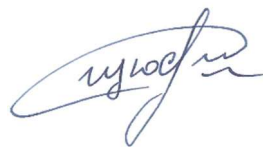


На правах рукописи



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»

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Пермь – 2026

Диссертация подготовлена в «Горном институте Уральского отделения Российской академии наук – филиале Федерального государственного бюджетного учреждения науки Пермского федерального исследовательского центра Уральского отделения Российской академии наук («ГИ УрО РАН»).

Научный руководитель: **Барях Александр Абрамович**
Руководитель научного направления «Горные науки»
Федерального государственного бюджетного
учреждения науки Пермского федерального
исследовательского центра Уральского отделения
Российской академии наук, академик РАН, доктор
технических наук, профессор (г. Пермь)

Официальные оппоненты: **Жабко Андрей Викторович**
доктор технических наук, доцент, заведующий
кафедрой маркшейдерского дела Федерального
государственного бюджетного образовательного
учреждения высшего образования «Уральский
государственный горный университет»
(г. Екатеринбург)

Милетенко Наталья Александровна
кандидат технических наук, старший научный
сотрудник Федерального государственного
бюджетного учреждения науки Института проблем
комплексного освоения недр им. академика Н.В.
Мельникова Российской академии наук (г. Москва)

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение
науки **Институт горного дела** Уральского отделения
Российской академии наук (г. Екатеринбург)

Защита состоится «24» сентября 2026 г. в _____ часов на заседании
диссертационного совета 24.1.201.02 при ПФИЦ УрО РАН по адресу: г.
Пермь, ул. Сибирская, 78а. С диссертационной работой можно
ознакомиться в библиотеке «ГИ УрО РАН» и на сайте <https://perm-sc.ru>.

Автореферат разослан «__» _____ 2026 г.

Отзывы, заверенные печатью организации, просим направлять в
двух экземплярах не позднее, чем за 10 дней до защиты диссертации. В
отзыве должны быть указаны фамилия, имя, отчество, должность,
организация, почтовый адрес, телефон и электронная почта лица,
предоставившего его.

Отзывы необходимо направлять по адресу: 614007, г. Пермь, ул.
Сибирская, 78а. Телефон / факс: +7 (342) 216-75-02. Электронная почта:
lserg@mi-perm.ru.

Учёный секретарь диссертационного совета,
кандидат технических наук



Лобанов С.Ю.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

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 (сдвигение) 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 натурных 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 междукammerных 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 подработок 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.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

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

В первой главе представлен обзор научных исследований, посвященных рассматриваемой тематике, а также выполнен анализ функционального назначения, численных величин и подходов к определению угловых параметров процесса сдвижения ранее применявшихся и применяющихся в настоящее время на ВКМС с целью выявления актуальных нерешенных задач и обоснования направленности проводимого исследования.

Во второй главе исследованы основные факторы, влияющие на вопрос классификации угловых параметров процесса сдвижения в рассматриваемых условиях и обоснован перечень наиболее значимых углов, подлежащих рассмотрению в рамках настоящей работы.

В третьей главе выбраны и обоснованы критерии для установления фактических величин рассматриваемых углов по результатам натурных инструментальных наблюдений за развитием процесса сдвижения в условиях отработки запасов ВКМС.

В четвертой главе установлены величины и получены аналитические зависимости, описывающие изменение принятых во внимание углов (граничный, полных сдвижений, максимальных оседаний и сдвижения) от наиболее значимых влияющих факторов и параметра времени.

В пятой главе выполнено обсуждение результатов исследования. Подтверждена их значимость, рассмотрены ограничения и определены актуальные направления дальнейших разработок.

В заключении сформулированы основные научные и практические выводы по работе.

Основные результаты отражены в следующих защищаемых положениях:

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.

При исследовании углов δ_0 выявлены наиболее значимые факторы, которые могли бы оказать влияние на формирование их величин. Процесс реализации сказанного, представлен на рис. 1.



Рис. 1 – Схематическое представление выявления факторов, значимых для формирования величин граничных углов δ_0

С целью оценки влияния отмеченных на рис. 1 факторов сформирован соответствующий массив данных. Для этого, из имеющихся данных удалось отобрать 17 подходящих профильных линий, имеющих выход на постоянную границу выработанного пространства и по которым ведутся систематические инструментальные наблюдения с момента, близкого к началу отработки запасов. Затем определены фактические величины углов δ_{0i} на различные даты инструментальных наблюдений из выражения:

$$\delta_{0i} = \arctg \frac{H_i}{Z_{\delta_{0ti}}},$$

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

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

За границу мульды (с учетом наличия опорных реперов в краевой ее части) принята точка, получившая оседание $\eta = 6$ мм. В качестве дополнительного уточняющего критерия использована величина наклона $i = 0,15 \cdot 10^{-3}$.

После нахождения основных параметров сформирован исходный массив данных, на основании которого выполнен многофакторный корреляционно-регрессионный анализ с уклоном

на поиск математической модели изменения граничных углов δ_0 от рассматриваемых влияющих факторов (без учета параметра C , нуждающегося в отдельном подходе для анализа). В результате отобраны наиболее значимые для углов δ_0 факторы - $\eta(t_i)$ и η_m . Корреляционное поле отношения $\eta(t_i)$ к η_m представлено на рис. 2.

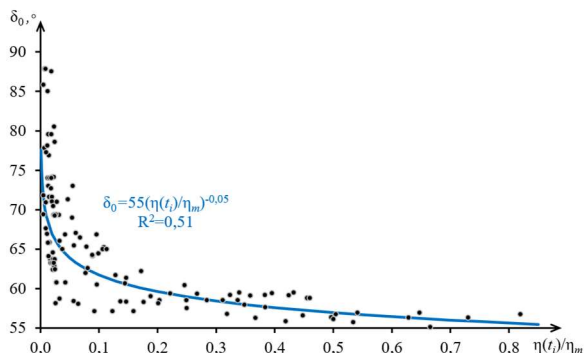


Рис. 2 – Корреляционное поле значений углов δ_0 и отношений достигнутого оседания к максимальному расчетному $\eta(t_i)/\eta_m$

Из рис. 2, видно, что изменение граничных углов δ_0 может быть описано степенной зависимостью, характеризуемой средней относительной ошибкой определения граничного угла $\varepsilon_{\text{ср.}} = 5,4\%$, максимальная ошибка при этом составляет $\varepsilon_{\text{макс.}} = 23,3\%$. Сказанное позволяет считать полученную зависимость приемлемой для практического использования.

Для оценки значимости показателя степени нагружения C . исходный массив величин углов δ_0 разделен на два диапазона ($C \leq 0,4$ и $C > 0,4$) и выполнена оценка их эмпирического корреляционного отношения $\eta_{\text{эмп}}$, показавшая отсутствие связи между δ_0 и C . Дополнительно оценена взаимосвязь годовых скоростей изменения граничных углов δ'_0 и фактических оседаний η'_t , также показавшая отсутствие связи между δ_0 и C .

На основании полученных результатов сделан 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 используемой в настоящее время фиксированной величиной угла $\delta_0 = 55^\circ$, которую можно считать приемлемой лишь для расчетов длины полумульды на конец процесса сдвижения.

Средняя квадратическая погрешность (СКП) определения рассматриваемых углов с использованием полученной зависимости на $7,2^\circ$ меньше аналогичного показателя, рассчитанного по фиксированной величине граничного угла $\delta_0 = 55^\circ$. Сказанное подтверждает достоверность полученного результата.

2. Методы определения углов полных сдвижений и максимального оседания, позволяющие получить их приемлемые значения на основе величины наибольшей степени нагружения междукammerных 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.

Для исследования углов максимальных оседаний ψ в условиях однородности строения геомеханической системы из имеющихся данных удалось отобрать 7 подходящих профильных линий по которым проводились систематические инструментальные наблюдения с момента близкого к началу отработки запасов и присутствует выраженная геометрия плоского дна. Затем определены фактические величины углов ψ на различные даты инструментальных наблюдений из следующей зависимости:

$$\psi_i = \text{arctg} \frac{H_i}{z_{\psi ti}},$$

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

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

Произведенные вычисления показали выраженное постоянство во времени численных значений углов ψ_i на каждой из рассмотренных наблюдательных станций, что определило целесообразность нахождения средних значений углов полных сдвижений $\psi_{\text{ср.}}$. Далее информация о последних дополнена численными показателями основных возможных влияющих

факторов по аналогии с рис. 1. Анализ полученного массива данных не позволил выявить какой-либо выраженной взаимосвязи величин углов $\psi_{\text{ср.}}$ с принятыми во внимание факторами.

Для обобщенной оценки влияния параметра C он рассмотрен в качестве основного фактора, определяющего интенсивность разрушения геомеханической системы и, как следствие, формирующего скорость развития процесса сдвижения $\dot{\eta}$ над рассматриваемым участком отработки запасов. Скорости процесса сдвижения по данным первого из реперов, попадающих в границу плоского дна мульды отражены на рис. 3.

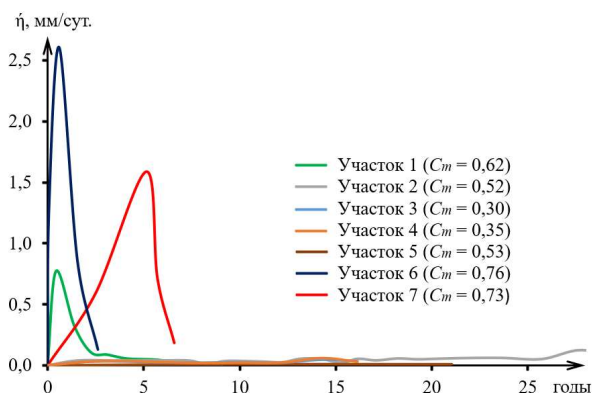


Рис. 3 - Кривые скоростей оседаний над рассматриваемыми профильными линиями

Из рис. 3 видно, что участки шахтных полей с наибольшими величинами рассчитанных средних углов $\psi_{\text{ср.}}$, 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 плановым развитием процесса сдвижения без наличия активной стадии. Описанное послужило основанием для последующего рассмотрения зависимости углов полных сдвижений $\psi_{\text{ср.}}$ от наибольших показателей степени нагружения C_m среди пластов в анализируемых зонах. Корреляционное поле $\psi_{\text{ср.}}$ и C_m , отраженное на рис. 4, имеет линейный вид и хорошо аппроксимируется полученной зависимостью с высоким коэффициентом детерминации. Относительные ошибки при этом довольно малы и составляют $\epsilon_{\text{ср.}} = 1,5\%$, $\epsilon_{\text{макс.}} = 2,6\%$.

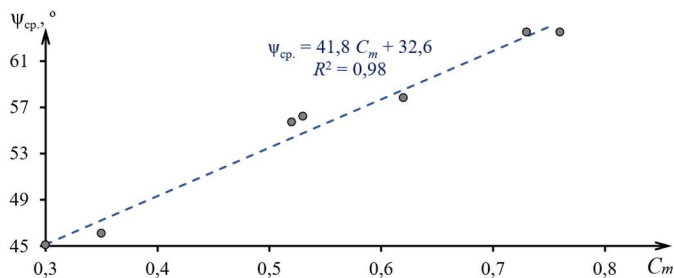


Рис. 4 - Корреляционное поле показателей $\psi_{ср}$ и C_m

На текущем этапе полученную на рис. 4 зависимость можно считать приемлемой для практического использования на интервале C_m от 0,30 до 0,75, однако, принимая во внимание малый размер выборки данных, формируется необходимость в последующих возможных ее корректировках с учетом получения новых результатов инструментальных наблюдений.

Для условий, соответствующих наличию степеней нагружения $C_m < 0,30$ 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.

СКП определения углов ψ с использованием разработанного подхода на $4,7^\circ$ меньше аналогичного показателя, рассчитанного по регламентированной фиксированной их величине $\psi = 55^\circ$. Сказанное подтверждает достоверность полученного результата.

Выполненные исследования позволили установить, что в настоящее время расчёт длины полумульды сдвижения L при неполной подработке базируется на величине угла θ , равном 90° . В простых условиях (однородный участок неполной подработки между постоянными границами) θ нет основания предполагать, что значение угла θ будет значительно отличаться от 90° . Однако выраженная неоднородность строения геомеханической системы, влияние со стороны смежной отработки и локальные повышения горного давления могут привести к отклонениям фактических значений углов θ от 90° .

Расчеты, выполненные на основании 7 отобранных локальных участков неполной подработки, показали выраженное постоянство во времени фактических углов θ_i на каждой из

рассмотренных наблюдательных станций, что послужило основанием для определения обобщенных их значений $\theta_{\text{ср.}}$ над анализируемыми участками отработки запасов. Установленные 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 ($\varepsilon_{\text{ср.}} = 1,0\%$, $\varepsilon_{\text{макс.}} = 2,1\%$).

Поиск факторов, определяющих отклонения фактических местоположений точек максимальных достигнутых оседаний от центральных частей рассмотренных участков не привел к получению однозначных результатов. В каждом случае наиболее вероятными причинами упомянутых отклонений выступали различные обстоятельства. Среди последних 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.

Учитывая малый разброс значений $\theta_{\text{ср.}}$ и объем данных, установление влияния каждого фактора нецелесообразно. Для практического использования, при наличии факторов, потенциально способствующих отклонению границы дна мульды сдвижения, принято среднее значение угла θ , равное $95,6^\circ$.

СКП определения угла θ с использованием разработанного подхода на $4,6^\circ$ меньше аналогичного показателя, рассчитанного по регламентированной фиксированной его величине $\theta = 90^\circ$. Сказанное подтверждает достоверность полученного результата.

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

Для обоснования величин углов сдвижения δ в условиях полной подработки земной поверхности приняты во внимание два принципиально различающихся подхода – «теоретико-эмпирический» и эмпирический.

Вывод аналитических зависимостей для точного определения углов сдвигения δ на основании теоретических методов исследования процесса сдвигения характеризуется высокой сложностью, а порой и невозможности получения приемлемого их вида. 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. В настоящей работе рассмотрен один из наиболее простых вариантов таких приближенных решений для возможности грубой инженерной оценки значений рассматриваемых углов δ в условиях ВКМС.

При выводе теоретической зависимости для условий полной подработки земной поверхности принята упрощенная модель подрабатываемого породного массива в виде чередующихся изотропных горизонтально залегающих породных слоев выдержанной мощности с осредненными физико-механическими свойствами. Формирование области сдвигения над нетронутым массивом, представлено следствием развития деформаций упругого расширения пород после приложения растягивающих напряжений, вызванных оседанием (прогибом) над участком отработки запасов.

Последующие рассуждения строились на основании рассмотрения напряженного состояния элементарного, бесконечно малого объема кубической формы, выделенного в произвольной точке породного массива на глубине H_j . На основе обобщенного закона Гука получены уравнения, описывающие изменение абсолютных деформаций, на которые уменьшаются размеры ребер кубика по высоте ΔdH_j и длине ΔdL_j после отработки полезного ископаемого. Учет растягивающих напряжений $\sigma_{\text{раст},j}$ выполнен на основании аналогии с моделью прогиба балки с жестко защемленными противоположными концами.

Интегрируя найденные выражения ΔdH_j и ΔdL_j , соответственно, по высоте (на интервале значений от H_j до $H - l_o \operatorname{tg} \delta_{0i}$) и длине (на интервале значений от 0 до $(H - H_j) \operatorname{ctg} \delta_{0i} - l_o$) определены зависимости для расчёта оседания $\eta(l_o)$ и горизонтального смещения $\xi_i(l_o)$ в произвольной точке исследуемой области сдвигения, выбранной на расстоянии l_o от постоянной границы выработанного пространства. Учитывая, что в основе

вывода полученных зависимостей лежит ряд существенных упрощений и допущений относительно реальных условий, выполнена их корректировка путем введения поправочных эмпирических коэффициентов - $k_\eta = 1,22$ η_{mi} и $k_\xi = 2,5$, определенных на основании результатов натурных инструментальных наблюдений.

Для определения локальных (в области сдвижения над нетронутым массивом) функций наклонов, кривизны и горизонтальных деформаций найдены производные $d\eta_i(l_o)/dl_o$, $d^2\eta_i(l_o)/d^2l_o$ и $d\xi_i(l_o)/dl_o$. Последующий анализ полученных выражений позволил исключить из дальнейшего рассмотрения кривизну. Далее, на основании некоторых математических преобразований зависимостей $i_i(l_o)$ и $\varepsilon_i(l_o)$ (с учетом опасных величин деформаций $i = 4 \cdot 10^{-3}$ и $\varepsilon = 2 \cdot 10^{-3}$) получена итоговая «теоретико-эмпирическая» система уравнений для определения угла сдвижения δ_i на рассматриваемый период времени:

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

где $\gamma_{cp.}$ – средний объемный вес налегающей толщи пород, Н/м³; $\nu_{cp.}$ – средневзвешенный коэффициент Пуассона; H – глубина до подошвы нижнего пласта над границей отработки запасов, м; $E_{cp.}$ – средневзвешенный модуль Юнга, Н/м²; m_q – средняя мощность наносов на рассматриваемом участке отработки запасов, м.

Вывод эмпирической зависимости для определения углов δ в условиях полной подработки земной поверхности основан на локальном исследовании (в области сдвижения над нетронутым массивом) базовых безразмерных распределений $S(z)_{кр.ч.}$ и $F(z)_{кр.ч.}$. Последние получены на основании обработки данных натурных инструментальных наблюдений и аппроксимированы полиномиальными функциями, представленными на рис. 5.

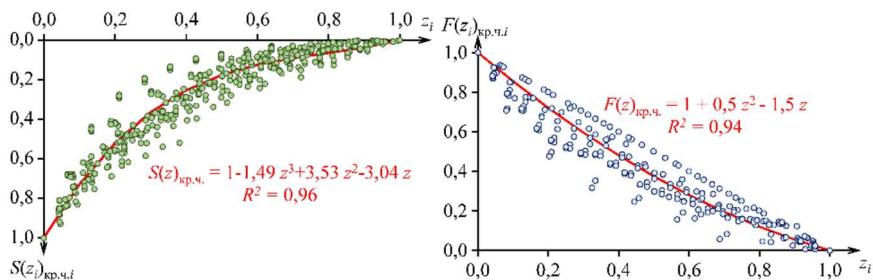


Рис. 5 - Обобщенные распределения значений функций $S(z)_{кр.ч.i}$ и $F(z)_{кр.ч.i}$ относительно их аргументов z_i

Полученные на рис. 5 полиномиальные функции преобразованы в табличный вид и путем кусочно-линейного дифференцирования найдены их производные $S(z)'_{кр.ч.}$, $S(z)''_{кр.ч.}$, $F(z)'_{кр.ч.}$. Последующий анализ полученных выражений позволил исключить из дальнейшего рассмотрения функцию $S(z)''_{кр.ч.}$. С целью обеспечения наиболее полного учета фактических максимальных деформаций табличные значения функций $S(z)'_{кр.ч.}$ и $F(z)'_{кр.ч.}$ скорректированы коэффициентами $k_i = 2,0$ и $k_\varepsilon = 2,0$, после чего преобразованы в упрощенный аналитический вид:

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

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

Последующее математическое преобразование вышепредставленных выражений с учетом выявленного соответствия $\eta_{гр.i} \approx \xi_{гр.i} \approx 0,3 \eta_{mi}$ и учета опасных величин деформаций $i = 4 \cdot 10^{-3}$ и $\varepsilon = 2 \cdot 10^{-3}$ позволило установить безразмерную абсциссу точки $z_{о.д.i}$, характеризующую опасными деформациями. На основании отметки $z_{о.д.i}$ и значения граничного угла δ_{0i} получена итоговая эмпирическая система уравнений для определения угла сдвига δ_i на рассматриваемый период времени:

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

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 зависимость.

Поиск выражения для определения углов сдвижения в условиях неполной подработки осложнен малочисленностью натурных 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.

С целью получения эмпирических уравнений, позволяющих определить угол δ_i на основании критериев наклона i и кривизны K произведена обработка натурных данных по аналогии с выше рассмотренной полной подработкой. В результате получено представленное на рис. 6 обобщенное распределение значений функции $S(z)_{кр.ч.i}$ относительно аргументов z_i .

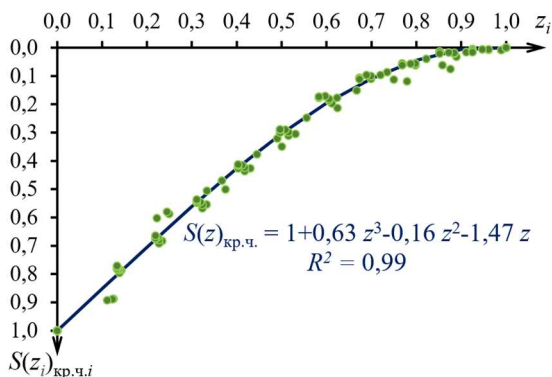


Рис. 6 - Обобщенное распределение значений функции $S(z)_{кр.ч.i}$ относительно аргументов z_i

Определение вида кривых $S(z)'_{кр.ч.}$ и $S(z)''_{кр.ч.}$ выполнено на основании табличного выражения функции $S(z)_{кр.ч.}$ с последующим кусочно-линейным ее дифференцированием и сглаживанием

полученных кривых. С целью формирования запаса надежности определения угла δ_i в текущих условиях приняты корректирующие коэффициенты $k_i = 2,0$ и $k_k = 2,0$. После преобразования табличных функций в упрощенный аналитический вид получены уравнения:

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

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

Последующее математическое преобразование полученных выражений с учетом выявленного соответствия $\eta_{\text{гр.}i} \approx 0,35 \eta_{mi}$ и учета опасных величин деформаций $i = 4 \cdot 10^{-3}$ и $K = 2 \cdot 10^{-4}$ позволило получить итоговую систему уравнений для определения величины граничного угла δ_i на заданный момент времени на основании учета критериев наклона и кривизны:

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

Представленная система уравнений дополнена учетом угла сдвижения δ_{ei} , определенного на основании аналогии с вышеописанным «теоретико-эмпирическим» подходом для условий полной подработки земной поверхности:

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

Разработанный и апробированный в рамках выполненного исследования методический подход может быть применен к новым

данным натурных инструментальных наблюдений для уточнения полученных результатов.

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;

3. Получена зависимость, позволяющая оценить изменение граничных углов δ_0 в зависимости от величины отношения достигнутого или прогнозного оседания над центром выемочной зоны $\eta(t_i)$ к максимальному расчетному ее оседанию η_m ;

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. Получено выражение для определения величины угла ψ в зависимости от значения параметра C_m ;

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 междуканальных 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. Установлены значения угла максимальных оседаний θ ;

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;

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;

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 ОСНОВНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях из Перечня ВАК:

1. Щегольков Ю. С. Обоснование критериев основных угловых параметров процесса сдвижения для условий отработки запасов Верхнекамского месторождения калийно-магниевых солей // Маркшейдерия и недропользование. 2024. № 3. С. 42-54. DOI: 10.56195/20793332_2024_3_42_54.

2. Щегольков Ю. С. Определение граничных углов процесса сдвижения земной поверхности при отработке запасов Верхнекамского месторождения калийно-магниевых солей // Маркшейдерия и недропользование. 2024. № 6. С. 25-32. DOI: 10.56195/20793332_2024_6_25_32.

3. Щегольков Ю. С. Оценка величин углов полных сдвижений и углов максимальных оседаний в условиях отработки запасов Верхнекамского месторождения калийно-магниевых солей // Маркшейдерия и недропользование. 2025. № 1. С. 61-70. DOI: 10.56195/2079-3332-2025-25-1-61-70.

4. Щегольков Ю. С. Обоснование величин углов сдвижения в условиях отработки запасов Верхнекамского месторождения калийно-магниевых солей. Часть 1. Теоретические основы и определение углов сдвижения в условиях полной подработки земной поверхности на основании теоретико-эмпирического подхода // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2026. – № 2-1. – С. 61-84. DOI: 10.25018/0236_1493_2026_21_0_61.

5. Щегольков Ю. С. Актуализация угловых параметров процесса сдвижения горных пород и земной поверхности для условий Верхнекамского месторождения калийно-магниевых солей // Маркшейдерский вестник. – 2026. – № 1. – С. 41–51.

6. Щегольников Ю. С. Обоснование угловых параметров процесса сдвижения при отработке запасов Верхнекамского месторождения калийно-магнелийных солей / Ю.С. Щегольников, А.А. Барях, Л.О. Тенисон // Горный журнал. – 2026. – № 4. – С. 68-75. DOI: 10.17580/gzh.2026.04.10.

7. Щегольников Ю. С. Обоснование величин углов сдвижения в условиях отработки запасов Верхнекамского месторождения калийно-магнелийных солей. Часть 2. Определение углов сдвижения в условиях полной подработки земной поверхности на основании эмпирического подхода. Сравнительное сопоставление полученных результатов. Углы сдвижения при неполной подработке // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2026. – № 5. – С. 155-172. DOI: 10.25018/0236_1493_2026_5_0_155.

8. Щегольников Ю. С. О подходах к выбору критериев для определения угловых параметров процесса сдвижения земной поверхности // Горный журнал. – 2026. – № 5. – С. 63-70. DOI: 10.17580/gzh.2026.05.08.

Публикации в прочих изданиях:

1. Щегольников Ю. С. Изучение процесса сдвижения горных пород и земной поверхности при подземной отработке запасов полезного ископаемого: значимость и существующие способы исследования / Сборник научных трудов по результатам I международной научно-практической конференции «Наука России: Цели и задачи» 5 октября 2025 - Изд. Научный центр «Наука России», Самара, 2025. С. 33-37

2. Щегольников Ю. С. Угловые параметры процесса сдвижения горных пород и земной поверхности при подземной разработке месторождений полезных ископаемых: анализ, классификация и функциональное назначение / Сборник научных трудов по результатам XIX международной научно-практической конференции «Новое поколение: достижения и результаты молодых ученых в реализации научных исследований», 5 ноября 2025 – Изд. Научный центр «Наука России», Москва, 2025. С. 26-30

Сдано в печать «___» _____ 2026 г.

Формат 60x84/16. Тираж 100 экз.

Отпечатано сектором НТИ
«ГИ УрО РАН»

614007, г. Пермь, ул. Сибирская, 78-а