справедливы следующие выражения:

$$\left. \begin{aligned} \omega_{\max} &= \frac{qL^4}{32Ebh^3} \\ \sigma_{\max} &= \frac{qL^2}{2bh^2} \end{aligned} \right\} \Rightarrow \sigma_{\max} = \frac{16Eh}{L^2} \omega_{\max}, \quad (4.18)$$

где ω_{\max} – максимальная величина прогиба в центральной части балки, м;

σ_{\max} – максимальная величина растягивающего напряжения в жесткой заделке Н/м²,

q – интенсивность приложенной распределенной нагрузки, Н/м;

L – длина балки, м;

E – модуль Юнга, Н/м²;

b и h – ширина и высота прямоугольного сечения балки, м.

Результат выражения 4.18, применительно к рассматриваемым условиям, может быть преобразован в следующий вид:

$$\sigma_{\text{раст.}j} = \frac{16E_{\text{ср.}}\eta_{mi}h_j}{2^2(H - H_j)^2 \text{ctg}^2\psi} = \frac{4E_{\text{ср.}}\eta_{mi}h_j}{(H - H_j)^2 \text{ctg}^2\psi} \quad (4.19)$$

где η_{mi} – фактическое или прогнозное максимальное оседание в полумульде сдвижения на заданный момент времени, м;

h_j – мощность слоя на j -м горизонте породного массива, м;

H – глубина до подошвы нижнего пласта над границей отработки запасов, м;

ψ – величина угла полных сдвижений на рассматриваемом участке отработки запасов, °.

Рассматривая полученную зависимость 4.19 в сочетании с данными фактического опробования пород массива на физико-механические свойства, несложно заметить, что расчетные величины $\sigma_{\text{раст.}j}$ для слоев мощностью 1 м в большинстве случаев не превысят среднего значения лабораторно определённых пределов прочности пород массива на одноосное растяжение⁶ $\sigma_{\text{р.ср.}} = 2$ МПа (в реальном массиве эффективная величина предела прочности пород на растяжение будет больше $\sigma_{\text{р.ср.}}$ вследствие влияния масштабного фактора и наличия межслойного взаимодействия). Так, например, при $\eta_{mi} = 3,0$ м, $E_{\text{ср.}} = 5,10$ ГПа, $H = 300$ м, $H_j = 0$ м и $\psi = 55^\circ$ величина $\sigma_{\text{раст.}j}$ составит 1,39 МПа (около 70% от $\sigma_{\text{р.ср.}}$).

Вышеизложенное позволяет сделать важное замечание о возможности упрощения зависимости 4.16, путем исключения второго слагаемого, вследствие его относительной малости. Убедиться в сказанном довольно просто, если принять в качестве величины $\sigma_{\text{раст.}j}$ фиксированное значение, равное пятикратной величине $\sigma_{\text{р.ср.}}$ - 10 МПа (что довольно много для пород слагающих подрабатываемый массив на ВКМС), и после этого произвести интегрирование второго слагаемого формулы 4.16 по dH_j на интервале значений от 0 до $H - l_o \text{tg} \delta_0$. В результате получим

⁶ На основании имеющихся данных по результатам опробования пород толщи выше кровли верхнего промышленного пласта В величину $\sigma_{\text{р.ср.}}$ можно принять равной 0,07 от средневзвешенного по мощности слоев на рассматриваемом участке шахтного поля значения предела прочности пород на сжатие $\sigma_{\text{сж.ср.}}$.

следующее выражение $10 \nu_{\text{ср.}} (H - l_o \text{tg } \delta_0) / E_{\text{ср.}}$, которое при величинах $\nu_{\text{ср.}} = 0,3$, $E_{\text{ср.}} = 5,10$ ГПа, $H = 400$ м, $l_o = 0$ м примет значение 0,023 м или 23 мм, что не является существенной величиной в рамках рассматриваемой задачи. Таким образом, в исходной зависимости 4.16 остается только первое слагаемое, интегрируя которое по dH_j на вышеотмеченном интервале значений получим выражение для определения оседания $\eta(l_o)$ в произвольной точке O исследуемой области сдвижения на расстоянии l_o от постоянной границы выработанного пространства:

$$\eta_i(l_o) = \frac{\gamma_{\text{ср.}}(H - l_o \text{tg } \delta_{0i})^2}{2E_{\text{ср.}}} \left(1 - \frac{\nu_{\text{ср.}}^2}{1 - \nu_{\text{ср.}}} \right),^7 \quad (4.20)$$

где l_o – расстояние в плане от произвольной точки рассматриваемой области массива до постоянной границы выработанного пространства ($0 \leq l_o \leq H \text{ctg } \delta_{0i}$), м;
 δ_{0i} – величина граничного угла на рассматриваемый момент времени, °.

Для уравнения 4.17 величина $\sigma_{\text{раст.}j}$ в рассматриваемом случае имеет ключевое значение. Это объясняется тем, что во внимание принимается поверхностный слой ($H_j \rightarrow 0$), тогда первое слагаемое выражения 4.17 обращается в ноль. Подставляя зависимость 4.19 (с учетом, что параметры $E_{\text{ср.}}$ и h_j соответствуют модулю Юнга E_q и фактической мощности m_q пород (наносов), слагающих поверхностный слой на рассматриваемом участке отработки запасов) во второе слагаемое формулы 4.17 и интегрируя по dL_j на интервале значений 0 до $H \text{ctg } \delta_{0i} - l_o$, получим выражение для определения горизонтального смещения $\xi_i(l_o)$ в произвольной точке O исследуемой области сдвижения, выбранной на расстоянии l_o от постоянной границы выработанного пространства:

$$\xi_i(l_o) = 4 \frac{\eta_{mi} m_q (H \text{ctg } \delta_{0i} - l_o)}{H^2 \text{ctg}^2 \psi}, \quad (4.21)$$

⁷ Вследствие довольно сильного упрощения принятой модели сдвижения рассматриваемого участка массива, полученные из зависимости 4.20 оседания будут постоянны во времени на каждой отдельной наблюдательной станции, что является довольно существенным фактором, ограничивающим область практического использования полученного выражения

где m_q – фактическую мощность верхнего слоя (наносов) на рассматриваемом участке отработки запасов, м.

Учитывая, что в основе вывода зависимостей 4.20 и 4.21 лежит ряд существенных упрощений и допущений относительно реальных условий, имеется целесообразность их корректировки путем введения поправочных эмпирических коэффициентов - k_η и k_ξ соответственно. Для вычисления k_η отобраны 9 своевременно заложенных профильных линии грунтовых реперов, по которым на различные даты инструментальных наблюдений определены значения оседаний η_{igr} в точке над границей выработанного пространства и нетронутого массива. Затем, на основании зависимости 4.20 вычислены оседания $\eta(l_o=0)$ и найдены отношения $\eta_{igr}/\eta(l_o=0)$, соответствующие коэффициентам k_{η_i} . Последние хорошо коррелируют со значениями фактически достигнутых максимальных оседаний η_{mi} в полумульде сдвижения, что наглядно видно из рисунка 26.

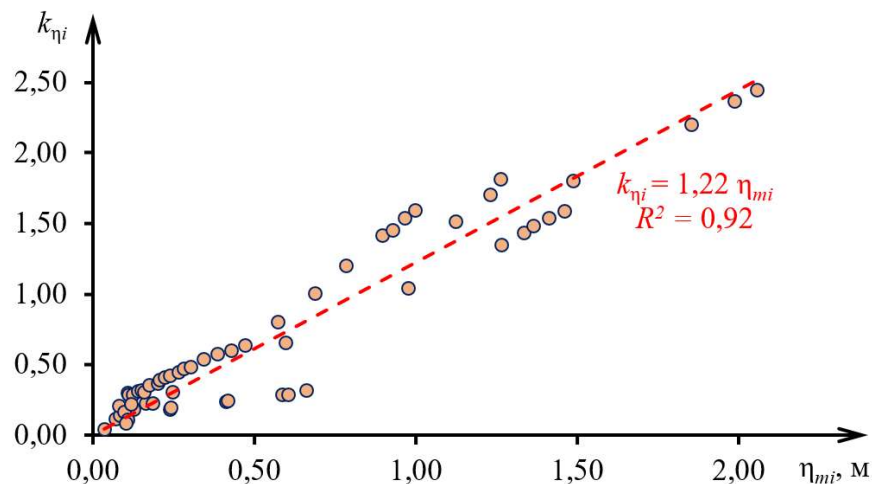


Рисунок 26 - Корреляционное поле значений эмпирических поправочных коэффициентов k_η и величин фактически достигнутых максимальных оседаний η_{mi} в полумульде сдвижения

Вводя эмпирическую правку $k_{\eta_i} = 1,22 \eta_{mi}$ в уравнение 4.20, получим:

$$\eta_i(l_o) = \frac{0,61 \eta_{mi} \gamma_{cp} (H - l_o \operatorname{tg} \delta_{0i})^2}{E_{cp}} \left(1 - \frac{\nu_{cp}^2}{1 - \nu_{cp}} \right) \quad (4.22)$$

Определение коэффициента k_{ξ_i} уместно произвести по аналогии с вышеописанным расчетом коэффициента k_{η_i} : на примере данных четырех

вышерассмотренных на рисунке 24 профильных линий на различные даты наблюдений определены величины горизонтальных смещений ξ_{igr} . в точке над границей выработанного пространства и нетронутого массива, после чего из зависимости 4.21 вычислены соответствующие величины $\xi_i(l_o=0)$ и найдены отношения $\xi_{igr}/\xi_i(l_o=0)$, являющиеся искомыми коэффициентами k_{ξ_i} . Полученные значения k_{ξ_i} разбросаны в диапазоне от 1,43 до 2,43 и в среднем составляют 1,90. Прослеживается слабая тенденция уменьшения величин k_{ξ_i} по мере роста фактически достигнутого максимального оседания η_{mi} в полумульде сдвижения. Учитывая малую размерность массива натуральных данных, в рассматриваемом случае, с точки зрения надежности вычислений горизонтальных смещений, являющихся основой для последующего определения горизонтальных деформаций, значение коэффициента k_{ξ} уместно принять с небольшим запасом в виде фиксированной величины, равной 2,5. Далее, вводя эмпирическую правку $k_{\xi}=2,5$ в уравнение 4.21, получим:

$$\xi_i(l_o) = 10 \frac{\eta_{mi} m_q (H \operatorname{ctg} \delta_{0i} - l_o)}{H^2 \operatorname{ctg}^2 \psi} \quad (4.23)$$

Для дальнейшего определения локальных функций наклонов, кривизны и горизонтальных деформаций найдем соответственно первую⁸ $d\eta_i(l_o)/dl_o$ и вторую $d^2\eta_i(l_o)/d^2l_o$ производные зависимости 4.22 и первую⁸ $d\xi_i(l_o)/dl_o$ производную выражения 4.23, приняв в качестве констант параметры $\gamma_{cp.}$, η_{mi} , H , δ_{0i} , $E_{cp.}$, $\nu_{cp.}$, m_q , ψ :

$$i_i(l_o) = \frac{1,22 \eta_{mi} \gamma_{cp.}}{E_{cp.}} \left(1 - \frac{\nu_{cp.}^2}{1 - \nu_{cp.}} \right) \operatorname{tg} \delta_{0i} (H - l_o \operatorname{tg} \delta_{0i}) \quad (4.24)$$

$$K_i(l_o) = K_i = \frac{1,22 \eta_{mi} \gamma_{cp.}}{E_{cp.}} \left(1 - \frac{\nu_{cp.}^2}{1 - \nu_{cp.}} \right) \operatorname{tg}^2 \delta_{0i} \quad (4.25)$$

$$\varepsilon_i(l_o) = \varepsilon_i = 10 \frac{\eta_{mi} m_q}{H^2 \operatorname{ctg}^2 \psi} \quad (4.26)$$

⁸ Наклоны и горизонтальные деформации растяжения приняты положительными по знаку

Анализируя полученные зависимости 4.24-4.26 можно сделать вывод о линейном изменении наклонов и постоянстве кривизны и горизонтальных деформаций вдоль рассматриваемого участка отработки запасов, что объясняется упрощением принятой модели развития процесса сдвижения. В рассматриваемом случае, крайне маловероятно, что вычисленные из зависимости 4.25 величины кривизны превысят опасного значения $K = 2 \cdot 10^{-4} \text{ м}^{-1}$. Так, при $\gamma_{\text{ср.}} = 21582 \text{ Н/м}^3$, $E_{\text{ср.}} = 5,10 \text{ ГПа}$, $\nu_{\text{ср.}} = 0,3$ и $\delta_{0i} = 55^\circ$ для достижения кривизны $2 \cdot 10^{-4} \text{ м}^{-1}$ необходимо оседание η_{mi} равное 21,8 м, что слишком много для условий отработки запасов на ВКМС. Это позволит исключить кривизну из дальнейшего рассмотрения. Использование зависимости 4.26 в качестве основы для определения углов δ сопряжено с необходимостью некоторого ее совершенствования путем учета изменения горизонтальной деформации ε_i по длине рассматриваемого участка сдвижения. Сделать это наиболее просто по аналогии с линейным видом функции наклона $i_i(l_o)$, что в целом не противоречит данным натурных наблюдений и является грубой аппроксимацией реального изменения рассматриваемого параметра. Предполагая вычисленную из зависимости 4.26 горизонтальную деформацию растяжения максимальной на рассматриваемом участке сдвижения в точке $l_o = 0$ м и вводя дополнительное условие $1 - l_o / (H \text{ ctg } \delta_{0i})$, можно записать следующее выражение:

$$\varepsilon_i(l_o) = 10 \frac{\eta_{mi} m_q (H \text{ ctg } \delta_{0i} - l_o)}{H^3 \text{ ctg}^2 \psi \text{ ctg } \delta_{0i}} \quad (4.27)$$

Приравнявая величины $i_i(l_o)$ и $\varepsilon_i(l_o)$ к определенным в разделе 2.2.4 критериальным значениям $i = 4 \cdot 10^{-3}$ и $\varepsilon = 2 \cdot 10^{-3}$ соответственно и затем выражая из формул 4.24 и 4.27 параметр l_o , можем записать итоговую систему уравнений для определения угла сдвижения δ_i на рассматриваемый период времени:

$$\left\{ \begin{array}{l}
\text{если } \left\{ u_i = \frac{305 \eta_{mi} \gamma_{cp.} (1 - \nu_{cp.} - \nu_{cp.}^2) H \operatorname{tg} \delta_{0i}}{E_{cp.} (1 - \nu_{cp.})} \leq 1 \right\} \wedge \left\{ u_\varepsilon = \frac{5000 \eta_{mi} m_q}{H^2 \operatorname{ctg}^2 \psi} \leq 1 \right\} \Rightarrow \\
\quad \Rightarrow \text{зона опасных сдвижений отсутствует,} \\
\quad \quad \quad \text{иначе } \delta_i = \min(\delta_{ii}, \delta_{\varepsilon i}) \\
\delta_{ii} = \begin{cases} 89,9^\circ \text{ при } u_i \leq 1 \\ \operatorname{arctg} \left(\frac{\eta_{mi} \gamma_{cp.} (1 - \nu_{cp.} - \nu_{cp.}^2) H \operatorname{tg}^2 \delta_{0i}}{H \operatorname{tg} \delta_{0i} \eta_{mi} \gamma_{cp.} (1 - \nu_{cp.} - \nu_{cp.}^2) - 3,28 \cdot 10^{-3} E_{cp.} (1 - \nu_{cp.})} \right) \text{ при } u_i > 1 \end{cases} \\
\delta_{\varepsilon i} = \begin{cases} 89,9^\circ \text{ при } u_\varepsilon \leq 1 \\ \operatorname{arctg} \left(\frac{\eta_{mi} m_q \operatorname{tg} \delta_{0i}}{\eta_{mi} m_q - 2 \cdot 10^{-4} H^2 \operatorname{ctg}^2 \psi} \right) \text{ при } u_\varepsilon > 1 \end{cases}
\end{array} \right. \quad (4.28)$$

где u_i и u_ε – вспомогательные коэффициенты, применяемые для упрощения записи итогового результата;

η_{mi} – фактическое или прогнозное максимальное оседание в полумульде сдвижения на заданный момент времени, м;

$\gamma_{cp.}$ – средний объемный вес налегающей толщи пород, Н/м³;

$\nu_{cp.}$ – средневзвешенный коэффициент Пуассона для пород на рассматриваемом участке шахтного поля;

H – глубина до подошвы нижнего пласта над границей отработки запасов, м;

δ_{0i} – величина граничного угла на рассматриваемый момент времени, °;

$E_{cp.}$ – средневзвешенный модуль Юнга для пород на рассматриваемом участке шахтного поля, Н/м²;

m_q – средняя мощность наносов на рассматриваемом участке отработки запасов, м;

ψ – величина угла полных сдвижений на рассматриваемом участке отработки запасов, °;

l_o – расстояние в плане от произвольной точки рассматриваемой области массива до постоянной границы выработанного пространства ($0 \leq l_o \leq H \operatorname{ctg} \delta_{0i}$), м.

4.3.3 Определение углов сдвижения в условиях полной подработки земной поверхности на основании эмпирического подхода

В основе рассматриваемого подхода лежит локальное изучение (на интересуемом участке сдвижения) базовых безразмерных распределений $S(z)_{\text{кр.ч.}}$ и $F(z)_{\text{кр.ч.}}$ для последующего их дифференцирования с целью определения функций $S(z)'_{\text{кр.ч.}}$, $S(z)''_{\text{кр.ч.}}$, $F(z)'_{\text{кр.ч.}}$. Использование последних в сочетании с критериями $i = 4 \cdot 10^{-3}$, $K = 2 \cdot 10^{-4} \text{ м}^{-1}$ и $\varepsilon = 2 \cdot 10^{-3}$ позволит установить безразмерную абсциссу точки $z_{\text{о.д.}i}$, характеризуемую опасными деформациями. На основании отметки $z_{\text{о.д.}i}$ и значения граничного угла δ_{0i} можно рассчитать угол сдвижения δ_i на заданный момент времени. Сказанное, более подробно, удобно рассмотреть на примере рисунка 27.

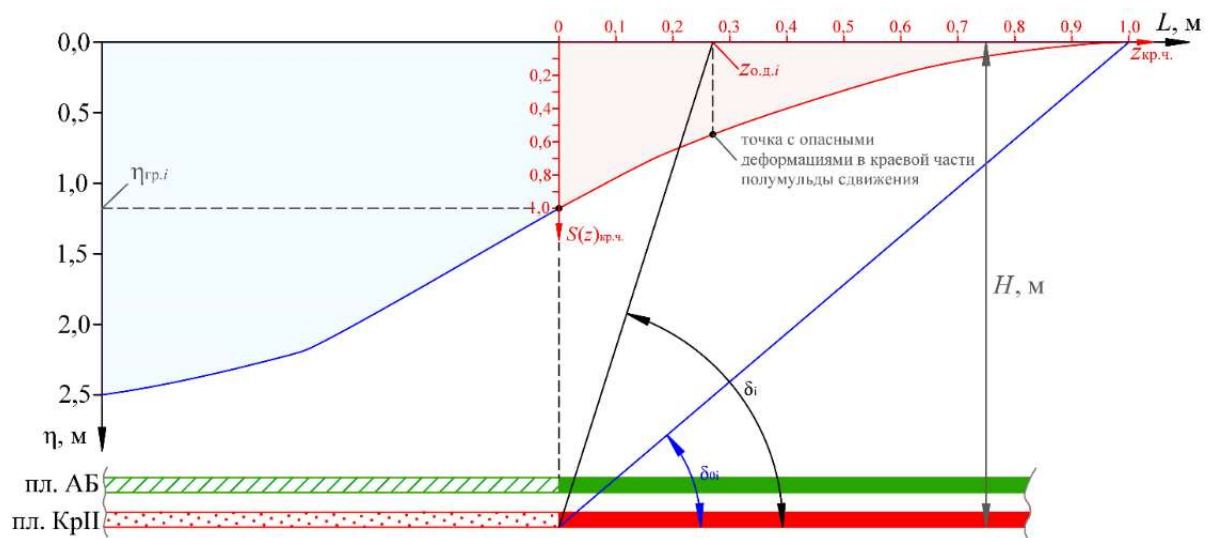


Рисунок 27 - Схематическое пояснение к определению угла сдвижения δ_i на основании эмпирического подхода

Из рисунка 27 видно, что угол сдвижения δ_i может быть определен из следующей зависимости:

$$\delta_i = \text{arcctg}(z_{\text{о.д.}i} \text{ctg } \delta_{0i}), \quad (4.29)$$

где $z_{\text{о.д.}i}$ – безразмерная абсцисса ближайшей к границе мульды сдвижения точки, определенная на заданный период времени на основании соответствия каждой из

фактических или расчетных величин деформаций $i(z)_{\text{кр.ч.}}$, $K(z)_{\text{кр.ч.}}$, $\varepsilon(z)_{\text{кр.ч.}}$ критериальным значениям $i = 4 \cdot 10^{-3}$, $K = 2 \cdot 10^{-4} \text{ м}^{-1}$ и $\varepsilon = 2 \cdot 10^{-3}$.

Для определения параметра $z_{\text{о.д.}}$ удобно принять за основу базовые выражения для определения расчетных величин наклонов $i(z)$, кривизны $K(z)$ и горизонтальных деформаций $\varepsilon(z)$ [19], которые, применительно к условиям рассматриваемой задачи, можно записать следующим образом:

$$i(z)_{\text{кр.ч.}} = \frac{\eta_{\text{гр.}i} S(z)'_{\text{кр.ч.}}}{H \text{ctg} \delta_{0i}}, \quad (4.30)$$

$$K(z)_{\text{кр.ч.}} = \frac{\eta_{\text{гр.}i} S(z)''_{\text{кр.ч.}}}{H^2 \text{ctg}^2 \delta_{0i}}, \quad (4.31)$$

$$\varepsilon(z)_{\text{кр.ч.}} = \frac{\xi_{\text{гр.}i} F(z)'_{\text{кр.ч.}}}{H \text{ctg} \delta_{0i}}, \quad (4.32)$$

где $\eta_{\text{гр.}i}$ – фактическая или расчетная величина оседания, определенная на заданный период времени над границей рассматриваемого участка отработки запасов и нетроннутого массива, м;

$S(z)'_{\text{кр.ч.}}$, $S(z)''_{\text{кр.ч.}}$, $F(z)'_{\text{кр.ч.}}$ – локальные безразмерные функции распределения наклонов i , кривизны K и горизонтальных деформаций ε в краевой части полумульды сдвижения над нетронутым массивом;

$\xi_{\text{гр.}i}$ – фактическая или расчетная величина горизонтального смещения земной поверхности, определенная на заданный период времени над границей рассматриваемого участка отработки запасов и нетроннутого массива, м.

Из уравнений 4.30-4.32 видно, что получение выражений, описывающих изменение параметра $z_{\text{о.д.}}$ сопряжено с необходимостью установления зависимостей, описывающих изменение параметров $\eta_{\text{гр.}i}$ и $\xi_{\text{гр.}i}$ и функций локальных безразмерных распределений оседаний $S(z)_{\text{кр.ч.}}$ и горизонтальных

⁹ Прямое использование безразмерных распределений горизонтальных деформаций $F'(z)$ довольно редко встречается на практике вследствие малочисленности проводимых инструментальных наблюдений за горизонтальным смещением ξ точек полумульды сдвижения. Довольно часто используют методы аналогии кривых $S'(z)$ и $F(z)$ или $S''(z)$ и $F'(z)$, что также отмечалось ранее. Сказанное определяет возможность последующего видоизменения отмеченного выражения.

смещений $F(z)_{\text{кр.ч.}}$, являющихся основой для последующего определения кривых $S(z)'_{\text{кр.ч.}}$, $S(z)''_{\text{кр.ч.}}$, $F(z)'_{\text{кр.ч.}}$.

В рассматриваемой ситуации важно заметить, что косвенная оценка параметра $\eta_{\text{гр.}i}$ уже выполнялась ранее при определении эмпирического коэффициента k_{η_i} , что отражено на рисунке 26. Принимая за основу использованные данные по 9-ти отобраным наблюдательным станциям, на рисунке 28 оценим распределение величин $\eta_{\text{гр.}i}$ относительно значений η_{mi} .

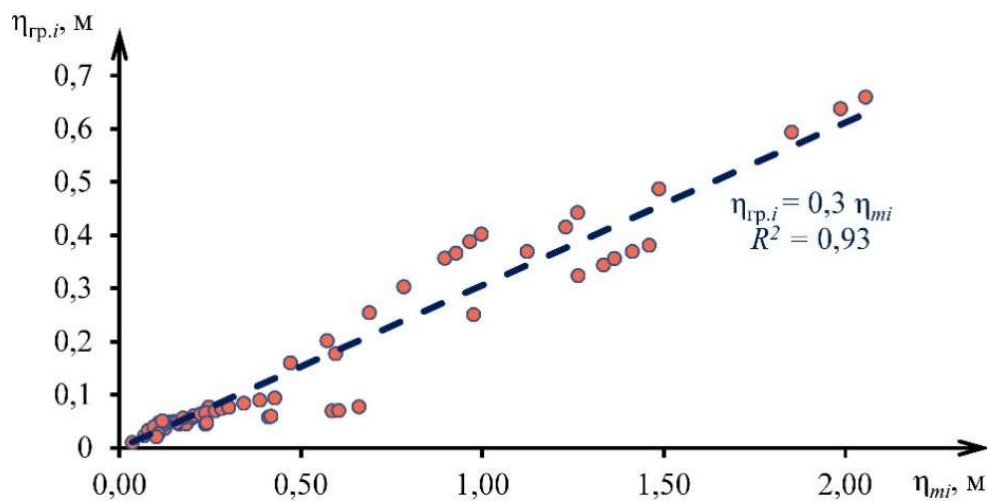


Рисунок 28 - Корреляционное поле значений достигнутых оседаний над границей рассматриваемого участка отработки запасов и нетронутого массива $\eta_{\text{гр.}i}$ и величин достигнутых максимальных оседаний η_{mi} в полумульде сдвижения

Из рисунка 28 видно, что распределение величин $\eta_{\text{гр.}i}$ относительно значений η_{mi} имеет вид, близкий к линейному и хорошо описывается зависимостью $\eta_{\text{гр.}i} = 0,3 \eta_{mi}$ с высоким коэффициентом детерминации $R^2 = 0,93$. Полученное выражение пригодно для дальнейшего использования.

Для обоснования величин $\xi_{\text{гр.}i}$ целесообразно воспользоваться рисунком 24. Представленные на нем графики безразмерных кривых $T(z)$ наглядно демонстрируют, что точки, характеризуемые паритетом между достигнутыми оседаниями и горизонтальными смещениями, находятся над нетронутым массивом с небольшой дислокацией от границы выработанного пространства в сторону границы мульды сдвижения. Непосредственно над самой границей выработанного пространства и нетронутого массива средняя величина $T(z)_{\text{гр.ср.}}$ составляет 0,85, что близко к 1. В рассматриваемом случае, учитывая малую размерность исходного

массива данных, в качестве величины $T(z)_{гр.ср.}$ уместно принять 1, тогда справедливо следующее выражение:

$$\eta_{гр.i} \approx \xi_{гр.i} \approx 0,3 \eta_{mi} \quad (4.33)$$

Исследование локальных функций $S(z)_{кр.ч.}$ и $F(z)_{кр.ч.}$ уместно начать с установления фактических величин их абсцисс и ординат на различные даты инструментальных наблюдений по отобранным профильным линиям грунтовых реперов. Для этого можно воспользоваться следующими зависимостями:

$$z_i = 1 - \frac{l_{ni}}{l_i}, \quad z_i \in [0; 1] \quad (4.34)$$

$$S(z_i)_{кр.ч.i} = \frac{\eta_{ni}}{\eta_{гр.i}}, \quad S(z_i)_{кр.ч.i} \in [0; 1] \quad (4.35)$$

$$F(z_i)_{кр.ч.i} = \frac{\xi_{ni}}{\xi_{гр.i}}, \quad F(z_i)_{кр.ч.i} \in [0; 1] \quad (4.36)$$

где l_{ni} – расстояние в плане от границы выработанного пространства до n -го репера профильной линии (в области нетронутого массива) на рассматриваемую дату инструментальных наблюдений, м;

l_i – расстояние в плане от границы выработанного пространства до границы мульды сдвижения на рассматриваемую дату инструментальных наблюдений, м;

η_{ni} – фактическая величина оседания n -го репера профильной линии (в области нетронутого массива) на рассматриваемую дату инструментальных наблюдений, м;

ξ_{ni} – фактическая величина горизонтального сдвижения n -го репера профильной линии (в области нетронутого массива) на рассматриваемую дату инструментальных наблюдений, м.

Принимая во внимание, что на границе мульды сдвижения оседания и горизонтальные смещения фактически не являются нулевыми, следовательно, минимальные значения функций $S(z)_{кр.ч.i}$ и $F(z)_{кр.ч.i}$ будут отличаться от 0 тем сильнее, чем меньше величины $\eta_{гр.i}$ и $\xi_{гр.i}$ соответственно. Сказанное определяет необходимость последующего трансформирования рассчитанных фактических

локальных кривых оседаний и горизонтальных смещений земной поверхности с целью приведения к 0 их ординат в точках с абсциссой $z_i = 1$. Для этого удобно воспользоваться зависимостями:

$$S(z_i)_{\text{кр.ч.тр.}i} = \frac{S(z_i)_{\text{кр.ч.}i} - S(z_i = 1)_{\text{кр.ч.}i}}{1 - S(z_i = 1)_{\text{кр.ч.}i}}, \quad S(z_i)_{\text{кр.ч.тр.}i} \in [0; 1] \quad (4.37)$$

$$F(z_i)_{\text{кр.ч.тр.}i} = \frac{F(z_i)_{\text{кр.ч.}i} - F(z_i = 1)_{\text{кр.ч.}i}}{1 - F(z_i = 1)_{\text{кр.ч.}i}}, \quad F(z_i)_{\text{кр.ч.тр.}i} \in [0; 1] \quad (4.38)$$

где $S(z)_{\text{кр.ч.}i}$ и $F(z)_{\text{кр.ч.}i}$ – ординаты фактических локальных кривых оседаний и горизонтальных смещений земной поверхности, рассчитываемые на рассматриваемую дату инструментальных наблюдений из выражений 4.35 и 4.36 соответственно;

$S(z=1)_{\text{кр.ч.}i}$ и $F(z=1)_{\text{кр.ч.}i}$ – ординаты фактических локальных кривых оседаний и горизонтальных смещений земной поверхности, рассчитываемые на рассматриваемую дату инструментальных наблюдений в точках с абсциссой $z_i = 1$ из выражений 4.35 и 4.36 соответственно.

Учитывая, что на начальном этапе развития процесса сдвижения локальные функции $S(z)_{\text{кр.ч.}i}$ и $F(z)_{\text{кр.ч.}i}$ характеризуются наибольшими погрешностями определения их ординат важно исключить из рассмотрения некоторые принимаемые во внимание наблюдения для повышения достоверности итогового результата исследования. Сделать это для функции $S(z)_{\text{кр.ч.}}$ довольно просто путем использования метода «расчёт на худшие условия» при исследовании распределений наибольших фактических величин вертикальных деформаций i и K в полумульде сдвижения. Произведенный на основании обработки данных по 10 отобраным наблюдательным станциям анализ, позволил установить выраженные сгруппированности величин наибольших достигнутых наклонов $i_{\text{max}i}$ с параметрами наибольшей достигнутой кривизны $K_{\text{max}i}$ и достигнутыми оседаниями $\eta(t_i)$ над центральными частями выемочных зон, непосредственно примыкающих к границе выработанного пространства, что наглядно отражено на рисунке 29.

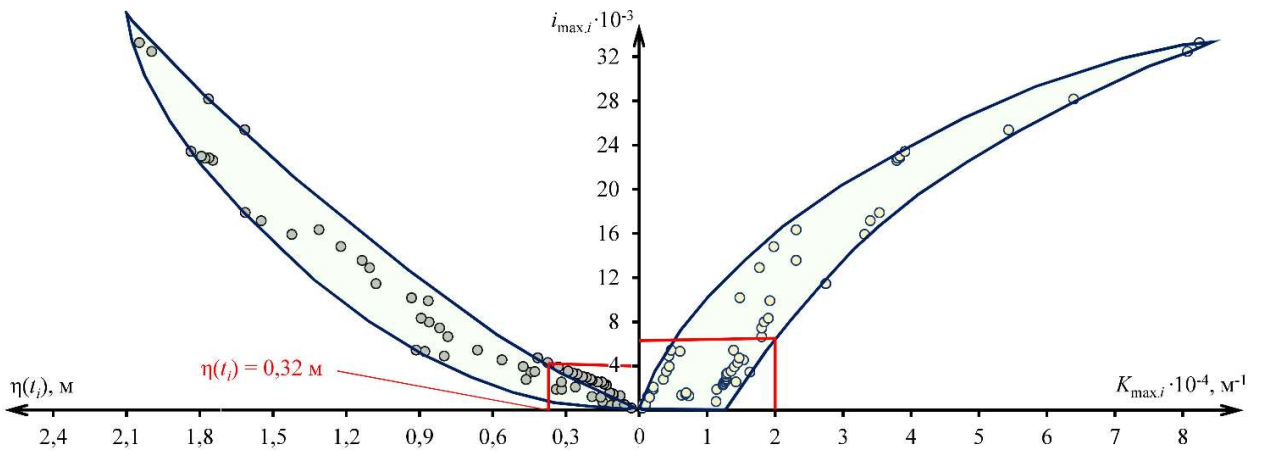


Рисунок 29 - Корреляционные поля пар значений параметров $i_{max,i}-\eta(t_i)$ и $i_{max,i}-K_{max,i}$

Из рисунка 29 видно, что нижняя граница области значений пары параметров $i_{max,i}$ и $K_{max,i}$ определяет величину ординаты около $6,5 \cdot 10^{-3}$ при соответствии отметке абсциссы критерию $K = 2 \cdot 10^{-4} \text{ м}^{-1}$. Так как значение $6,5 \cdot 10^{-3}$ превышает критериальное $i = 4 \cdot 10^{-3}$, в качестве определяющего использовано последнее. Ординате $i_{max,i} = 4 \cdot 10^{-3}$ соответствует минимально возможная величина абсциссы $\eta(t_i) = 0,32 \text{ м} \approx 0,3 \text{ м}$, следовательно, дальнейшему рассмотрению с целью определения геометрии кривой $S(z)_{кр.ч.}$ подлежат наблюдения соответствующие условию $\eta(t_i) > 0,3 \text{ м}$.

Рассматривая локальные безразмерные распределения горизонтальных сдвижений $F(z)_{кр.ч.}$ уместно заметить, что наибольшие значения функций $F'(z)$ на рисунке 24 не превышают 6, тогда наибольшее горизонтальное сдвижение ξ_{mi} , с учетом аналогии выражению 4.32 и соответствия величине $\varepsilon(z)$ критериального значения $\varepsilon = 2 \cdot 10^{-3}$, могут быть охарактеризованы зависимостью:

$$\xi_{m,i} = 3,3 \cdot 10^{-4} H L_i, \quad (4.39)$$

где L_i – фактическая длина полумульды сдвижения на рассматриваемую дату наблюдений, м.

Вводя упрощающее допущение о соответствии величин ξ_{mi} и $\xi_{гр,i}$, на основании зависимости 4.39 можно сделать вывод, что дальнейшему рассмотрению с целью определения геометрии кривой $F(z)_{кр.ч.}$ подлежат наблюдения соответствующие условию $\xi_{mi} > 3,3 \cdot 10^{-4} H L_i$.

При анализе результатов выполненной обработки данных натуральных инструментальных наблюдений было замечено, что геометрия кривых $S(z)_{кр.ч.i}$ и $F(z)_{кр.ч.i}$ не склонна к значительным изменениям во времени на каждой из рассмотренных наблюдательных станций. Полученные обобщенные данные о распределении вычисленных значений безразмерных функций $S(z)_{кр.ч.i}$ и $F(z)_{кр.ч.i}$ относительно их аргументов z_i представлены на рисунке 30.

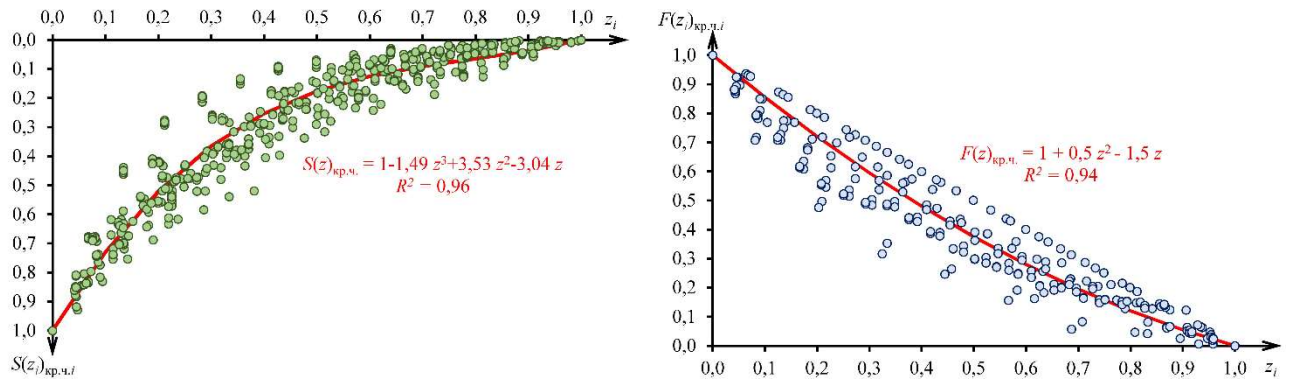


Рисунок 30 - Обобщенные распределения значений функций $S(z)_{кр.ч.i}$ и $F(z)_{кр.ч.i}$ относительно их аргументов z_i

Из рисунка 30 можно заметить, что полученные данные хорошо аппроксимируются полиномиальными функциям с высокими коэффициентами детерминации R^2 , при этом последующее прямое дифференцирование таких функций с целью определения кривых $S(z)'_{кр.ч.}$, $S(z)''_{кр.ч.}$, $F(z)'_{кр.ч.}$ не уместно. В этом легко убедиться если принять во внимание, что второй производной от кубического полинома является линейная функция, тогда кривая $S(z)''_{кр.ч.}$ будет являться линейным распределением, а это не согласуется с видом краевой части функций $S(z)''$, отраженным на рисунке 24. Применительно к рассматриваемым условиям наиболее оптимальным решением будет являться табличное выражение базовых функций $S(z)_{кр.ч.}$ и $F(z)_{кр.ч.}$ с последующим кусочно-линейным их дифференцированием и сглаживанием полученных кривых, что отражено в таблице 7.

Таблица 7 - Определение значений локальных функций $S(z)_{кр.ч.}$, $S(z)'_{кр.ч.}$, $S(z)''_{кр.ч.}$, $F(z)_{кр.ч.}$, $F(z)'_{кр.ч.}$ для условий полной подработки земной поверхности

z	0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
$S(z)_{кр.ч.}$	1	0,73	0,52	0,37	0,25	0,18	0,12	0,09	0,06	0,04	0
$F(z)_{кр.ч.}$	1	0,86	0,72	0,6	0,48	0,38	0,28	0,2	0,12	0,05	0
$S(z)'_{кр.ч.}$	3,04	2,39	1,82	1,34	0,95	0,64	0,43	0,28	0,14	0,07	0
$S(z)''_{кр.ч.}$	7,42	6,9	6,1	4,6	3,5	2,5	1,75	1,25	0,8	0,37	0
$F(z)'_{кр.ч.}$	1,5	1,4	1,3	1,2	1,1	1	0,87	0,68	0,48	0,27	0

Анализируя полученные в таблице 7 безразмерные локальные распределения, можно заметить низкую значимость полученных функций кривизны $S(z)''_{кр.ч.}$ для определения углов сдвижения δ . Доказать сказанное наиболее просто если из зависимостей 4.30-4.31 выразить параметр $S(z)'_{кр.ч.}$ через $S(z)_{кр.ч.}$, учитывая при этом соответствие величинам $i(z)_{кр.ч.}$ и $K(z)_{кр.ч.}$ критериальных значений $i = 4 \cdot 10^{-3}$ и $K = 2 \cdot 10^{-4} \text{ м}^{-1}$:

$$S(z)''_{кр.ч.} = 0,05 S(z)'_{кр.ч.} H \text{ ctg } \delta_{0i} \quad (4.40)$$

При минимальной глубине разработки $H = 200 \text{ м}$ и наибольшем значении $\delta_{0i} = 58,1^\circ$ (принято на основании работы рисунка 13 с учетом вышеопределенной величины учитываемых оседаний $\eta(t_i) = 0,3 \text{ м}$) выражение 4.40 примет вид: $S(z)''_{кр.ч.} = 6,22 S(z)'_{кр.ч.}$. Применяя последнее к данным таблицы 7 наглядно видно, что абсциссы z_i для любых значений функций $S(z)'_{кр.ч.}$ будут всегда больше абсцисс z_k для соответствующих вычисленных значений функций $S(z)''_{кр.ч.}$, следовательно, углы сдвижения δ_{ii} , определенные по критерию наклона $i = 4 \cdot 10^{-3}$, будут всегда меньше углов сдвижения δ_{ik} , определенных по критерию кривизны $K = 2 \cdot 10^{-4} \text{ м}^{-1}$. Сказанное позволяет исключить из последующего рассмотрения функции $S(z)''_{кр.ч.}$.

При использовании принимаемых для дальнейшего рассмотрения табличных распределений $S(z)'_{кр.ч.}$ и $F(z)'_{кр.ч.}$ необходимо понимать, что они являются отражением осреднённых по рассмотренным наблюдательным станциям данных и полученные на основании их значений максимальные расчетные деформации могут отличаться от фактических. Особую значимость в описанной ситуации имеют отличия в меньшую сторону, поскольку они определяют увеличение

расчётных углов сдвига δ , что, в свою очередь, создает предпосылки для возникновения негативного воздействия на поверхностные объекты. С целью обеспечения наиболее полного учета фактических максимальных деформаций на рассматриваемом участке полумульды сдвига имеется целесообразность корректировки полученных табличных значений функций $S(z)'_{кр.ч.}$ и $F(z)'_{кр.ч.}$ путем умножения их на поправочные коэффициенты k_i и k_ε , являющиеся некими аналогами коэффициентов перегрузки. Расчёт k_i и k_ε удобнее всего выполнить на основании следующих зависимостей:

$$k_i = \frac{i_{кр.ч.маx} l_i}{3,04 \eta_{гр.i}}, \quad (4.41)$$

$$k_\varepsilon = \frac{\varepsilon_{кр.ч.маx} l_i}{1,50 \xi_{гр.i}}, \quad (4.42)$$

где $i_{кр.ч.маx}$ – фактическая величина максимального наклона, определенная на заданный период времени над границей рассматриваемого участка отработки запасов и нетронутого массива;

$\varepsilon_{кр.ч.маx}$ – фактическая величина горизонтальной деформации, определенная на заданный период времени над границей рассматриваемого участка отработки запасов и нетронутого массива.

Вычисленные на основании зависимостей 4.41 и 4.42 (в области учитываемых фактических деформаций $i_{кр.ч.маx} \geq 4 \cdot 10^{-3}$ и $\varepsilon_{кр.ч.маx} \geq 2 \cdot 10^{-3}$) коэффициенты k_i и k_ε лежат соответственно в диапазонах значений от 0,82 до 1,62 (среднее значение 1,07) и от 1,18 до 1,94 (среднее значение 1,63). Учитывая малую размерность сформированных массивов данных, для дальнейших расчётов целесообразно принять $k_i \approx 2,00$ и $k_\varepsilon \approx 2,00$.

Принимая во внимание, что последующее использование табличных распределений $S(z)'_{кр.ч.}$ и $F(z)'_{кр.ч.}$ будет не удобно с практической точки зрения, формируется необходимость их представления в аналитическом виде. С позиции оптимального описания исходных данных и удобства последующего выражения

аргумента z , приемлемы следующие уравнения, полученные с учётом корректирующих коэффициентов k_i и k_ε :

$$S(z)'_{\text{кр.ч.}} = 6,08 - 12,08 z + 6,00 z^2 \quad (4.43)$$

$$F(z)'_{\text{кр.ч.}} = 3,00 - 0,70 z - 2,30 z^2 \quad (4.44)$$

Далее, подставляя уравнения 4.43, 4.44 и 4.33 в зависимости 4.30 и 4.32 и выражая аргумент z (приравнивая при этом параметры $i(z)_{\text{кр.ч.}}$ и $\varepsilon(z)_{\text{кр.ч.}}$ к соответствующим критериальным значениям $i = 4 \cdot 10^{-3}$ и $\varepsilon = 2 \cdot 10^{-3}$), определяем зависимости для нахождения абсцисс $z_{\text{о.д.}}$. Подставляя последние в выражение 4.29 и производя некоторые математические преобразования получим итоговую систему уравнений для определения величины граничного угла δ_i на заданный момент времени:

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{если } s = \frac{H \operatorname{ctg} \delta_{0i}}{\eta_{mi}} \geq 452,1 \Rightarrow \text{зона опасных сдвижений отсутствует,} \\ \hspace{15em} \text{иначе } \delta_i = \min(\delta_{ii}, \delta_{\varepsilon i}) \\ \delta_{ii} = \begin{cases} 89,9^\circ \text{ при } s \geq 472,6 \\ \operatorname{arcctg}([1 - 0,046\sqrt{s}] \operatorname{ctg} \delta_{0i}) \text{ при } s < 472,6 \end{cases} \\ \delta_{\varepsilon i} = \begin{cases} 89,9^\circ \text{ при } s \geq 452,1 \\ \operatorname{arcctg}([-0,15 + \sqrt{1,32 - 2,87 \cdot 10^{-3} s}] \operatorname{ctg} \delta_{0i}) \text{ при } s < 452,1 \end{cases} \end{array} \right. \quad (4.45)$$

где s – вспомогательный коэффициент, применяемый для упрощения записи итогового результата;

H – глубина до подошвы нижнего пласта над границей отработки запасов, м;

δ_{0i} – величина граничного угла на рассматриваемый момент времени, °;

η_{mi} – фактическое или прогнозное максимальное оседание в полумульде сдвижения на заданный момент времени, м.

4.3.4 Сравнительное сопоставление фактических углов сдвига с результатами их определения на основании вышерассмотренных подходов применительно к условиям полной подработки земной поверхности

На основе анализа результатов инструментальных наблюдений по 10 ранее рассмотренным наблюдательным станциям было замечено, что большая часть принятых во внимание наблюдений характеризуется отсутствием ЗОС (критерий $\varepsilon = 2 \cdot 10^{-3}$ учитывался только при наличии своевременных измерений длин интервалов между грунтовыми реперами). Вычисленные фактические величины углов $\delta_{\phi i}$ близки между собой, среднее их значение $\delta_{\phi, \text{ср.}}$ составляет $84,4^\circ$, а максимальная относительная ошибка ε_{max} отклонения $\delta_{\phi, \text{ср.}}$ от $\delta_{\phi i}$ достигает $9,6\%$.

Величины углов δ_i , полученные из выражения 4.28 при фактических величинах параметров η_{mi} , $\gamma_{\text{ср.}}$, H , δ_{0i} , $E_{\text{ср.}}$, m_q , ψ лежат в диапазоне от $73,5^\circ$ до $85,9^\circ$ и составляют в среднем $78,1^\circ$. Можно отметить довольно хорошую согласованность вычисленных значений δ_i с фактическими $\delta_{\phi i}$ (средняя разница составляет всего $3,1^\circ$), что характеризует рассмотренный подход с положительной стороны. Справедливо также отметить и наличие существенных недостатков, к которым относятся наличие ложных определений углов δ_i при фактическом отсутствии ЗОС, а также присутствие ошибочных определений ЗОС при фактическом ее наличии. Последнее обстоятельство, с позиции надежности определения рассматриваемых углов, не позволяет использовать на практике полученную «теоретико-эмпирическую» зависимость 4.28.

Углы δ_i , полученные из выражения 4.45 при фактических величинах параметров H , δ_{0i} и η_{mi} , лежат в диапазоне от $58,4^\circ$ до $86,2^\circ$ и составляют в среднем $67,2^\circ$. Полученные значения δ_i в среднем меньше фактических $\delta_{\phi i}$ на $19,7^\circ$, что формирует значительный запас надежности определения местоположения точки с опасными деформациями земной поверхности. В рассматриваемом эмпирическом подходе, как и в предыдущем «теоретико-эмпирическом», присутствуют ложные определения углов δ_i при фактическом отсутствии ЗОС. Учитывая возможность

уточнения полученного эмпирического выражения 4.45 путем последующих корректировок вида функций $S(z)'_{кр.ч.}$, $F(z)'_{кр.ч.}$ и значений коэффициентов k_i и k_e после накопления новых данных результатов инструментальных наблюдений, уместно сделать вывод о пригодности его практического использования и наличии потенциала для последующего совершенствования.

Определение углов δ_i по методике Нестерова М.П. характеризуется гораздо большей трудоемкостью относительно расчётов с использованием зависимостей 4.28 и 4.45. Сказанное объясняется многообразием типовых функций $S(z)'$ и $S(z)''$ и табличным видом задания их значений. Углы δ_i , полученные на основании уравнения 1.34 при фактических величинах угла δ_{0i} и длинах полумульд сдвижения L_i с использованием типовых функций $S(z)'$ и $S(z)''$ из «Указаний» 1994-2004 годов, лежат в диапазоне от $55,2^\circ$ до $73,8^\circ$ и составляют в среднем $63,7^\circ$. В целом, наблюдается схожесть рассчитанных величин δ_i , с аналогичными значениями, полученными из зависимости 4.45 (разница в среднем составляет около 5°). Расчетные величины углов δ_i , как и в предыдущем случае, меньше $\delta_{\phi i}$ в среднем на $19,7^\circ$. Количество ложных определений угла δ_i при фактическом отсутствии ЗОС значительно выше, чем в двух вышерассмотренных подходах. Изложенное характеризует рассматриваемый подход как возможный для практического использования, однако выбор его менее приоритетен относительно зависимости 4.45.

Принимая во внимание фиксированные величины граничных углов ($\delta_0 = 55^\circ$ для построения постоянных предохранительных целиков и $\delta_0 = 65^\circ$ для временных предохранительных целиков), регламентированными последней версией «Указаний» [19] и используемых в качестве альтернативы углов сдвижения δ , справедливо заметить, что все вышерассмотренные способы определения расчётных углов δ_i характеризуются средними значениями $\delta_{ср.}$, превышающими δ_0 . Сказанное, с позиции стремления к балансу между безопасностью подрабатываемых объектов и минимизации потерь полезного ископаемого, позволяет сделать вывод о наличии выраженных преимуществ использования

аналитических выражений по определению угла сдвижения δ_i на заданный период времени относительно фиксированных углов δ_0 .

На основании вышеизложенного можно заключить, что для практического использования наиболее приемлема эмпирическая зависимость 4.45, при этом, она нуждается в последующих корректировках после накопления новых данных результатов инструментальных наблюдений путем изменения вида функций $S(z)'_{\text{кр.ч.}}$, $F(z)'_{\text{кр.ч.}}$ и уточнения значений корректирующих коэффициентов k_i и k_ε .

4.3.5 Определение углов сдвижения в условиях неполной подработки земной поверхности

На основании анализа «Указаний» различных лет можно сделать вывод о том, что до 2008 года основное внимание уделялось полной подработке земной поверхности, как наиболее распространенной на ВКМС. К настоящему моменту времени для рассматриваемых условий нет какой-либо разработанной методики для определения угла сдвижения δ_i на заданный период времени. Принимая во внимание малочисленность наблюдательных станций, пригодных для анализа вертикальной составляющей процесса сдвижения в краевой части мульды (удалось отобрать лишь две) и отсутствие своевременно заложенных профильных линий с наблюдениями длин интервалов между парами реперов, несложно прийти к выводу о возможности получения в рамках настоящей работы лишь приблизительной зависимости для определения угла δ_i .

Поиск упомянутой зависимости целесообразно начать с исследования механизма формирования мульды сдвижения при неполной подработке земной поверхности, теоретическая модель которого, на основании анализа работ [27, 34, 69, 110-116 и др.], применительно к пологому залеганию свиты отрабатываемых пластов имеет вид, представленный на рисунке 31.

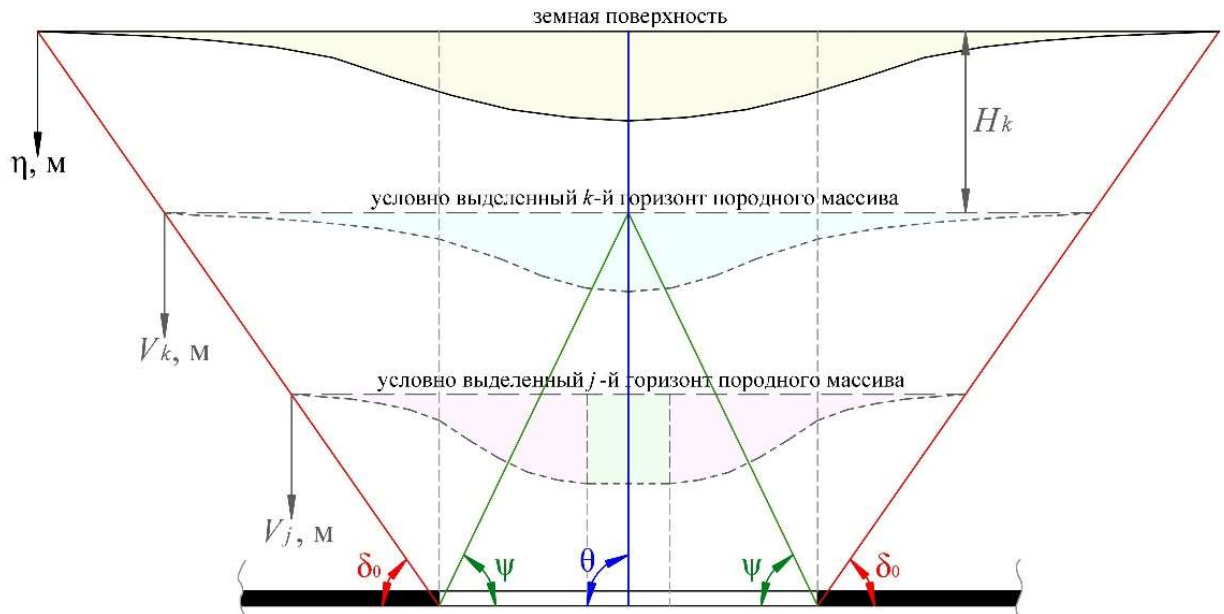


Рисунок 31 - Модель формирования краевой части мульды сдвижения при неполной подработке земной поверхности

Из рисунка 31 видно, что сдвижение массива на интервале от границы зоны обрушения до условно выделенного k -го горизонта принципиально не отличается от вышерассмотренного на рисунке 22 для условий полной подработки земной поверхности. Начиная с глубины H_k происходит слияние внутренних поверхностей характерных смещений слоев массива (определяемых линиями углов полных сдвижений ψ) в общую смежную поверхность, граница которой близка к линии, образуемой при построении угла максимальных оседаний θ . Отмеченный интервал сдвижения слоев массива является наиболее значимым для формирования отличительных особенностей образования краевой части полумульды сдвижения в условиях неполной подработки земной поверхности.

Искомая зависимость для определения угла δ_i в рассматриваемых условиях, не может быть полноценно определена на основании вышерассмотренных подходов. Основным препятствием для ее получения является отсутствие достаточного количества натуральных данных, необходимых как для калибровки теоретической модели, так и для получения полноценного эмпирического выражения. В этом случае возможно использование комбинированного подхода, в основе которого лежит эмпирический учет вертикальной составляющей и «теоретико-эмпирический» учет горизонтальной составляющей процесса сдвижения земной поверхности.

С целью получения эмпирических уравнений, позволяющих определить угол δ_i на основании критериев наклона i и кривизны K произведена обработка натуральных данных способом, аналогичным вышерассмотренному для полной подработки. В результате получено представленное на рисунке 32 обобщенное распределение значений функции $S(z)_{\text{кр.ч.}i}$ относительно аргументов z_i .

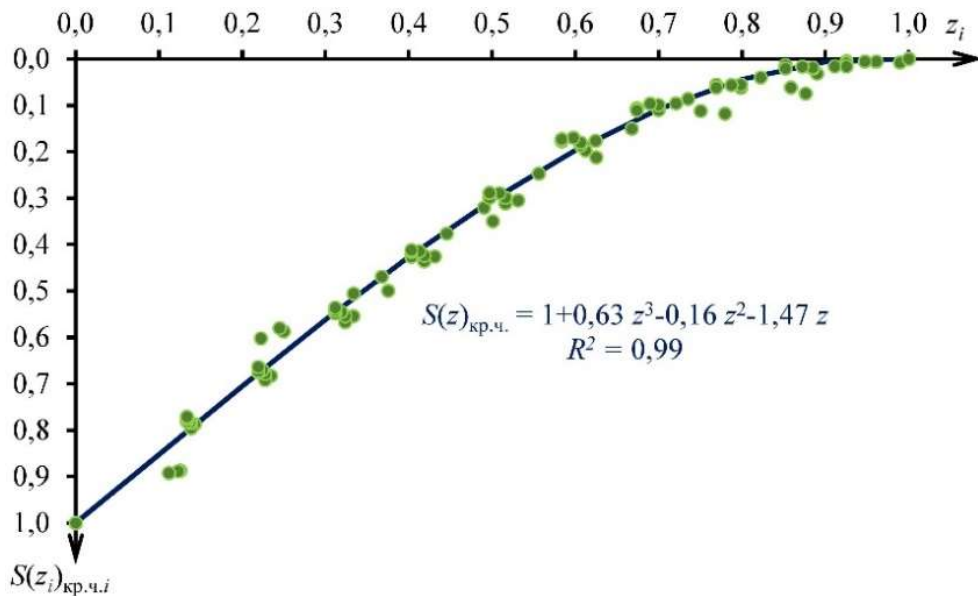


Рисунок 32 - Обобщенное распределение значений функции $S(z)_{\text{кр.ч.}i}$ относительно аргументов z_i

Из рисунка 32 видно, что полученные данные, как и в вышерассмотренной ситуации, хорошо аппроксимируются полиномиальной функцией с высоким коэффициентом детерминации R^2 . Определение вида кривых $S(z)'_{\text{кр.ч.}}$ и $S(z)''_{\text{кр.ч.}}$ выполнено на основании табличного выражения функции $S(z)_{\text{кр.ч.}}$ с последующим кусочно-линейным ее дифференцированием и сглаживанием полученных кривых, что отражено в таблице 8.

Таблица 8 - Определение значений локальных функций $S(z)_{\text{кр.ч.}}$, $S(z)'_{\text{кр.ч.}}$ и $S(z)''_{\text{кр.ч.}}$ для условий неполной подработки земной поверхности

z	0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
$S(z)_{\text{кр.ч.}}$	1,00	0,85	0,70	0,56	0,43	0,30	0,20	0,11	0,04	0,01	0,00
$S(z)'_{\text{кр.ч.}}$	1,50	1,48	1,45	1,39	1,29	1,15	0,98	0,76	0,49	0,22	0,00
$S(z)''_{\text{кр.ч.}}$	0,00	0,25	0,45	0,80	1,20	1,55	1,95	2,45	2,70	2,00	0,00

Применяя для рассматриваемых условий ранее полученное выражение $S(z)''_{кр.ч.} = 6,22 S(z)'_{кр.ч.}$, из таблицы 8 становится видно, что в краевой части интервала абсцисс z от 0,8 до 1,0 наблюдается преобладание значимости кривой $S(z)''_{кр.ч.}$ над кривой $S(z)'_{кр.ч.}$. Сказанное определяет необходимость последующего учета обеих безразмерных кривых $S(z)'_{кр.ч.}$ и $S(z)''_{кр.ч.}$.

Учитывая, что принятые во внимание данные инструментальных наблюдений характеризуются фактическим отсутствием ЗОС, что определяет невозможность вычисления корректирующих коэффициентов k_i и k_k , с целью формирования запаса надежности определения угла δ_i в текущих условиях целесообразно принять минимум двукратные значения ординат полученных табличных функций $S(z)'_{кр.ч.}$ и $S(z)''_{кр.ч.}$. После преобразования последних в упрощенный аналитический вид получены следующие уравнения:

$$S(z)'_{кр.ч.} = 3,0 + 0,2 z - 3,2 z^2 \quad (4.46)$$

$$S(z)''_{кр.ч.} = -77,0 + 207,0 z - 130,0 z^2, \quad z \in [0,8; 1,0] \quad (4.47)$$

Принимая во внимание, что в рассматриваемом случае фактические отношения величин $\eta_{гр.i}$ и η_{mi} лежат в диапазоне значений 0,27 до 0,40 и составляют в среднем 0,35, можно записать следующее выражение:

$$\eta_{гр.i} \approx 0,35 \eta_{mi} \quad (4.48)$$

Далее, подставляя уравнения 4.46-4.48 в формулы 4.30 и 4.31 и выражая аргумент z (приравнивая при этом параметры $i(z)_{кр.ч.}$ и $\varepsilon(z)_{кр.ч.}$ к соответствующим критериальным значениям $i = 4 \cdot 10^{-3}$ и $K = 2 \cdot 10^{-4}$), определяем зависимости для нахождения абсцисс $z_{о.д.}$. Подставляя последние в выражение 4.29 и производя некоторые математические преобразования получим итоговую систему уравнений для определения величины граничного угла δ_i на заданный момент времени на основании учета критериев наклона и кривизны:

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{если } \left\{ v_i = \frac{H \operatorname{ctg} \delta_{0i}}{\eta_{mi}} \geq 260,5 \right\} \wedge \left\{ v_k = \frac{H^2 \operatorname{ctg}^2 \delta_{0i}}{\eta_{mi}} \geq 9432,6 \right\} \Rightarrow \\ \quad \Rightarrow \text{зона опасных сдвижений отсутствует,} \\ \quad \quad \quad \text{иначе } \delta_i = \min(\delta_{ii}, \delta_{ki}) \\ \delta_{ii} = \begin{cases} 89,9^\circ \text{ при } v_i \geq 260,5 \\ \operatorname{arcctg} \left(\left[0,03 + \sqrt{0,93 - 3,57 \cdot 10^{-3} v_i} \right] \operatorname{ctg} \delta_{0i} \right) \text{ при } v_i < 260,5 \end{cases} \\ \delta_{ki} = \begin{cases} 89,9^\circ \text{ при } v_k \geq 9432,6 \\ \operatorname{arcctg} \left(\left[0,79 + \sqrt{0,04 - 4,23 \cdot 10^{-6} v_k} \right] \operatorname{ctg} \delta_{0i} \right) \text{ при } v_k < 9432,6 \end{cases} \end{array} \right. \quad (4.49)$$

где v_i и v_k – вспомогательные коэффициенты, применяемые для упрощения записи итогового результата.

Дополнить полученную систему уравнений 4.49 можно учетом угла сдвига δ_{ei} , определенного на основании аналогии с вышеописанным «теоретико-эмпирическим» подходом для условий полной подработки земной поверхности. В рассматриваемой ситуации зависимость для расчета горизонтальных деформаций по длине краевой части полумульды сдвига не будет принципиально отличаться от выражения 4.27. Тогда, с учетом небольшого завышения ранее определенного эмпирического коэффициента k_ξ до 3,0, можно записать:

$$\varepsilon_i(l_o) = 48 \frac{\eta_{mi} m_q (H \operatorname{ctg} \delta_{0i} - l_o)}{D^2 H \operatorname{ctg} \delta_{0i}} \quad (4.50)$$

где D – ширина выработанного пространства, м.

Приравняв величину $\varepsilon_i(l_o)$ в формуле 4.50 к критериальному значению $\varepsilon = 2 \cdot 10^{-3}$ и выражая параметр l_o , определим зависимость для расчета угла сдвига δ_{ei} . Подставляя последнюю в выражение 4.49, получим итоговую систему уравнений для определения угла сдвига δ_i на рассматриваемый период времени в условиях неполной подработки земной поверхности:

$$\left\{ \begin{array}{l}
 \text{если } \left\{ v_i = \frac{H \operatorname{ctg} \delta_{0i}}{\eta_{mi}} \geq 260,5 \right\} \wedge \left\{ v_k = \frac{H^2 \operatorname{ctg}^2 \delta_{0i}}{\eta_{mi}} \geq 9432,6 \right\} \wedge \\
 \wedge \left\{ v_\varepsilon = \frac{24000 \eta_{mi} m_q}{D^2} \leq 1 \right\} \Rightarrow \text{зона опасных сдвижений отсутствует,} \\
 \qquad \qquad \qquad \qquad \qquad \qquad \qquad \qquad \qquad \text{иначе } \delta_i = \min(\delta_{ii}, \delta_{ki}, \delta_{\varepsilon i}) \\
 \delta_{ii} = \begin{cases} 89,9^\circ \text{ при } v_i \geq 260,5 \\ \operatorname{arcctg} \left(\left[0,03 + \sqrt{0,93 - 3,57 \cdot 10^{-3} v_i} \right] \operatorname{ctg} \delta_{0i} \right) \text{ при } v_i < 260,5 \end{cases} \\
 \delta_{ki} = \begin{cases} 89,9^\circ \text{ при } v_k \geq 9432,6 \\ \operatorname{arcctg} \left(\left[0,79 + \sqrt{0,04 - 4,23 \cdot 10^{-6} v_k} \right] \operatorname{ctg} \delta_{0i} \right) \text{ при } v_k < 9432,6 \end{cases} \\
 \delta_{\varepsilon i} = \begin{cases} 89,9^\circ \text{ при } v_\varepsilon \leq 1 \\ \operatorname{arcctg} \left(\frac{\eta_{mi} m_q \operatorname{tg} \delta_{0i}}{\eta_{mi} m_q - 4,17 \cdot 10^{-5} D^2} \right) \text{ при } v_\varepsilon > 1 \end{cases}
 \end{array} \right. \quad (4.51)$$

где v_i , v_k и v_ε – вспомогательные коэффициенты, применяемые для упрощения записи итогового результата;

H – глубина до подошвы нижнего пласта над границей отработки запасов, м;

δ_{0i} – величина граничного угла на рассматриваемый момент времени, °;

η_{mi} – фактическое или прогнозное максимальное оседание в полумульде сдвижения на заданный момент времени, м;

m_q – средняя мощность наносов на рассматриваемом участке отработки запасов, м;

D – ширина выработанного пространства, м.

Разработанный и апробированный в рамках выполненного исследования методический подход может быть применен к новым данным натуральных инструментальных наблюдений для уточнения полученных результатов.

4.4 Выводы

1. В условиях отработки запасов на ВКМС значения граничных углов δ_0 подвержены изменениям на начальном этапе развития процесса сдвижения и

зависят, главным образом, от отношения достигнутого оседания над центром зоны, примыкающей к постоянной границе выработанного пространства $\eta(t_i)$ к максимальному расчетному значению η_m ;

2. Установлена математическая модель 4.3, позволяющая оценить изменение граничного угла во времени. В случае отсутствия инструментальных наблюдений на рассматриваемом участке шахтного поля вместо параметра $\eta(t_i)$ уместно использовать прогнозное значение оседания $\eta_{om}(t)$ на рассматриваемый период времени. Результаты вычисления граничного угла δ_0 на конец процесса сдвижения с использованием полученного выражения согласуются с фиксированной величиной $\delta_0 = 55$, регламентированной последними версиями «Указаний» 2014 г. и 2022 г. Таким образом, полученную модель можно считать актуализированной альтернативой, используемой в настоящее время на практике фиксированной величины граничного угла δ_0 ;

3. Выявлено, что величины углов полных сдвижений ψ на ВКМС в условиях однородного строения геомеханической системы не склонны к выраженным изменениям во времени, при этом, их численные значения имеют тесную взаимосвязь со скоростями оседаний подрабатываемого массива горных пород $\dot{\eta}$ в начальный период времени (особо значимы первые 5 лет с момента отработки запасов). Учитывая, что упомянутые скорости $\dot{\eta}$ в обозначенный интервал времени характеризуется выраженной взаимосвязью с рассчитываемыми степенями нагружения C оставляемых междукамерных целиков, показатель C можно использовать в качестве основы для оценки величин углов ψ . Полученные в ходе исследования результаты удобно представить в виде следующего выражения:

$$\psi = \begin{cases} 45^\circ, & \text{при } C_m < 0,30 \\ 41,8 C_m + 32,6, & \text{при } 0,30 \leq C_m \leq 0,75 \\ 64^\circ, & \text{при } C_m > 0,75 \end{cases}$$

где C_m – наибольшее значение степени нагружения среди отработанных пластов на рассматриваемом участке шахтного поля.

Из приведенной зависимости видно, что значения углов ψ могут отличаться до 10° от используемой в настоящее время на практике фиксированной величины 55° , что является довольно существенным обстоятельством при определении длины полумульды сдвижения L .

Отдельно важно выделить случай, когда над каким-либо анализируемым участком отработки запасов произошла внезапная значительная активизация процесса сдвижения (например, в случае массового обрушения междупластья). В этой ситуации ранее определенные углы полных сдвижений ψ нуждаются в пересмотре в соответствии с вновь установившимися скоростями оседаний и степенями нагружения междукламерных целиков;

4. На основании полученных результатов исследования, уместно дополнительно уточнен коэффициент χ , характеризующий условие полной подработки:

$$\begin{aligned} \chi &> 2,00, \text{ при } C_m < 0,30 \\ \chi &\geq 2 \operatorname{ctg}(41,8 C_m + 32,6), \text{ при } 0,30 \leq C_m \leq 0,75 \\ \chi &> 0,97, \text{ при } C_m > 0,75 \end{aligned}$$

Использование полученных результатов исследования позволило существенно расширить диапазон условий, при которых наблюдается полная подработка земной поверхности. Об этом свидетельствуют значимые отличия (до 0,6) рассчитанных предельных коэффициентов χ от применяемого в настоящее время значения 1,4;

5. В условиях, когда граничные зоны или зоны смягчения характеризуются более поздними сроками отработки запасов и/или меньшими расчетными значениями показателей степени нагружения оставляемых междукламерных целиков C и/или меньшими суммарными максимальными оседаниями $\sum \eta_m$ относительно остальной совокупности смежных с ними зон возможно некоторое удлинение полумульды сдвижения, вызванное уменьшением видимых углов полных сдвижений. Последние, в контексте рассматриваемой ситуации, удобно

обозначить как ψ' . Выполненные исследования позволили установить зависимость 4.8 для определения углов ψ' .

При $\psi' \geq \psi$ анализируемую геомеханическую систему из совокупности зон можно условно считать однородной и в качестве угла полных сдвижений использовать величину ψ .

В случае выраженное неоднородности геомеханической системы в совокупности зон, следующих за граничной, целесообразно усреднение параметров отработки запасов на участке, протяженностью $H_{с.гр.} \cdot \operatorname{ctg} 45^\circ = H_{с.гр.}$;

6. При выраженной однородности строения геомеханической системы, относительной близости сроков отработки запасов и закладки выработанного пространства в совокупности зон, слагающих рассматриваемый участок, а также при отсутствии значительных перепадов глубин разработки, в качестве угла θ уместно использовать величину 90° . В остальных случаях целесообразно ограничиться значением $\theta = 95,6^\circ$, учитывая, при этом, что отклонение границы дна мульды будет тяготеть по направлению воздействия факторов (одна из смежных зон с сравнительно более высокими фактическими или прогнозными скоростями оседаний, область повышения горного давления, обусловленная выраженным ростом глубин разработки и пр.), способствующих локальному увеличению интенсивности развития процесса сдвижения. Разница между значениями угла θ , определенным в ходе выполненного исследования ($95,6^\circ$) и косвенно используемым в настоящее время на практике (90°), составляет $5,6^\circ$, что является значимым обстоятельством при расчетах длины полумульды сдвижения L ;

7. Получены «теоретико-эмпирическая» и эмпирическая зависимости, позволяющие выполнить расчёт углов сдвижения на заданный момент времени в условиях полной подработки земной поверхности. При сравнении полученных систем уравнений с применяемыми в настоящее время фиксированными величинами граничных углов, а также с ранее применяемой на практике методикой определения угла сдвижения $\delta(t_i)$, предложенной Нестеровым М.П., в качестве наиболее приемлемой и удобной для практического использования выбрана эмпирическая система уравнений 4.45;

8. Поиск выражения для определения углов сдвижения в условиях неполной подработки осложнен малочисленностью натуральных данных инструментальных наблюдений над соответствующими участками отработки запасов. Для получения приблизительной зависимости, позволяющей оценить величину угла δ_i в рассматриваемых условиях использован комбинированный подход, в основе которого лежал эмпирический учет вертикальной составляющей и «теоретико-эмпирический» учет горизонтальной составляющей процесса сдвижения земной поверхности. В результате получена система уравнений 4.51;

9. Полученные результаты исследования нуждаются в обсуждении, которое будет выполнено в следующей главе настоящей работы.

ГЛАВА 5. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ

5.1 Сравнительный анализ полученных результатов с используемыми в настоящее время нормативными значениями угловых параметров

С целью наглядного отражения отличительных особенностей полученных в ходе исследования результатов от имеющихся решений важно выполнить их сравнительное сопоставление.

Учитывая, что наиболее актуальные существующие значения, подходы и способы определения угловых параметров процесса сдвижения горных пород и земной поверхности отражены в действующих «Указаниях» [19], уместно принять их в качестве основы для последующей сравнительной оценки.

Результаты последней отражены в таблице 9.

Таблица 9 – Сравнительная оценка полученных в ходе исследования результатов с используемыми в настоящее время угловыми параметрами процесса сдвижения

Используемые угловые параметры	«Указания» [19]			Результаты исследования, полученные в настоящей работе		
	Назначение	Численные величины или определяющие зависимости	Критерии для определения фактических значений	Назначение	Численные величины или определяющие зависимости	Критерии для определения фактических значений
Граничные углы δ_0	Расчет длин полумульд сдвижения у ПГВП. Расчет размеров постоянных предохранительных целиков	$\delta_0 = 55^\circ$	-	Расчет длин полумульд сдвижения у ПГВП	$\delta_{0i} = 55 (\eta(t_i)/\eta_m)^{-0,05}, ^\circ$	$\eta = 6$ мм, $i = 0,15 \cdot 10^{-3}$ и $\varepsilon = 0,3 \cdot 10^{-3}$ при наличии опорных реперов в краевой части наблюдательной станции иначе предрасчет критерия η путем нахождения погрешности определения оседания наиболее удаленного от границы ведения горных работ репера. При невозможности осуществления отмеченного предрасчета - $i = 0,15 \cdot 10^{-3}$ и $\varepsilon = 0,3 \cdot 10^{-3}$
	Расчет длин полумульд сдвижения на смежных, временных или длительно оставленных границах выработанного пространства. Расчет временных предохранительных целиков, а также целиков для зданий за границами городской застройки	$\delta_0 = 65^\circ$				
	Расчет временных предохранительных целиков при малых величинах оседания земной поверхности	$\delta_0 \leq 75^\circ$				
Углы полных сдвижений ψ	Расчет длин полумульд сдвижения в условиях полной подработки земной поверхности	$\psi = 55^\circ$	-	Расчет длин полумульд сдвижения у ПГВП в условиях полной подработки земной поверхности при однородном строении геомеханической системы	$\psi = 45^\circ$ при $C_m < 0,30$ $\psi = 41,8^\circ C_m + 32,6$ при $0,30 \leq C_m \leq 0,75$ $\psi = 64^\circ$ при $C_m > 0,75$	$i = 0,15 \cdot 10^{-3}$ и $\varepsilon = 0,3 \cdot 10^{-3}$ учитываемые в «области максимальных оседаний» по сглаженной кривой η
				Расчет длин полумульд сдвижения у ПГВП в условиях полной подработки земной поверхности при неоднородном строении геомеханической системы	ψ_i вычисляется на основании полученной зависимости 4.8	
				Для определения местоположения плоского дна виртуальной мульды на смежных участках, различающихся по геомеханическим параметрам отработки запасов	$\psi = 55^\circ *$	
Углы максимальных оседаний θ	-	-	-	Расчет длин полумульд сдвижения у ПГВП в условиях неполной подработки	$\theta = 90^\circ$ при однородности строения геомеханической системы, иначе $\theta = 95,6^\circ$	Точка, получившая развитие наибольшего оседания
				Для определения местоположения дна разностной мульды отстраиваемой для смежных участков, различающихся по геомеханическим параметрам отработки запасов	$\theta = 90^\circ$	
Углы полных сдвижений в условиях неполной подработки ψ_0	Расчет длин полумульд сдвижения в условиях неполной подработки	$\psi_0 = 0,5 D/H, ^\circ$	-	-	-	-
Углы сдвижения δ	-	-	-	Определение границ зоны опасных сдвижений и построение предохранительных целиков под объекты на земной поверхности в условиях полной подработки земной поверхности	δ вычисляется на основании полученной зависимости 4.45	$i = 4 \cdot 10^{-3}$; $K = 2 \cdot 10^{-4} \text{ м}^{-1}$; $\varepsilon = 2 \cdot 10^{-3}$
				Определение границ зоны опасных сдвижений и построение предохранительных целиков под объекты на земной поверхности в условиях неполной подработки земной поверхности	δ вычисляется на основании полученной зависимости 4.51	
				Расчет размеров предохранительных гидроизолирующих и околоскважинных целиков, а также целиков под зоны аномального строения ВЗТ I группы. Определение пространственного положения зоны влияния солеотвала при расчете возникающей от него пригрузки на МКЦ	$\delta = 60^\circ *$	-
Углы сдвиговых нарушений δ	Расчет размеров предохранительных гидроизолирующих и околоскважинных целиков, а также целиков под зоны аномального строения ВЗТ I группы. Определение пространственного положения зоны влияния солеотвала при расчете возникающей от него пригрузки на МКЦ	$\delta = 60^\circ$	-	-	-	-

Примечание: * - обозначенные углы не исследовались в рамках настоящей работы. Их значения приняты неизменными относительно величин, применяющихся в настоящее время

На основании таблицы 9 можно отметить следующие, наиболее значимые отличительные особенности полученного в ходе выполненного исследования результата относительно данных, отраженных в действующих «Указаниях» [19]:

- Функциональное назначение граничных углов δ_0 сокращено до возможности их использования лишь для определения границы мульды сдвижения. Вместо фиксированных величин предложены зависимости, позволяющие определять значение угла δ_{0i} на рассматриваемый момент времени;

- Функциональное назначение углов полных сдвижений ψ оставлено неизменным. Вместо фиксированного их значения 55° предложены определяющие зависимости, позволяющие учесть значимые для формирования углов ψ факторы;

- Для условий неполной подработки земной поверхности предложен возврат к ранее используемым на практике до 2004 года углам максимальных оседаний θ , вместо введенных в 2008 году углов полных сдвижений в условиях неполной подработки ψ_0 (в основе их расчета лежало значение $\theta = 90^\circ$). Определено дополнительное значение угла $\theta = 95,6^\circ$ для условия выраженной неоднородности строения геомеханической системы на рассматриваемом участке шахтного поля;

- Предложен возврат к ранее использованным до 2014 года углам сдвижения δ . Установлены актуализированные зависимости для их расчёта на заданный момент времени в условиях полной и неполной подработок земной поверхности. На основании аналогии назначения углов сдвиговых нарушений (учет опасных деформаций в соляной толще) и углов сдвижения (учет опасных деформаций на земной поверхности), предложено расширение функционального назначения последних и отказ от использования первых, при этом, ранее установленная величина $\delta = 60^\circ$ не подлежала пересмотру в рамках настоящей работы;

- Добавлены критерии для определения фактических значений рассматриваемых углов по результатам натуральных инструментальных наблюдений за развитием процесса сдвижения в условиях отработки запасов рассматриваемого месторождения.

5.2 Оценка значимости полученных результатов

Для определения степени значимости полученных в ходе настоящего исследования результатов в качестве основы для последующей сравнительной оценки уместно принять таблицу 9.

Для условий нахождения угловых параметров процесса сдвижения у постоянных границ выработанного пространства с целью расчета ожидаемых деформаций важно, прежде всего, сопоставить численные значения средних квадратических погрешностей определения углов δ_0 , ψ и θ . Рассчитанные для них на основании результатов натурных инструментальных наблюдений СКП $m_{\text{ук}}$ и $m_{\text{иссл}}$ составили:

- для граничных углов $m_{\delta_0\text{ук}} = 12,7^\circ$, $m_{\delta_0\text{иссл}} = 5,5^\circ$ ($N = 121$);
- для углов полных сдвижений $m_{\psi\text{ук}} = 6,1^\circ$, $m_{\psi\text{иссл}} = 1,4^\circ$ ($N = 49$);
- для углов максимальных оседаний $m_{\theta\text{ук}} = 8,5^\circ$, $m_{\theta\text{иссл}} = 3,9^\circ$ ($N = 91$).

Представленные показатели наглядно демонстрируют снижение ошибки определения принятых во внимание углов на $4,6^\circ$ - $7,2^\circ$, что демонстрирует эффективность полученных результатов.

Далее уместно оценить, как сказанное отражается на снижении ошибок расчета длин полумульд сдвижения в условиях полной $L_{\text{п.п}}$ и неполной $L_{\text{н.п}}$ подработок земной поверхности. Сделать это наиболее удобно на основании рассмотрения погрешностей определения длин $L_{\text{п.п}}$ и $L_{\text{н.п}}$, используя в качестве основы схему, представленную на рисунке 33.

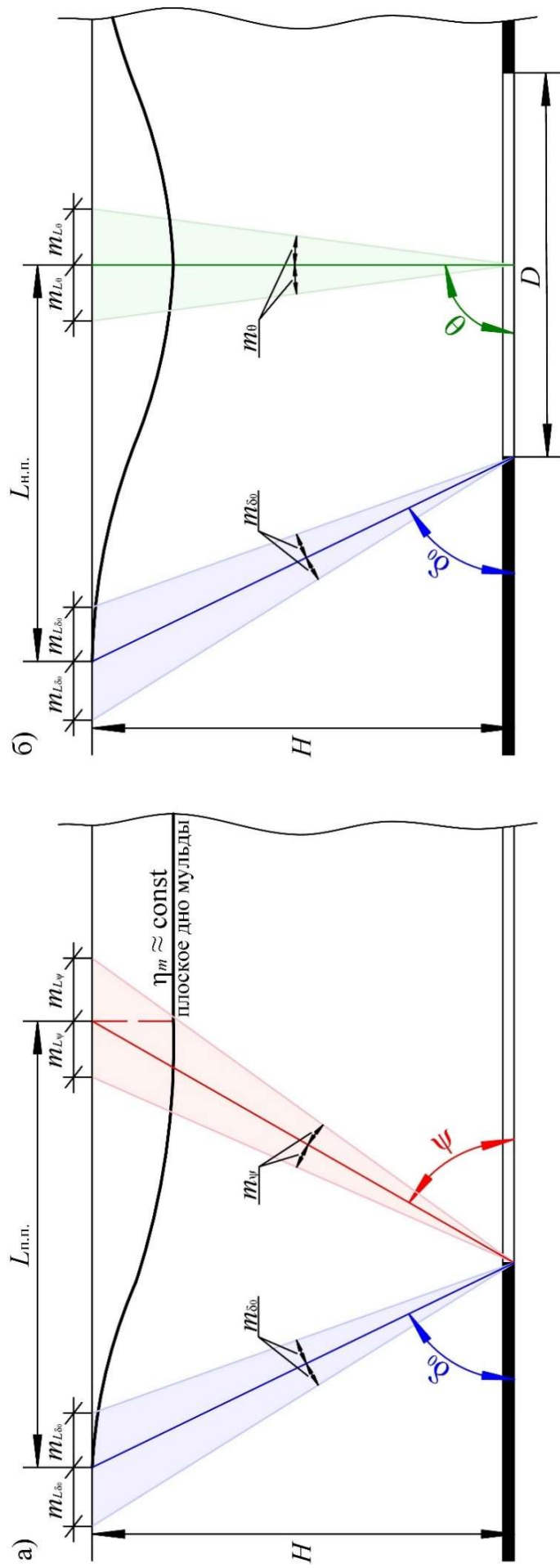


Рисунок 33 – Схема к определению погрешности длины полумульды сдвижения в условиях полной а) и неполной б) подработок земной поверхности

Из рисунка 33 видно, что СКП длин полумульд m_L формируются ошибками $m_{L\delta_0}$, $m_{L\psi}$ и $m_{L\theta}$, наличие которых, в свою очередь, вызвано погрешностями m_{δ_0} , m_{ψ} и m_{θ} . С целью получения зависимостей, позволяющих определить значения m_L , применим выражение 3.1 к уравнениям 1.35 и 2.1 (принимая при этом параметры H и D как численные коэффициенты), тогда получим следующее:

$$m_{L_{п.п.i}} = \pm \frac{\pi H}{180} \sqrt{\frac{m_{\delta_0}^2}{\sin^4 \delta_{0i}} + \frac{m_{\psi}^2}{\sin^4 \psi_i}} \quad (5.1)$$

$$m_{L_{н.п.i}} = \pm \frac{\pi H}{180} \sqrt{\frac{m_{\delta_0}^2}{\sin^4 \delta_{0i}} + \frac{m_{\theta}^2}{\sin^4 \theta_i}} \quad (5.2)$$

На основании выражений 5.1 и 5.2 несложно получить зависимости, позволяющие оценить степень повышения точности определения длин полумульд сдвижения:

$$\begin{aligned} \frac{\Delta m_{L_{п.п.i}}}{L_{п.п.i}} &= \frac{|m_{L_{п.п.i \text{ ук.}}}| - |m_{L_{п.п.i \text{ иссл.}}}|}{L_{п.п.i}} = \\ &= \frac{\pi \left(\sqrt{\frac{m_{\delta_0 \text{ ук.}}^2}{\sin^4 \delta_{0i}} + \frac{m_{\psi \text{ ук.}}^2}{\sin^4 \psi_i}} - \sqrt{\frac{m_{\delta_0 \text{ иссл.}}^2}{\sin^4 \delta_{0i}} + \frac{m_{\psi \text{ иссл.}}^2}{\sin^4 \psi_i}} \right)}{180(\text{ctg } \delta_{0i} + \text{ctg } \psi_i)} \end{aligned} \quad (5.3)$$

$$\begin{aligned} \frac{\Delta m_{L_{н.п.i}}}{L_{н.п.i}} &= \frac{|m_{L_{н.п.i \text{ ук.}}}| - |m_{L_{н.п.i \text{ иссл.}}}|}{L_{н.п.i}} = \\ &= \frac{\pi \left(\sqrt{\frac{m_{\delta_0 \text{ ук.}}^2}{\sin^4 \delta_{0i}} + \frac{m_{\theta \text{ ук.}}^2}{\sin^4 \theta_i}} - \sqrt{\frac{m_{\delta_0 \text{ иссл.}}^2}{\sin^4 \delta_{0i}} + \frac{m_{\theta \text{ иссл.}}^2}{\sin^4 \theta_i}} \right)}{90D/H + 180(\text{ctg } \delta_{0i} \pm \text{ctg } \theta_i)} \end{aligned} \quad (5.4)$$

Далее выполним последовательный анализ полученных уравнений 5.3 и 5.4.

Выражение 5.3 характеризуется относительной простотой с возможностью прямой наглядной трехмерной его интерпретации. Для удобства последующего анализа уместно графически отобразить изменение отношения $\Delta m_{L_{п.п.i}}/L_{п.п.i}$ с учетом диапазона возможных значений углов $\delta_{0i} \in [55^\circ; 90^\circ]$ и $\psi_i \in [45^\circ; 64^\circ]$, что представлено на рисунке 34.

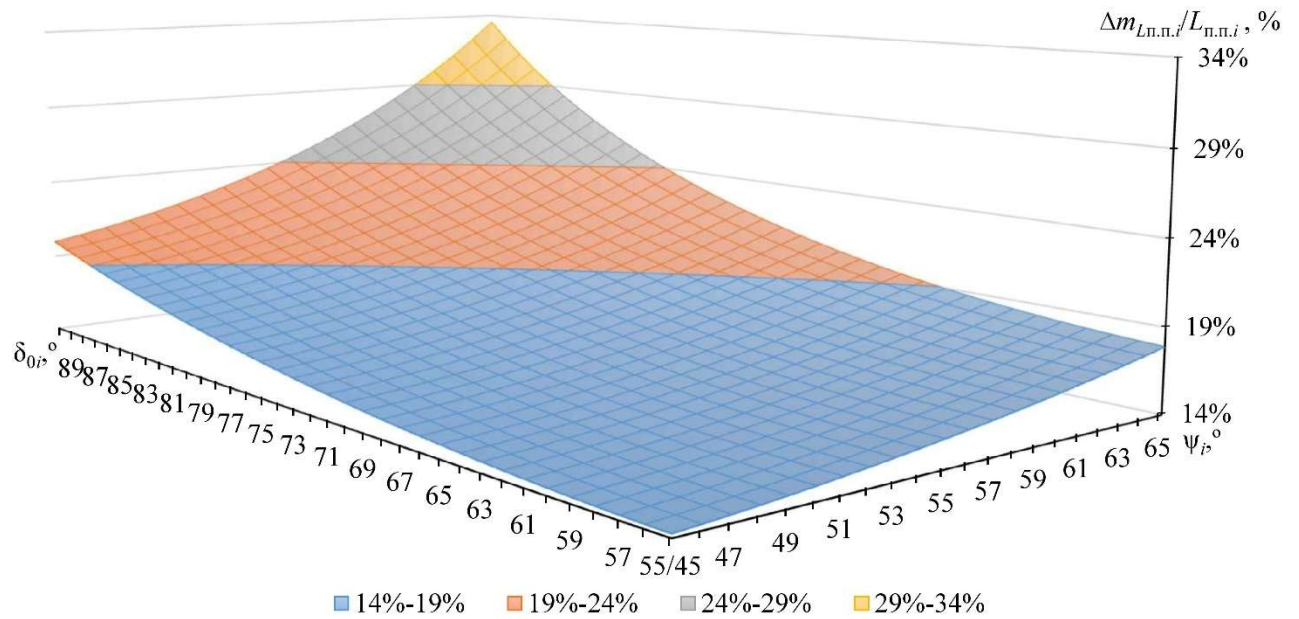


Рисунок 34 – Распределение показателей $\Delta m_{L_{п.п.i}}/L_{п.п.i}$ относительно углов δ_{0i} и ψ_i

Из рисунка 34 видно, что повышение точности определения длины полумульды сдвижения $L_{п.п.}$ наиболее сильно выражено на начальном этапе развития процесса сдвижения, когда углы δ_{0i} максимальны. Так, при $\delta_{0i} \in [70^\circ; 90^\circ]$ показатель $\Delta m_{L_{п.п.i}}/L_{п.п.i}$ составляет 15-33%, а при $\delta_{0i} \in (70^\circ; 55^\circ]$ он снижается до 14-20%. Последний диапазон значений $\Delta m_{L_{п.п.i}}/L_{п.п.i}$ наиболее важен в контексте адекватной оценки эффективности полученных результатов исследования и является прямым подтверждением их значимости.

Зависимость 5.4 имеет гораздо большую вариабельность результатов вычисления, вследствие наличия знака « \pm » и коэффициента подработки земной поверхности $\chi = D/H$, возможные значения которого, согласно разделу 4.2.2 настоящей работы, принадлежат диапазону от 0,15 до 2. Для наглядности уместно рассмотреть частный случай при среднем значении $\chi = 1,1$ и знаке «-», обеспечивающим минимизацию результата вычисления. Тогда, выражение 5.4 примет следующий вид:

$$\frac{\Delta m_{L_{п.п.i}}}{L_{п.п.i}} = \frac{\pi \left(\sqrt{\frac{m_{\delta_{0i}}^2}{\sin^4 \delta_{0i}} + \frac{m_{\theta_i}^2}{\sin^4 \theta_i}} - \sqrt{\frac{m_{\delta_{0i}}^2}{\sin^4 \delta_{0i}} + \frac{m_{\theta_i}^2}{\sin^4 \theta_i}} \right)}{99 + 180(\text{ctg } \delta_{0i} - \text{ctg } \theta_i)} \quad (5.5)$$

Графическая интерпретация выражения 5.5 с учетом диапазона возможных значений углов $\delta_{0i} \in [55^\circ; 90^\circ)$ и $\theta_i \in [90^\circ; 96^\circ)$ представлена на рисунке 35.

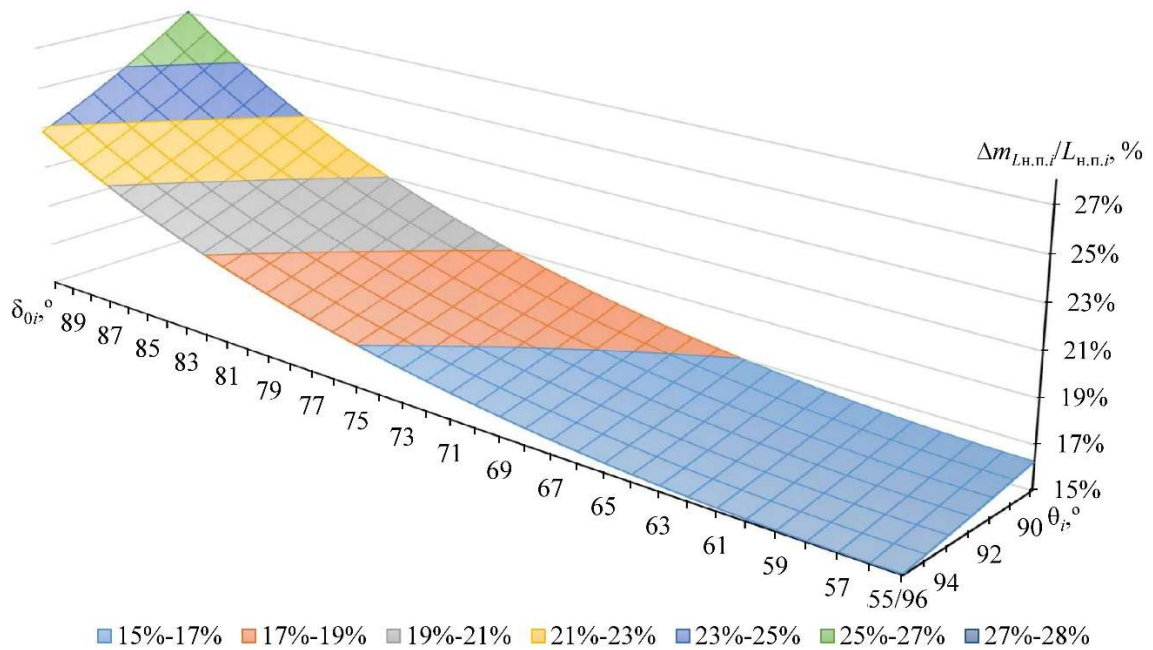


Рисунок 35 – Распределение показателей $\Delta m_{L_{н.п.i}}/L_{н.п.i}$ относительно углов δ_{0i} и θ_i

Из рисунка 35 видно, что повышение точности определения длины полумульды сдвижения $L_{н.п.}$ также наиболее сильно выражено на начальном этапе развития процесса сдвижения, когда углы δ_{0i} максимальны. В практически значимом диапазоне значений углов $\delta_{0i} \in (70^\circ; 55^\circ]$ показатель $\Delta m_{L_{н.п.i}}/L_{н.п.i}$ рассматриваемого частного случая составляет 15-17%. Исходная же зависимость 5.4 в диапазоне величин, входящих в нее параметров $\delta_{0i} \in (70^\circ; 55^\circ]$, $\theta_i \in [90^\circ; 96^\circ)$, $\chi \in (0,15;2)$ и вариаций знака « \pm », способна принимать значения от 11% до 46%, что подтверждает значимость результатов настоящего исследования.

Для углов сдвижения оценка СКП не уместна вследствие возможных вариаций фактического отсутствия или присутствия ЗОС. Идентификация отсутствия ЗОС невозможна на основании используемых в настоящее время на практике фиксированных величин угловых параметров, при этом заложена в основе полученных в ходе настоящей работы зависимостей 4.45 и 4.51. Отмеченное обстоятельство, в сочетании с выводами, сделанными в разделе 4.3.4, определяют основное преимущество практического использования полученных выражений 4.45 и 4.51.

5.3 Ограничения и перспективы дальнейшего совершенствования полученных результатов

Полученные в ходе выполненного исследования результаты адаптированы к применению, прежде всего, для условий наличия постоянных границ выработанного пространства, что является основным ограничивающим их использование фактором. К основным направлениям дальнейшего развития и совершенствования полученных результатов можно отнести следующее:

- Уточнение критериальных значений оседаний и деформаций на основе проведения опытных работ по определению величин ошибок длин интервалов и высотных положений реперов наземных наблюдательных станций, формируемых совокупностью погрешностей не инструментального характера;
- Актуализация полученных в ходе настоящего исследования величин и определяющих зависимостей для рассмотренных угловых параметров после накопления новых данных результатов инструментальных наблюдений за развитием процесса сдвижения;
- Совершенствование «теоретико-эмпирических» зависимостей 4.28 и 4.50 путем усложнения принятой во внимание модели сдвижения массива и учета дополнительных значимых для получения итогового результата факторов;
- Дополнительное независимое определение величин рассмотренных угловых параметров на основе метода численного моделирования процесса сдвижения для верификации и валидации полученных в ходе настоящего исследования результатов;
- Исследование рассмотренных угловых параметров в условиях затопленного выработанного пространства рудников;
- Изучение трансформации во времени безразмерных распределений оседаний $S(z)$, наклонов $S'(z)$, кривизны $S''(z)$, горизонтальных сдвижений $F(z)$ и горизонтальных деформаций $F'(z)$ в краевой части мульды сдвижения для условий полной и неполной подработок земной поверхности;

● Разработка методики для достоверного определения прогнозных оседаний над центральными частями выемочных граничных зон.

В дополнение к вышеизложенному особо важно отметить целесообразность проведения последующих комплексных исследований, направленных на разработку методологии по достоверному определению геометрии результирующей суммарной формы проявления сдвижений на заданный момент времени в условиях отработки запасов рассматриваемого месторождения. Сказанное представляет собой актуальную масштабную проблему, решение которой позволит не только оценивать развитие во времени деформации земной поверхности после ее подработки в произвольной точке шахтного поля, но и выполнить их перенос на уровень ВЗТ. Последнее открывает возможность реализации принципиально новых подходов в области разработки мероприятий по защите рудников от затопления.

Выбор подходов для решения вышеотмеченной проблемы должен учитывать разноразмерность выемочных зон, нередко сочетающуюся с криволинейностью их границ, что наглядно отражено на рисунке 36.

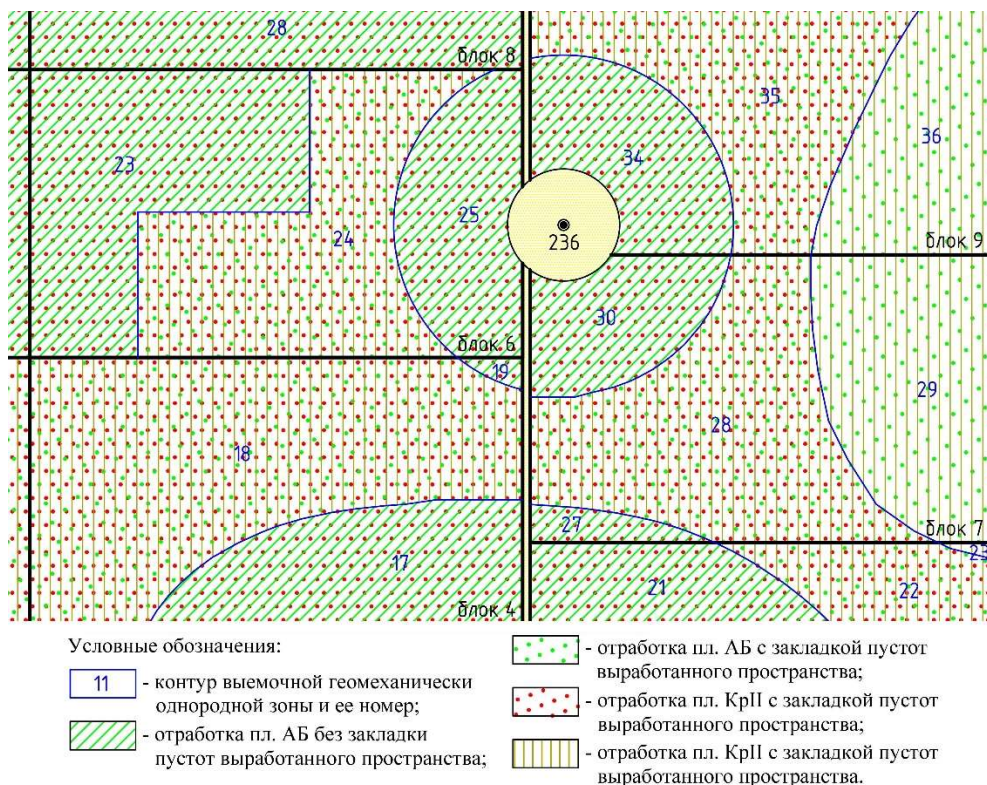


Рисунок 36 – Условный фрагмент примера плана ведения горных работ в условиях отработки запасов ВКМС

В описанных условиях особую актуальность приобретает дискретизация площадей отработки запасов, т.е. их разделение на однородные малоразмерные расчетные фрагменты. После чего над каждым из последних может быть произведен расчет прогнозного оседания, использование которого в совокупности с угловыми параметрами и безразмерным распределением оседаний позволит получить расчетные виртуальные мульды, сочетаемые впоследствии в суммарную форму проявления сдвижений. Поиск угловых параметров для описанного подхода осложнен невозможностью прямого их определения по результатам инструментальных наблюдений за развитием процесса сдвижения. Здесь величины углов или их определяющие зависимости будут представлять ценность лишь в совокупности с функцией/функциями безразмерных распределений оседаний с учетом возможной ее/их трансформации во времени.

Альтернативным вышеописанному подходу может быть использование интеграционных сеток, позволяющих оценить общее влияние подземной отработки запасов на оседание отдельно взятой в плане точки шахтного поля. В этом направлении уже известны ранее упомянутые работы [33, 40 и др.], однако лежащие в их основе величины угловых параметров и безразмерные распределения оседаний приняты на основании действующих «Указаний» [19] и требуют последующего уточнения.

Проведение вышеотмеченных комплексных исследований, направленных на получение результирующей формы проявления сдвижений на заданный момент времени можно отнести к последующей цели развития настоящей работы.

5.4 Выводы

1. Полученные в ходе настоящего исследования величины и определяющие зависимости для рассмотренных угловых параметров процесса сдвижения существенно отличаются от регламентированных последней версией «Указаний»

[19] и позволяют учесть значимые для формирования отдельных углов факторы и параметр времени;

2. Граничные углы δ_0 , углы полных сдвижений ψ и углы максимальных оседаний θ , вычисленные по результатам исследования характеризуется меньшими на $7,2^\circ$, $4,7^\circ$ и $4,6^\circ$ СКП, относительно фиксированных значений, представленных в «Указаниях» [19]. Это находит отражение в повышении точности определения длин полумульд сдвижения L на 14-20% в условиях полной подработки и на 11-46% в условиях неполной подработки земной поверхности. Отмеченные показатели значимы для повышения безопасности подрабатываемых поверхностных объектов в границах вредного влияния подземных горных работ;

3. Для углов сдвижения δ оценка СКП не уместна вследствие возможных вариаций фактического отсутствия или присутствия ЗОС. Идентификация отсутствия ЗОС не возможна на основании фиксированных величин угловых параметров, представленных в «Указаниях» [19], при этом заложена в основе зависимостей, полученных в ходе настоящей работы. На основе анализа результатов инструментальных наблюдений выявлено, что полученные из зависимости 4.45 значения углов δ_i в среднем меньше фактических $\delta_{\phi i}$ на $19,7^\circ$, что формирует значительный запас надежности определения местоположения точки с опасными деформациями земной поверхности. Сказанное подтверждает значимость полученных результатов для минимизации потерь полезного ископаемого, оставляемого в предохранительных целиках;

4. Разработанный и апробированный в рамках выполненного исследования методический подход может быть применен к новым данным натурных инструментальных наблюдений для уточнения полученных зависимостей и численных значений рассмотренных угловых параметров;

5. Основным направлением для последующего развития настоящей работы является проведение комплексных исследований, направленных на получение результирующей формы проявления сдвижений на заданный момент времени в условиях отработки запасов ВКМС.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе выполнено обоснование достаточного для практического использования в условиях ВКМС перечня угловых параметров процесса сдвижения с последующим уточнением их величин и установлением аналитических зависимостей от значимых влияющих факторов с учетом параметра времени. Полученные в ходе исследования результаты имеют большое значение для решения широкого спектра инженерных задач, связанных с прогнозированием ожидаемых деформаций, расчетом размеров предохранительных целиков, определением местоположения зон с опасными деформациями и пр.

Основные научные и практические результаты работы заключаются в следующем:

1. На основании анализа влияющих факторов и характерных геомеханических условий обоснован достаточный перечень углов (граничные δ_0 , полных сдвижений ψ , максимальных оседаний θ и сдвижения δ), необходимых для полного и достоверного учета особенностей развития процесса сдвижения, а также расчета его параметров в условиях отработки запасов на ВКМС;

2. Для принятых во внимание угловых параметров процесса сдвижения обоснованы и актуализированы значения критериев, позволяющие определять фактические величины отдельных углов на основании данных натурных инструментальных наблюдений:

- Для граничных углов δ_0 в случае наличия опорных реперов в краевой части исследуемого участка профильной линии установлена критериальная величина оседания $\eta = 6$ мм. В качестве дополнительных уточняющих критериев в области оседаний до 6 мм приняты наклон $i = 0,15 \cdot 10^{-3}$ и горизонтальная деформация $\varepsilon = 0,3 \cdot 10^{-3}$. При отсутствии опорных реперов в краевой части исследуемого участка профильной линии определена необходимость дополнительного предрасчета критерия η , который следует осуществить путем нахождения погрешности определения оседания наиболее удаленного от границы ведения горных работ

репера. В случае невозможности осуществления вышеобозначенного предрасчета, определение местоположения границы мульды предложено выполнять с использованием критериев i и ε ;

- Для углов полных сдвижений ψ в качестве основного критерия предложено значение наклона $i = 0,15 \cdot 10^{-3}$, учитываемое «области максимальных оседаний». В качестве дополнительного критерия принята величина горизонтальной деформации $\varepsilon = 0,3 \cdot 10^{-3}$;

- Для угла максимальных оседаний θ в качестве критерия принята точка, получившая развитие наибольшего оседания;

- Для углов сдвижения δ оставлены неизменными ранее установленные и используемые на практике критериальные величины деформаций $i = 4 \cdot 10^{-3}$, $K = 2 \cdot 10^{-4} \text{ м}^{-1}$, $\varepsilon = 2 \cdot 10^{-3}$;

3. Получена зависимость, позволяющая оценить изменение граничного угла во времени:

$$\delta_{0i} = 55 \left(\frac{\eta(t_i)}{\eta_m} \right)^{-0,05};$$

В случае отсутствия инструментальных наблюдений на рассматриваемом участке шахтного поля вместо достигнутого оседания над центром выемочной зоны $\eta(t_i)$ уместно использовать прогнозное значение оседания $\eta_{om}(t)$ на рассматриваемый период времени;

4. Выявлено, что величины углов полных сдвижений ψ на ВКМС в условиях однородного строения геомеханической системы не склонны к выраженным изменениям во времени, при этом, их численные значения имеют тесную взаимосвязь с наибольшими значениями степеней нагружения МКЦ C_m среди отработанных пластов на рассматриваемом участке шахтного поля и могут быть определены на основании зависимости:

$$\psi = \begin{cases} 45^\circ, & \text{при } C_m < 0,30 \\ 41,8 C_m + 32,6, & \text{при } 0,30 \leq C_m \leq 0,75 \\ 64^\circ, & \text{при } C_m > 0,75 \end{cases}$$

5. Уточнен коэффициент χ , характеризующий условие полной подработки:

$$\begin{aligned} \chi &> 2,00, \text{ при } C_m < 0,30 \\ \chi &\geq 2 \operatorname{ctg}(41,8 C_m + 32,6), \text{ при } 0,30 \leq C_m \leq 0,75 \\ \chi &> 0,97, \text{ при } C_m > 0,75 \end{aligned}$$

6. Определена зависимость, позволяющая рассчитать величины углов полных сдвижений ψ' в условиях удлинения полумульды сдвижения, когда граничные зоны или зоны смягчения характеризуются более поздними сроками отработки запасов и/или меньшими расчетными значениями показателей степени нагружения оставляемых междукамерных целиков C и/или меньшими суммарными максимальными оседаниями $\sum \eta_m$ относительно остальной совокупности смежных с ними зон:

$$\psi' = \operatorname{arctg} \frac{H_{\text{гр.}}}{D_{\text{гр.з.}} + H_{\text{с.гр.}} \operatorname{ctg} \left(48 \frac{\eta_{\text{гр.з.}i}}{\eta_{\text{с.гр.}i}} + 42 \right)}, \text{ при } \psi' < \psi$$

где $H_{\text{гр.}}$ и $H_{\text{с.гр.}}$ – глубины разработки, соответствующие среднему расстоянию от земной поверхности до почвы нижнего отработанного пласта, соответственно, над граничной зоной и над смежным участком отработки запасов до границы плоского дна мульды, м;

$D_{\text{гр.з.}}$ – размеры граничной зоны в направлении, ортогональном к рассматриваемой постоянной границе выработанного пространства (обычно, около 200 м), м;

$\eta_{\text{гр.}i}$ и $\eta_{\text{с.гр.}i}$ – достигнутые или прогнозные величины оседаний соответственно над граничной и смежной с ней зонами, м.

7. Установлено, что в качестве значения угла максимальных оседаний θ при выраженной однородности строения геомеханической системы, относительной близости сроков отработки запасов и закладки выработанного пространства в совокупности выемочных зон, слагающих рассматриваемый участок неполной подработки уместно использовать величину 90° , а в остальных случаях целесообразно ограничиться значением $\theta = 95,6^\circ$, учитывая, при этом, что

отклонение границы дна мульды будет тяготеть по направлению воздействия факторов, способствующих локальному увеличению интенсивности развития процесса сдвижения (одна из смежных зон с сравнительно более высокими фактическими или прогнозными скоростями оседаний, область повышения горного давления, обусловленная выраженным ростом глубин разработки и пр.);

8. Получены «теоретико-эмпирическая» и эмпирическая зависимости, позволяющие выполнить расчёт углов сдвижения на заданный момент времени в условиях полной подработки земной поверхности, последняя из которых является наиболее приемлемой для практического использования и может быть определена на основании системы уравнений:

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{если } s = \frac{H \operatorname{ctg} \delta_{0i}}{\eta_{mi}} \geq 452,1 \Rightarrow \text{зона опасных сдвижений отсутствует,} \\ \hspace{15em} \text{иначе } \delta_i = \min(\delta_{ii}, \delta_{ei}) \\ \delta_{ii} = \begin{cases} 89,9^\circ \text{ при } s \geq 472,6 \\ \operatorname{arcctg}([1 - 0,046\sqrt{s}] \operatorname{ctg} \delta_{0i}) \text{ при } s < 472,6 \end{cases} \\ \delta_{ei} = \begin{cases} 89,9^\circ \text{ при } s \geq 452,1 \\ \operatorname{arcctg}([-0,15 + \sqrt{1,32 - 2,87 \cdot 10^{-3} s}] \operatorname{ctg} \delta_{0i}) \text{ при } s < 452,1 \end{cases} \end{array} \right.$$

где s – вспомогательный коэффициент, применяемый для упрощения записи итогового результата;

H – глубина до подошвы нижнего пласта над границей отработки запасов, м;

δ_{0i} – величина граничного угла на рассматриваемый момент времени, °;

η_{mi} – фактическое или прогнозное максимальное оседание в полумульде сдвижения на заданный момент времени, м.

9. Найдено выражение для определения углов сдвижения в условиях неполной подработки земной поверхности на основе комбинированного подхода с эмпирическим учетом вертикальной составляющей и «теоретико-эмпирическим» учетом горизонтальной составляющей процесса сдвижения:

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{если } \left\{ v_i = \frac{H \operatorname{ctg} \delta_{0i}}{\eta_{mi}} \geq 260,5 \right\} \wedge \left\{ v_k = \frac{H^2 \operatorname{ctg}^2 \delta_{0i}}{\eta_{mi}} \geq 9432,6 \right\} \wedge \\ \wedge \left\{ v_\varepsilon = \frac{24000 \eta_{mi} m_q}{D^2} \leq 1 \right\} \Rightarrow \text{зона опасных сдвижений отсутствует,} \\ \text{иначе } \delta_i = \min(\delta_{ii}, \delta_{ki}, \delta_{\varepsilon i}) \\ \delta_{ii} = \begin{cases} 89,9^\circ \text{ при } v_i \geq 260,5 \\ \operatorname{arcctg} \left(\left[0,03 + \sqrt{0,93 - 3,57 \cdot 10^{-3} v_i} \right] \operatorname{ctg} \delta_{0i} \right) \text{ при } v_i < 260,5 \end{cases} \\ \delta_{ki} = \begin{cases} 89,9^\circ \text{ при } v_k \geq 9432,6 \\ \operatorname{arcctg} \left(\left[0,79 + \sqrt{0,04 - 4,23 \cdot 10^{-6} v_k} \right] \operatorname{ctg} \delta_{0i} \right) \text{ при } v_k < 9432,6 \end{cases} \\ \delta_{\varepsilon i} = \begin{cases} 89,9^\circ \text{ при } v_\varepsilon \leq 1 \\ \operatorname{arcctg} \left(\frac{\eta_{mi} m_q \operatorname{tg} \delta_{0i}}{\eta_{mi} m_q - 4,17 \cdot 10^{-5} D^2} \right) \text{ при } v_\varepsilon > 1 \end{cases} \end{array} \right.$$

где v_i , v_k и v_ε – вспомогательные коэффициенты, применяемые для упрощения записи итогового результата;

m_q – фактическая мощность верхнего слоя (наносов) на рассматриваемом участке отработки запасов, м;

D – ширина выработанного пространства, м.

10. Подтверждена значимость результатов исследования для минимизации потерь полезного ископаемого, оставляемого в предохранительных целиках и обеспечения безопасности подрабатываемых поверхностных объектов в границах вредного влияния подземных горных работ, что обусловлено выбранным подходом к расчету углов сдвижения δ на заданный момент времени с возможностью прямой идентификации наличия/отсутствия ЗОС, а также повышением точности определения длин полумульд сдвижения L на 14-20% в условиях полной подработки и на 11-46% в условиях неполной подработки земной поверхности.

СПИСОК УСЛОВНЫХ СОКРАЩЕНИЙ И ОБОЗНАЧЕНИЙ

ВЗТ - водозащитная толща;

ВКМС - Верхнекамское месторождение солей;

ЗОС - зона опасных сдвижений (зона опасного влияния подземных горных работ);

КМЗ - калийно-магниевая залежь;

МГ - пласт «маркирующая глина»;

МКЦ - междукамерные целики;

МХЦ - междуходовые целики;

ПдКС - подстилаяющая каменная соль;

ПКС - покровная каменная соль;

ПГВП - постоянная граница выработанного пространства;

ПП - переходная пачка;

ПЦТ - пестроцветная толща;

СКП - средняя квадратическая погрешность;

СМТ - соляно-мергельная толща;

ТКТ - терригенно-карбонатная толща;

ФМС - физико-механические свойства;

ЭВМ - электронно-вычислительные машины;

Surfer - программный продукт для трёхмерной визуализации и моделирования поверхностей, позволяющий преобразовывать сложные геопространственные данные в точные 2D и 3D-модели;

Q - четвертичные отложения.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Копнин, В. И. К условиям формирования Дуринского эрозионно-компенсационного прогиба Соликамской впадины / В. И. Копнин, В. П. Наборщиков // Труды Пермского политехнического института. – 1966. – Сборник 20. – С. 269–280.
2. Копнин, В. И. Стратификация соляной толщи Верхнекамского месторождения калийных солей / В. И. Копнин, М. А. Коротаев // Строение и условия формирования месторождений калийных солей. – Новосибирск : Наука, 1981. – С. 79–94.
3. Копнин, В. И. Соляная тектоника в Соликамской впадине и условия ее формирования / В. И. Копнин // Геология месторождений полезных ископаемых : сборник научных трудов. – Пермь : Пермский государственный технический университет, 1997. – С. 39–48.
4. Джиноридзе, Н. М. Петротектонические основы безопасной эксплуатации Верхнекамского месторождения калийно-магниевых солей / Н. М. Джиноридзе, М. Г. Аристаров, А. И. Поликарпов [и др.]. – Санкт-Петербург ; Соликамск : ОГУП «Соликамская типография», 2000. – 400 с.
5. Кудряшов, А. И. Разрывная тектоника Верхнекамского месторождения солей / А. И. Кудряшов, В. Е. Васюков, Г. С. Фон-дер-Флаасс [и др.]. – Пермь : Горный институт УрО РАН, 2004. – 194 с.
6. Кудряшов, А. И. Верхнекамское месторождение солей / А. И. Кудряшов. – 2-е изд., перераб. – Москва : ООО «РПФ» Эпсилон Плюс, 2013. – 368 с.
7. Красноштейн, А. Е. Горнотехнические аварии: затопление Первого Березниковского калийного рудника / А. Е. Красноштейн, А. А. Барях, И. А. Санфиров // Вестник Пермского научного центра УрО РАН. – 2009. – № 2. – С. 40–49.
8. Шиман, М. И. Предотвращение затопления калийных рудников / М. И. Шиман. – Москва : Недра, 1992. – 176 с.

9. Andreichuk, V. A large sinkhole in the Verchnekamsky potash basin in the Urals / V. Andreichuk, A. Eraso, M. C. Dominguez // *Mine Water and the Environment*. – 2000. – Vol. 19, iss. 1. – P. 2–18.
10. Whyatt, J. Catastrophic Failures of Underground Evaporite Mines / J. Whyatt, F. Varley // *Proceedings of the 27th International Conference on Ground Control in Mining*. – West Virginia : National Institute for Occupational Safety and Health, 2008. – P. 113–122.
11. Rauche, H. Sinkhole Formation over Flodded Potash Mines – Case Studies from the Motherland of the Potash Industry / H. Rauche // *Fall 2000 Meeting*. – San Antonio, 2000. – P. 161.
12. Борзаковский, Б. А. О возможности образования новых провалов на затопленном руднике БКПРУ-1 / Б. А. Борзаковский, В. Н. Аптуков, Л. О. Тенисон // *ГИАБ*. – 2015. – № 10. – С. 5–13.
13. Зильбершмидт, В. Г. Технология подземной разработки калийных руд / В. Г. Зильбершмидт, К. Г. Синопальников, Г. Д. Полянина [и др.]. – Москва : Недра, 1977. – 287 с.
14. Полянина, Г. Д. Технология и безопасность разработки Верхнекамского калийного месторождения / Г. Д. Полянина, А. Н. Земсков, Ю. Н. Падерин. – Пермь : Книжное издательство, 1990. – 262 с.
15. Методическое руководство по ведению горных работ на рудниках Верхнекамского калийного месторождения / Уральский филиал ВНИИГ. – М. : Недра, 1992. – 468 с.
16. Старков, Л. И. Развитие механизированной разработки калийных руд : монография / Л. И. Старков, А. Н. Земсков, П. И. Кондрашев. – Пермь ; Соликамск : Изд-во Перм. гос. техн. ун-та, 2007.
17. Соловьев, В. А. Разработка калийных месторождений : практикум / В. А. Соловьев, А. И. Секунцов. – Пермь : Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2013. – 265 с.

18. Соловьев, В. А. Аспекты повышения эффективности разработки Верхнекамского калийного месторождения / В. А. Соловьев, В. Н. Аптуков, Д. С. Чернопазов [и др.]. – Новосибирск : Наука, 2019. – 182 с.
19. Указания (мероприятия) по защите рудников ПАО «Уралкалий» от затопления и охране объектов на земной поверхности от вредного влияния подземных разработок на ВКМС. Часть 1. Основные положения. Часть 2. Методические рекомендации. – Пермь : ГИ УрО РАН, 2022.
20. Авершин, С. Г. Горные работы под сооружениями и водоемами / С. Г. Авершин. – М. : Углетехиздат, 1954. – 324 с.
21. Бахурин, И. М. Сдвигение горных пород под влиянием горных разработок / И. М. Бахурин. – М. ; Л. : Гостопиздат, 1946. – 229 с.
22. Леонтовский, П. М. Литература об обрушении и оседании пород в рудниках и о влиянии их на дневную поверхность / П. М. Леонтовский. – Екатеринбург, 1912. – 320 с.
23. Турчанинов, И. А. Основы механики горных пород / И. А. Турчанинов, М. А. Иофис, Э. В. Каспарьян. – Л. : Недра, 1977. – 503 с.
24. Shadbolt, C. H. Mining subsidence – historical and state of the art / C. H. Shadbolt // Large ground movements and structures : proc. Cardiff, 1977. – London : Plymtonth : Pentech Press, 1978. – P. 705–748.
25. Авершин, С. Г. Сдвигение горных пород при подземных разработках / С. Г. Авершин. – М. : Углетехиздат, 1947. – 245 с.
26. Бахурин, И. М. Состояние изученности сдвижений горных пород под влиянием подземных выработок / И. М. Бахурин // Труды совещания по управлению горным давлением. – М. ; Л. : Изд-во АН СССР, 1938. – С. 67–102.
27. Кратч, Г. Сдвигение горных пород и защита подрабатываемых сооружений / Г. Кратч. – М. : Недра, 1978. – 496 с.
28. Муллер, Р. А. Теоретические методы расчета сдвижений и деформаций земной поверхности, вызванных подземными горными работами / Р. А. Муллер, И. А. Петухов [и др.]. – М. : ЦНИЗИуголь, 1977. – 26 с.

29. Иофис, М. А. Инженерная геомеханика при подземных разработках / М. А. Иофис, А. И. Шмелев. – М. : Недра, 1975. – 219 с.
30. Медянцев, А. Н. Графики распределения сдвижений и деформаций земной поверхности над горными выработками в Донбассе / А. Н. Медянцев, М. А. Иофис, А. И. Мазурова. – Л. : ВНИМИ, 1962. – Сб. 47. – С. 140–154.
31. Медянцев, А. Н. Сдвигение горных пород и земной поверхности под влиянием горных выработок / А. Н. Медянцев. – Новочеркасск : НПИ, 1976. – 84 с.
32. Нестеров, М. П. Основные закономерности деформирования земной поверхности на Верхнекамском калийном месторождении и методы его предрасчета / М. П. Нестеров, Н. Ф. Аникин // Механика горных пород при разработке природных солей : тр. ВНИИГ. – Ленинград, 1974. – Вып. 67. – С. 3–21.
33. Кутовой, С. Н. Расчет прогнозных оседаний земной поверхности с использованием интеграционных сеток на примере отработки Верхнекамского месторождения калийных солей / С. Н. Кутовой // Известия вузов. Горный журнал. – 2012. – № 7. – С. 37–44.
34. Посыльный, Ю. В. Геометрия мульды сдвижения земной поверхности над горными выработками угольных шахт / Ю. В. Посыльный. – Новочеркасск : ЮРГТУ (НПИ), 2012. – 216 с.
35. Авершин, С. Г. Расчет деформаций массива горных пород под влиянием подземных разработок / С. Г. Авершин. – Л. : ВНИМИ, 1960. – 87 с.
36. Авершин, С. Г. Дифференциальное уравнение процесса сдвижения горных пород и деформаций земной поверхности в результате подземных горных работ / С. Г. Авершин, Р. А. Муллер // Вопросы проектирования и защиты зданий и сооружений от влияния горных выработок. – М. : Центрогипрошахт, 1961. – С. 9–21.
37. Земисев, В. Н. Расчеты деформаций горного массива / В. Н. Земисев. – М. : Недра, 1973. – 144 с.
38. Hudson, J. A. Engineering Rock Mechanics: An Introduction to the Principles / J. A. Hudson, J. P. Harrison. – Elsevier, 2000.

39. Brady, B. H. G. *Rock Mechanics for Underground Mining* / B. H. G. Brady, E. T. Brown. – Springer, 2004.

40. Кутовой, С. Н. Вычисление прогнозных оседаний земной поверхности над границами горных работ с использованием цифровых планов и интеграционных сеток/ С. Н. Кутовой, А. В. Катаев, Д. А. Мейстер // Известия вузов. Горный журнал. – 2014. – № 8. – С. 71–77.

41. Кузнецов, Г. Н. Экспериментальные методы исследования вопросов горного давления / Г. Н. Кузнецов // Труды совещания по управлению горным давлением. – Углетехиздат, 1948.

42. Кузнецов, Г. Н. Изучение проявлений горного давления на моделях / Г. Н. Кузнецов, М. Н. Будько [и др.]. – М. : Углетехиздат, 1959.

43. Кузнецов, Г. Н. Моделирование проявлений горного давления / Г. Н. Кузнецов, М. Н. Будько [и др.]. – Л. : ВНИМИ, 1963. – Сб. 50.

44. Колбенков, С. П. Методические указания по постановке исследований сдвига горных пород на моделях / С. П. Колбенков, В. Н. Земисев [и др.]. – Л. : ВНИМИ, 1964.

45. Оглоблин, Д. Н. Исследование процесса сдвига горных пород и земной поверхности на плоских моделях из эквивалентных материалов / Д. Н. Оглоблин, Н. М. Зоря // Горное дело. – 1958. – № 1. – С. 77–88.

46. Agioutantis, Z. Using Numerical procedures for geomechanical modeling / Z. Agioutantis // *Mineral Wealth*. – 1995. – Vol. 96. – Pp. 23–34 (in Greek).

47. Agioutantis, Z. Developing improved methods of predicting surface displacements due to underground mining through the integration of empirical indices into numerical modeling / Z. Agioutantis, M. Karmis // *Mining Science and Technology*. – Amsterdam : Elsevier Science Publishers B.V., 1988. – Vol. 7. – P. 133–148.

48. Karmis, M. Predicting subsidence with a computer / M. Karmis, A. Jarosz, Z. Agioutantis // *Coal*. – 1989. – Vol. 26, no. 12. – Pp. 54–61.

49. Karmis, M. Recent developments in the application of the influence function method for ground movement predictions in the U.S. / M. Karmis, Z. Agioutantis, A.

Jarosz // Mining Science and Technology. – 1990. – Vol. 10. – Pp. 233–245. – DOI: 10.1016/0167-9031(90)90439-Y.

50. Гавриленко, Ю. Н. Численное моделирование процессов сдвижения земной поверхности методом конечных элементов в объемной постановке / Ю. Н. Гавриленко // Физико-технические проблемы горного производства. – 2001. – Вып. 3. – С. 12–25.

51. Гавриленко, Ю. Н. Комплекс программ метода конечных элементов (МКЭ) для моделирования и анализа процессов деформирования массива горных пород и земной поверхности в условиях пластовых месторождений / Ю. Н. Гавриленко // Доклады III научно-технической конференции вузов Украины «Маркшейдерское обеспечение горных работ». – Донецк, 1995. – С. 31–35.

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

53. Коновалов, О. Л. Компьютерные технологии моделирования сдвижения земной поверхности в регионе ведения горных работ / О. Л. Коновалов, М. А. Журавков // Вестник пермского государственного технического университета. Геология, геоинформационные системы, горно-нефтяное дело. – 2009. – № 4 (т. 8). – С. 90–98.

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

55. 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.

56. Барях, А. А. Разрушение водоупорных толщ при крупномасштабных горных работах. Ч. II / А. А. Барях, Н. А. Самоделкина // ФТПРПИ. – 2012. – № 6. – С. 12–20.

57. Кашников, Ю. А. Прогноз сдвижений горных пород и земной поверхности при разработке рудных месторождений / Ю. А. Кашников, С. Г. Ашихмин, Д. В. Шустов // Маркшейдерский вестник. – 2010. – № 4. – С. 61–62.

58. Кашников, Ю. А. Численная модель расчета напряженно-деформированного состояния горного массива и земной поверхности при добыче калийных руд / Ю. А. Кашников, С. Г. Ашихмин // Маркшейдерский вестник. – 2002. – № 3. – С. 41–46.

59. 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 : 05.15.11 / А. О. Ермашов. – Пермь, 2015. – 133 с.

60. Нестеров, М. П. Основные особенности закономерностей деформаций земной поверхности на калийных рудниках / М. П. Нестеров, А. В. Львова, Н. Ф. Аникин // Строительные конструкции. – Киев : «Будивельник», 1974. – Вып. 23.

61. Нестеров, М. П. Особенности процесса деформирования земной поверхности на калийных месторождениях и специфика их учета при выборе конструктивных мер защиты подрабатываемых объектов / М. П. Нестеров // Доклады на международном Симпозиуме по защите окружающей среды от последствий подземной эксплуатации минерального сырья. – Тузла (Югославия), 1975. – С. 179–183.

62. Нестеров, М. П. Оседания земной поверхности при разработке калийных месторождений и горно-технические меры уменьшения их вредного влияния / М. П. Нестеров // Доклады на III международном симпозиуме по маркшейдерскому делу. – Леобен (Австрия) : Горный ун-т, 1976. – Том 3.

63. Аникин, Н. Ф. Развитие сдвижения земной поверхности во времени на Верхнекамском калийном месторождении при системах с поддатливыми целиками / Н. Ф. Аникин // Сдвижение земной поверхности и толщи на калийных месторождениях. – Л. : ВНИИГ, 1977. – С. 3–14.

64. Аникин, Н. Ф. Особенности формирования краевых частей мульды сдвижения в условиях Верхнекамского месторождения / Н. Ф. Аникин, А. В. Львова, Э. Ф. Бешенцева // Контроль, прогнозирование и управление состоянием пород в калийных рудниках : сб. науч. тр. – Ленинград : ВНИИГ, 1985. – С. 152–160.

65. Тенисон, Л. О. Разработка методики определения деформаций земной поверхности при ее многократной подработке : дис. ... канд. техн. наук : 25.00.20 / Л. О. Тенисон. – Пермь, 2012. – 172 с.

66. Кашников, Ю. А. Механика горных пород при разработке месторождений углеводородного сырья / Ю. А. Кашников, С. Г. Ашихмин. – М. : ООО «Недра-Бизнесцентр», 2007. – 467 с.

67. Нестеров, М. П. Прогнозирование оседаний земной поверхности с использованием графиков-аналогов / М. П. Нестеров, И. В. Осипова // Контроль, прогнозирование и управление состоянием пород в калийных рудниках : сб. науч. тр. – Л. : ВНИИГ, 1985. – С. 132–143.

68. Нестеров, М. П. Прогнозирование оседаний земной поверхности на подрабатываемых территориях калийных месторождений с использованием ЭВМ / М. П. Нестеров, В. Л. Кипенев // Контроль, прогнозирование и управление состоянием пород в калийных рудниках : сб. науч. тр. – Л. : ВНИИГ, 1985. – С. 160–167.

69. Казаковский, Д. А. Сдвигание земной поверхности под влиянием горных разработок / Д. А. Казаковский. – Москва ; Харьков : Углетехиздат, 1953. – 228 с.

70. Викторов, С. Д. Сдвигание и разрушение горных пород / С. Д. Викторов, С. А. Гончаров, М. А. Иофис. – М. : Наука, 2005. – 277 с.

71. Акимов, А. Г. Зависимость величин углов сдвижения от степени подработанности земной поверхности (на примере Золотушинского рудника) / А. Г. Акимов // Тр. ВНИИМ. – 1964. – Сб. 52. – С. 213–215.

72. Чураков, С. М. К вопросу о характере изменения граничных углов и углов сдвижения в массиве горных пород / С. М. Чураков // Уголь. – 1964. – № 4. – С. 69–72.

73. Лицкович, С. М. К вопросу о граничных линиях сдвижения и углах сдвижения при работе на больших глубинах / С. М. Лицкович // Уголь. – 1965. – № 2. – С. 25–27.

74. Иофис, М. А. Еще раз о рациональных способах подготовки и системах разработки сближенных пластов / М. А. Иофис, В. А. Верлашкин // Уголь. – 1964. – № 2. – С. 62–65.

75. Иофис, М. А. Определение оптимальных размеров предохранительных целиков угля в Донбассе / М. А. Иофис, А. Н. Медянец // Разработка месторождений полезных ископаемых. – Киев : ТЕХНІКА, 1975. – С. 40–43.

76. Медянец, А. Н. Углы сдвижения горных пород в Донецком и Карагандинском угольных бассейнах / А. Н. Медянец // Тр. ВНИМИ. – Л., 1959. – № 36. – С. 87–93.

77. Шадрин, А. Г. Преобразование формы и угловых параметров процесса сдвижения с глубиной горных работ на рудных месторождениях / А. Г. Шадрин, М. А. Шадрин // Записки горного института. – Санкт-Петербург, 2010. – № 185. – С. 71–75.

78. Назаренко, В. А. Исследование зависимости граничных углов от мощности наносов и глубины разработки / В. А. Назаренко, И. Е. Балафин // Наукові праці УкрНДМІ НАН України. – Донецьк : УкрНДМІ НАН України, 2011. – Вып. 9. – С. 180–189.

79. Гвинианидзе, Д. В. Исследование граничных угловых параметров на шахтах Западного Донбасса / Д. В. Гвинианидзе, В. А. Назаренко, А. С. Кучин // Геотехнічна механіка : межвед. сб. науч. тр. – Днепропетровск : ИГТМ НАНУ, 2013. – Вып. 110. – С. 50–62.

80. Щедрина, Н. Н. Определение угла сдвижения земной поверхности и массива горных пород на месторождениях с неизученным характером процесса сдвижения / Н. Н. Щедрина // Маркшейдерия и недропользование. – Москва, 2013. – № 6. – С. 53–56.

81. Онищенко, А. В. Расчет углов сдвижения в разных слоях горных пород по результатам наблюдений за сдвижением земной поверхности / А. В. Онищенко // Изв. вузов. Горный журнал. – 1968. – № 1. – С. 35–38.

82. Назаренко, В. А. Методика определения угловых параметров сдвижения горных пород на месторождениях с большой мощностью наносов / В. А. Назаренко,

В. И. Мякенький, А. В. Онищенко // Разработка месторождений полезных ископаемых. – К., 1992. – Вып. 91. – С. 88–91.

83. Мякенький, В. И. Определение приведенных граничных угловых параметров для основных угольных бассейнов СНГ по известным граничным углам и углам полных сдвижений / В. И. Мякенький, В. В. Мякенький, Е. В. Беличенко // Национальная горная академия Украины. – 2001. – № 8. – С. 145–149.

84. Иванова, О. В. Оптимизация построения предохранительных целиков : дис. ... канд. техн. наук : 25.00.16 / О. В. Иванова. – Новочеркасск, 2004. – 101 с.

85. Тетерин, А. В. Обоснование параметров сдвижения земной поверхности при ее многократной подработке в условиях подземной разработки угольных пластов : дис. ... канд. техн. наук : 25.00.16 / А. В. Тетерин. – Шахты, 2004. – 171 с.

86. Шадрин, А. Г. Способ определения угловых параметров процесса сдвижения горных пород и земной поверхности при подземной разработке рудных месторождений : пат. 2390635 РФ / А. Г. Шадрин, М. А. Шадрин. – Оpubл. 27.05.2010. – Бюл. № 15.

87. Балафин, И. Е. Анализ угловых параметров сдвижения земной поверхности на шахтах Западного Донбасса / И. Е. Балафин // Науковий вісник НГУ. – 2010. – № 5. – С. 18–20.

88. Колесник, Н. А. Мульда сдвижения и граничные углы в коренных породах при отработке лав по диагональным к простиранию направлениям / Н. А. Колесник // Геотехническая механика : межвед. сб. науч. тр. – Днепропетровск, 2014. – Вып. 118. – С. 191–200.

89. Колесник, Н. А. Углы полных сдвижений и углы максимальных оседаний при отработке лав по диагональным к простиранию пласта направлениям / Н. А. Колесник // Записки Горного института. – 2017. – Т. 225. – С. 298–306.

90. Правила охраны сооружений и природных объектов от вредного влияния подземных горных разработок на угольных месторождениях / Министерство угольной промышленности СССР. – М. : Недра, 1981. – 288 с.

91. Правила охраны сооружений и природных объектов от вредного влияния подземных горных разработок на угольных месторождениях. – СПб., 1998. – 291 с.

92. Кулибаба, С. Б. О границах мульды сдвижения / С. Б. Кулибаба // Сдвигение земной поверхности и устойчивость откосов. – Л. : ВНИМИ, 1980. – С. 57–60.
93. Мякенький, В. И. Обоснование критериев граничных углов / В. И. Мякенький // Маркшейдерское дело в социалистических странах. – Л. : ВНИМИ, 1988. – Т. 11. – С. 213–216.
94. Посыльный, Ю. В. Геометрия мульды сдвижения земной поверхности над горными выработками угольных шахт : дис. ... докт. техн. наук : 25.00.16 / Ю. В. Посыльный. – Москва, 2001. – 342 с.
95. Посыльный, Ю. В. Обоснование граничного критерия процесса сдвижения земной поверхности / Ю. В. Посыльный // Горный информационно-аналитический бюллетень. – Москва, 2008. – № 2. – С. 104–114.
96. Посыльный, Ю. В. Активизация процесса сдвижения земной поверхности при выемке каменного угля лавой № 109 шахты алмазная (Восточный Донбасс) / Ю. В. Посыльный, Ю. С. Щегольков // Маркшейдерия и недропользование. – Москва, 2018. – № 1. – С. 46–53.
97. Посыльный, Ю. В. Влияние смежной лавы на сдвигение земной поверхности в условиях шахты «Алмазная» (лавы № 109 и 111) / Ю. В. Посыльный, Ю. С. Щегольков // Маркшейдерия и недропользование. – Москва, 2018. – № 4. – С. 53–58.
98. Ren, G. A study of angle of draw in mining subsidence using numerical modeling techniques / G. Ren, J. Li // Electron J Geotech Eng. – 2008. – 13 (Bund. F). – P. 1–13.
99. Vyazmensky, A. Numerical modelling of surface subsidence associated with block cave mining using a finite element/discrete element approach / A. Vyazmensky. – PhD thesis. – Vancouver, Canada : Simon Fraser University, 2008.
100. Журавков, М. А. Технологии компьютерного моделирования сдвижений земной поверхности / М. А. Журавков, О. Л. Коновалов, А. В. Круподеров // Маркшейдерский вестник. – 2008. – № 4. – С. 31–37.

101. Лонжид, Э. Определение граничных углов четвертичного отложения на основе физико-механических свойств горных пород / Э. Лонжид // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2017. – № 4. – С. 337–344.

102. Нестеров, М. П. Метод определения углов сдвижения земной поверхности на заданный период времени при отработке калийных месторождений / М. П. Нестеров // Механика горных пород при разработке месторождений природных солей : тр. ВНИИГ. – Ленинград, 1974. – Вып. 67. – С. 69–74.

103. Гудков, В. М. Математическая обработка маркшейдерско-геодезических измерений : учеб. для вузов / В. М. Гудков, А. В. Хлебников. – М. : Недра, 1990. – 335 с.

104. Азаров, Б. Ф. Решение задач по теории ошибок геодезических измерений / Б. Ф. Азаров, И. В. Карелина. – Барнаул : Изд-во АлтГТУ, 2013. – 29 с.

105. Единый проект производства маркшейдерских работ на объектах ПАО «Уралкалий». – 3-е изд. – Березники, 2018.

106. Михайлова, Т. В. Сдвигение и деформации пород и земной поверхности при ведении горных работ / Т. В. Михайлова, Т. Б. Рогова. – Кемерово : КузГТУ, 2017. – 110 с.

107. РД 07-166-97: Инструкция по наблюдениям за сдвигениями земной поверхности и расположенными на ней объектами при строительстве в Москве подземных сооружений.

108. Гмурман, В. Е. Теория вероятностей и математическая статистика : учебное пособие для вузов / В. Е. Гмурман. – М. : Высш. шк., 2003. – 479 с.

109. Указания по защите рудников от затопления и охране объектов на Верхнекамском месторождении калийно-магниевых солей. – Санкт-Петербург ; Пермь, 2014.

110. Кузнецов, М. А. Сдвигение горных пород на рудных месторождениях / М. А. Кузнецов, Л. Г. Акимов, В. И. Кузьмин, М. Г. Пантелеев, М. Ф. Чернышев. – Москва : Недра, 1971. – 224 с.

111. Букринский, В. А. Сдвигение горных пород и земной поверхности при подземных разработках / В. А. Букринский, Г. В. Орлов. – Москва : Недра, 1984. – 247 с.
112. Викторов, С. Д. Механика сдвига и разрушения горных пород / С. Д. Викторов, С. А. Гончаров, М. А. Иофис, В. М. Закалинский ; отв. ред. К. Н. Трубецкой. – Москва : РАН, 2019. – 360 с.
113. Борисов, А. А. Механика горных пород и массивов / А. А. Борисов. – Москва : Недра, 1980. – 360 с.
114. Литвинский, Г. Г. К теории сдвига подработанного породного массива / Г. Г. Литвинский // Научные технологии и оборудование в промышленности и строительстве. – 2024. – № 5 (79). – С. 5–20.
115. Jahanmiri, S. Land subsidence prediction in coal mining using machine learning models and optimization techniques / S. Jahanmiri, M. Noorian-Bidgoli // Environmental Science and Pollution Research. – 2024. – Vol. 31, no. 22. – P. 31942–31966. – DOI: 10.1007/s11356-024-33300-2.
116. Zhang, L. Surface Subsidence Monitoring of Mining Areas in Hunan Province Based on Sentinel-1A and DS-InSAR / L. Zhang [et al.] // Sensors (Basel). – 2023. – Vol. 23, no. 19. – Article number: 8146. – DOI: 10.3390/s23198146.
117. Чернопазов, Д. С. Оценка параметра объемного веса пород подрабатываемой породной толщи для условий разработки Верхнекамского месторождения солей / Д. С. Чернопазов, А. И. Секунцов // Маркшейдерия и недропользование. – 2020. – № 5. – С. 11–16.
118. Чернопазов, Д. С. Закономерности распределения удельного веса пород, перекрывающих промышленную толщу Верхнекамского месторождения солей / Д. С. Чернопазов, Д. Н. Шкуратский, А. И. Секунцов // Горный журнал. – 2021. – № 4. – С. 39–45.
119. Sadd, M. H. Elasticity: Theory, Applications, and Numerics / M. H. Sadd. – Academic Press, 2025. – 648 p.

120. Барашков, В. Н. Основы теории упругости : учебное пособие / В. Н. Барашков, И. Ю. Смолина, Л. Е. Путеева, Д. Н. Песцов. – Томск : Изд-во Том. гос. архит.-строит. ун-та, 2012. – 184 с.

121. Тимошенко, С. П. Пластинки и оболочки / С. П. Тимошенко, С. Войновский-Кригер. – Москва : Наука, 1966. – 640 с.

122. Феодосьев, В. И. Сопротивление материалов / В. И. Феодосьев. – Москва : Наука, Главная редакция физико-математической литературы, 1986. – 514 с.