

ОЦЕНКА ВЕЛИЧИН УГЛОВ ПОЛНЫХ СДВИЖЕНИЙ И УГЛОВ МАКСИМАЛЬНЫХ ОСЕДАНИЙ В УСЛОВИЯХ ОТРАБОТКИ ЗАПАСОВ ВЕРХНЕКАМСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ КАЛИЙНО-МАГНИЕВЫХ СОЛЕЙ

Ю. С. Щегольников✉

ПАО «Уралкалий», 618426, г. Березники, Российская Федерация

✉ rabota.shegolkov@mail.ru

Аннотация. В основе оценки безопасности объектов, подрабатываемых подземными горными работами, а также планируемых к строительству над отработанными участками шахтных полей, лежит расчет ожидаемых деформаций. Для достоверного определения последних в случае отсутствия инструментальных наблюдений над рассматриваемым участком шахтного поля высокой значимостью обладает вопрос обоснования величин углов полных сдвижений ψ и максимальных оседаний θ .

В настоящее время на практике углы θ не используются в явном виде, а фиксированные величины углов ψ не всегда позволяют достоверно вычислить длину полумульды сдвижения и, как следствие, правильно рассчитать ожидаемые деформации. Основной целью настоящей работы является обоснование углов ψ и θ для условий отработки запасов Верхнекамского месторождения калийно-магниевого солей, а также в случае целесообразности установление зависимостей, их определяющих.

В ходе проведенного исследования выявлено, что углы полных сдвижений ψ в условиях однородности строения геомеханической системы не склонны к значительным изменениям во времени и зависят главным образом от параметра степени нагружения междукammerных целиков C . Найдена причина возможного уменьшения величин ψ в условиях неоднородности строения геомеханической системы. Определено, что величины углов максимальных оседаний θ могут отличаться от 90° . Обоснованы значения и установлены математические модели для исследуемых углов ψ и θ , а также уточнены коэффициенты условия полной подработки.

Ключевые слова: углы полных сдвижений, углы максимальных оседаний, полная подработка, неполная подработка, сдвижение, мульда, безопасность подрабатываемых объектов

Благодарность: Автор выражает глубокую признательность академику РАН, д-ру техн. наук А. А. Баряху и канд. техн. наук Л. О. Тенисон за ценные советы и рекомендации.

Для цитирования: Щегольников Ю.С. Оценка величин углов полных сдвижений и углов максимальных оседаний в условиях отработки запасов Верхнекамского месторождения калийно-магниевого солей. *Маркшейдерия и недропользование*. 2025;25(1):С. 61-70. <https://doi.org/10.56195/2079-3332-2025-25-1-61-70>.

ASSESSMENT OF THE VALUES OF TOTAL SHIFTS ANGLES AND MAXIMUM SUBSIDENCE ANGLES IN CONDITIONS OF MINING RESERVES OF THE VERKHNEKAMSKOE DEPOSIT OF POTASSIUM-MAGNESIUM SALTS

Yu. S. Shchegolkov✉

PJSC «Uralkali», 618426, Berezniki, Russian Federation

✉ rabota.shegolkov@mail.ru

Abstract. The safety assessment of objects developed by underground mining operations, as well as those planned for construction over developed sections of mine fields, is based on the calculation of expected deformations. For a reliable determination of the latter, in the absence of instrumental observations over the section of the mine field under consideration, the issue of substantiating the values of the angles of total displacement ψ and maximum subsidence θ is of great importance.

At present, in practice, the angles θ are not used explicitly, and fixed values of the angles ψ do not always allow for a reliable cal-

culation of the length of the semi-trough of displacement and, as a consequence, for a correct calculation of the expected deformations. Taking into account the above, the main objective of this work is to substantiate the angles ψ and θ for the conditions of development of the reserves of the Verkhnekamskoye potassium-magnesium salt deposit, and, if appropriate, to establish the dependencies that determine them. The study revealed that the angles of total displacements ψ under conditions of homogeneity of the geomechanical system structure are not prone to significant changes over time and depend mainly on the parameter of the degree of loading of inter-chamber pillars C . The reason for the possible decrease in the values of ψ under conditions of heterogeneity of the geomechanical system structure was found. It was determined that the values of the angles of maximum subsidence θ may differ from 90° . The values are substantiated and mathematical models are established for the studied angles ψ and θ , and the coefficients of the condition of complete undermining are clarified.

Keywords: angles of total displacements, angles of maximum subsidence, complete undermining, incomplete undermining, displacement, trough, safety of undermining objects

Gratitude: The author expresses deep gratitude to Academician of the Russian Academy of Sciences, Doctor of Technical Sciences Baryakh A.A. and to Candidate of Technical Sciences Tenison L.O. for valuable advice and recommendations.

For citation: Shchegolkov YuS. Assessment of the values of total shifts angles and maximum subsidence angles in conditions of mining reserves of the Verkhnekamskoe deposit of potassium-magnesium salts. *Mine Surveying and Subsurface Use*. 2025;25(1):61-70. (In Russ.). <https://doi.org/10.56195/2079-3332-2025-25-1-61-70>.

Введение

Развитие процесса сдвижения под воздействием подземной отработки запасов способно оказывать существенное отрицательное влияние на подрабатываемые поверхностные объекты [1–7]. Мерой количественной оценки упомянутого влияния в соответствии с требованиями действующего нормативного документа [8] являются величины ожидаемых вертикальных (наклон $i(z)$, кривизна $K(z)$), радиус кривизны $R(z)$ и горизонтальных деформаций $\varepsilon(z)$. В случае отсутствия инструментальных наблюдений над анализируемым участком шахтного поля для определения величин $i(z)$, $K(z)$, $R(z)$ и $\varepsilon(z)$ необходим расчет длины полумульды L , в основе которого среди прочих параметров лежат углы ψ или θ .

Использование какого-либо из углов ψ или θ обуславливается различиями формы мульды сдвижения, соответственно, при полной и неполной подработках земной поверхности. Первая наблюдается, когда увеличение размеров выработанного пространства D способствует росту величины максимального оседания η_m , местоположение которого относительно центральной части отработанного участка определяется углом максимальных оседаний θ . Вторая возникает при достижении размеров выработанного пространства D определенной величины, после которой дальнейшего увеличения максимального оседания η_m не происходит, а образуется так называемое плоское дно мульды, которое ограничивается углами полных сдвижений ψ . В настоящее время на Верхнекамском месторождении калийно-магниевых солей (ВКМКС) условие подработки земной поверхности определяется на основании параметра χ , представляющего собой отношение размера D к глубине разработки до почвы нижнего отрабатываемого пласта H . Применительно к отдельно взятому главному сечению мульды сдвижения условию неполной подработки соответствует значение параметра $\chi < 2 \operatorname{ctg} \psi = 1,4$. При величине $\chi \geq 2 \operatorname{ctg} \psi = 1,4$ подработка характеризуется как полная.

Опираясь на содержание действующих «Указаний» [8], уместно отметить, что на сегодняшний день при расчете длины L используются фиксированные величины углов полных сдвижений $\psi = 55^\circ$ и не используются углы максимальных оседаний θ . Вместо последних применяется угол сдвижения в условиях неполной подработки ψ_0 , который по смысловой нагрузке соответствует некому аналогу угла полных сдвижений, а его расчет основывается на значении параметра χ .

Анализируя ранее действующие на ВКМКС «Указания» и «Инструкции», периодически издаваемые начиная с 1960 года, можно заметить постоянство регламентированных величин углов $\psi = 55^\circ$ (исключение составляют «Указания» 1976 года, где величина ψ составляла 50°). Углы максимальных оседаний встречались в «Указаниях» с 1976 по 1994 год, а их значение составляло $\theta = 90^\circ$. Несколько позже, в «Указаниях» 2008 года, был введен ранее упомянутый угол ψ_0 . Вследствие принятого допущения об условно горизонтальном залегании калийно-магниевого залежи классификации величин ψ , θ и ψ_0 по фактору угла падения промышленных пластов не приводилось ни в одной из версий нормативного документа.

При анализе результатов инструментальных наблюдений на различных участках шахтных полей рудников г. Березники и Соликамска было замечено, что фактические величины углов полных сдвижений ψ могут значительно отличаться от 55° , что находит отражение в правильности вычислений длин полумульд сдвижения L и, как следствие, в достоверности расчетов ожидаемых деформаций. Опираясь на изложенное, можно сделать вывод о необходимости поиска зависимости углов ψ от основных возможных влияющих факторов. Относительно угла ψ_0 справедливо заметить, что он введен в расчет длины полумульды как промежуточный этап вычислений и может быть заменен углом максимального оседания θ . Последний в настоящее время не используется на практике в явном виде и его величина требует дополнительного обоснования.

Материал и методы исследования

Исходным материалом для проведения исследования послужили результаты инструментальных наблюдений за процессом сдвижения земной поверхности, данные геологической разведки, цифровые планы шахтных полей с параметрами системы разработки, нормативные документы «Инструкции» и «Указания», издававшиеся для ВКМКС начиная с 1960 года по настоящее время.

В работе использован комплексный метод исследований, включающий анализ литературных данных и нормативной документации по рассматриваемой проблеме, отбор и анализ данных инструментальных наблюдений за сдвижением земной поверхности, аналитическую обработку исходной информации, а также регрессионный анализ.

Результаты исследования и их обсуждение

Перед проведением исследования немаловажным вопросом является выбор и обоснование характерных геомеханических условий, в рамках которых будут учитываться анализируемые угловые параметры процесса сдвижения. Рассматривая сформированную на ВКМКС геомеханическую систему в широком смысле, можно отметить, что в целом подработку земной поверхности правильнее считать комбинированной, то есть состоящей из отдельных участков полной и неполной подработок, впоследствии сочетающихся в результирующую суммарную форму проявления сдвижений, типовой пример которой представлен на рисунке 1.

Из рисунка 1 видно, что общая форма проявления сдвижений сформирована от участка отработки значительных размеров $D \approx 3,4 H$, однако при этом отсутствует видимое плоское дно мульды сдвижения и присутствует локальный оседания, по форме соответствующий условию неполной подработки. Это объясняется прежде всего неоднородностью сформированной геомеханической системы, а также различными сроками отработки запасов и закладки выработанного пространства. Таким образом, мульда сдвижения на ВКМКС характеризуется сложной формой, изменяющейся во времени на разных ее участках по различным законам, что также ранее отмечалось в работах М. П. Нестерова, Н. Ф. Аникина, А. В. Львовой и других [9–14]. Вышеописанное обстоятельство в совокупности со смысловой нагрузкой исследуемых угловых параметров [15–19] позволяет устанавливать последние лишь на отдельных интервалах результирующей формы проявления сдвижений, среди которых главным образом выделяются краевые части, то есть участки, непосредственно примыкающие к постоянным границам выработанного пространства, которым и будет уделено основное внимание в рамках 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 отрабатываемых 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 междуканальных целиков C , и/или меньшими суммарными максимальными оседаниями $\sum \eta_m$ относительно остальной совокупности смежных с ними зон. Описанный случай наиболее 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 более низкую 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 максимальных оседаний θ . При этом область практического использования последних распространяется и на другие возможные ситуации, например на участки неполной подработки, характеризующиеся 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.

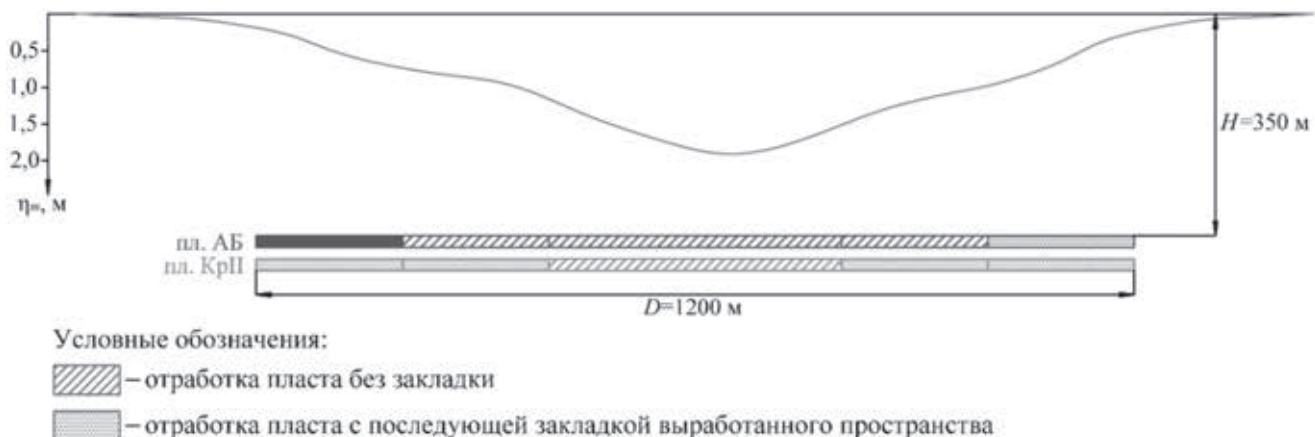


Рис. 1. Пример типовой геометрии общей формы проявления сдвижений в условиях отработки запасов Верхнекамского месторождения калийно-магниевых солей /

Fig. 1. An example of typical geometry of the general form of manifestation of shifts in the conditions of development of reserves of the VDPMS

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 ВКМКС были отобраны семь 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

$$\psi_i = \arctg \frac{H_i}{z_{ti}}, \quad (1)$$

где H_i – глубина разработки, соответствующая среднему расстоянию от земной поверхности до почвы нижнего отрабатываемого пласта на рассматриваемом участке шахтного поля, м; z_{ti} – абсцисса границы плоского дна мульды на рассматриваемую дату наблюдений с началом отсчета от границы горных работ, пересекаемой профильной линией, м.

При определении абсциссы z_{ti} высокую значимость имеет правильный выбор критериев границы плоского дна мульды. В соответствии с работой [20] 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, неблизком 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 2 (см. цв. вклейку на стр. 58) целесообразно привести один из рассмотренных разрезов сдвижений и деформаций за период с 1976 по 1985 год.

Принимая во внимание выделенную на рисунке 2 область фактических величин наклонов, соответствующих критерию $i = 0,15 \cdot 10^{-3}$, справедливо отметить близость вычисленных углов ψ , что в рассматриваемом случае определяет целесообразность нахождения среднего значения угла полных сдвижений ψ_{cp} . Аналогичный подход к определению величины ψ_{cp} справедлив и для остальных наблюдательных станций.

Для первичного анализа вычисленных величин углов полных сдвижений ψ_{cp} информацию о них целесообразно дополнить численными показателями основных возможных влияющих факторов.

Опираясь на ранее изложенное обоснование выбора основных наиболее значимых факторов применительно к исследованию величин граничных углов [21], а также учитывая вышеупомянутое постоянство значений ψ , свидетельствующее о потенциальном влиянии на их формирование факторов, несклонных к значительным изменениям во времени, для настоящего исследования определены актуальные параметры:

- количество отрабатываемых пластов;
- расчетные 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 отрабатываемого 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.

Таблица / Table

Сводная таблица средних значений углов полных сдвижений ψ_{cp} и величин основных влияющих факторов
Summary table of average values of angles of total displacements ψ_{cp}
and the values of the main influencing factors taken into account

Номер участка	Пласт	$H_{кр.ср.}, \text{ м}$	C	$\sum \eta_m, \text{ м}$	$\alpha, ^\circ$	$\sum m_{сп.}$	$\sum m_{кп.}$	$\psi_{cp}, ^\circ$
1	АБ	354	0,37	2,97	0,1	14,8	0,0	57,8
	Кр. II	360	0,62					
2	АБ	284	0,25	2,46	0,6	9,5	23,3	55,7
	Кр. II	290	0,52					
3	АБ	317	0,30	1,77	0,1	0,0	0,0	45,0
	Кр. II	325	0,30					
4	АБ	332	0,35	1,97	0,7	12,5	0,0	47,7
	Кр. II	340	0,33					
5	АБ	359	0,29	0,77	1,1	5,0	0,0	56,2
	Кр. II	365	0,53					
6	Кр. II	365	0,76	2,37	0,5	13,0	0,0	63,5
7	Кр. II	390	0,73	2,73	0,1	8,9	0,0	63,5

Из таблицы 1 видно, что вычисленные углы ψ_{cp} имеют разброс от 45° до $63,5^\circ$, среднее их значение составляет $\psi_{cp} = 55,4^\circ$, что близко к величине 55° , регламентируемой различными версиями «Указаний». Относительные ошибки отклонения величин ψ_{cp} от ψ_{cp} равны $\epsilon_{cp} = 10,7\%$, $\epsilon_{макс.} = 22,8\%$. Опираясь на данные таблицы 1, нельзя отметить наличия какой-либо выраженной взаимосвязи величин углов ψ_{cp} с факторами $H_{кр.}$, $\sum \eta_m$, α , $\sum m_{сп.}$, $\sum m_{кп.}$, что отчасти может объясняться малой размерностью сформированного массива данных. Прямая оценка влияния степени нагружения оставленных междуканальных целиков C осложнена различными значениями рассматриваемого показателя на отрабатываемых пластах. Для решения этой проблемы параметр C уместно рассмотреть как один из основных факторов, определяющих интенсивность разрушения геомеханической системы и формирующих скорость развития процесса сдвижения $\dot{\eta}$ над рассматриваемым участком отработки запасов. С учетом изложенного для анализируемых профильных линий на рисунке 3 (см. цв. вклейку на стр. 58) отразим скорости развития процесса сдвижения по данным первого из реперов, попадающих в границу плоского дна мульды.

Анализируя рисунок 3, можно заметить, что участки шахтных полей с наибольшими величинами рассчитанных углов полных сдвижений ψ_{cp} 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 ψ_{cp} характеризуются плановым развитием про-

цесса 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 ψ_{cp} и C_m , которое отражено на рисунке 4.

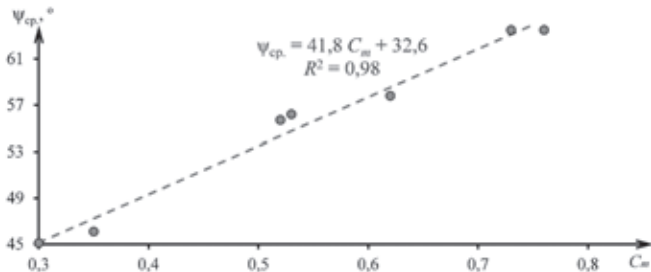


Рис. 4. Корреляционное поле показателей ψ_{cp} и C_m /
Fig. 4. Correlation field of the indicators ψ_{cp} and C_m

Из рисунка 4 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 ψ_{cp} от расчетных значений $\psi_{расч.}$ составляют $\epsilon_{расч.} = 1,5\%$, $\epsilon_{макс.} = 2,6\%$. 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, следующей за граничной, достаточны для минимизации стороннего влияния отработки на видимую границу плоского дна мульды.

Результатирующую 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 линий, параллельной оси абсцисс, позволяет получить геометрию результирующей полумульды сдвижения. Наглядное представление изложенного отражено на рисунке 5 (см. цв. вклейку на стр. 59).

Из рисунка 5 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:

$$\psi' = \operatorname{arctg} \frac{H_{гр.}}{D_{гр.з.} + H_{с.гр.} \operatorname{ctg} \psi_2}, \quad \text{при } \psi_2 \in [\psi; 90^\circ) \quad (2)$$

где $H_{гр.}$ и $H_{с.гр.}$ – глубины разработки, соответствующие среднему расстоянию от земной поверхности до почвы нижнего отрабатываемого пласта, над граничной зоной и смежным участком отработки запасов до границы плоского дна мульды, м; $D_{гр.з.}$ – размеры граничной зоны в направлении, ортогональном к рассматриваемой постоянной границе выработанного пространства (обычно около 200 м), м; ψ_2 – вспомогательные углы, $^\circ$.

Нижняя и верхняя предельные величины угла ψ_2 , использованные в зависимости 2, нуждаются в последующем пересмотре и приняты первично на основании нижеприведенных рассуждений.

Представим, что параметры отработки в 1-й 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-й и 2-й зонами по свойствам будет приближена к постоянной, и краевая часть мульды будет формироваться от зоны 2, то есть 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-й и 2-й 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, характеризующейся меньшими величинами достигнутых оседаний, 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 междукammerных целиков C смежных зон. Рассуждая в направлении возможного 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 [8, 22], 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 ВКМКС 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 1:

$$\psi_{2i} = \arctg \frac{H_{с.гр.i}}{z_{sti}}, \quad (3)$$

где H_i – глубина разработки, соответствующая среднему расстоянию от земной поверхности до почвы нижнего отработываемого пласта на участке шахтного поля от границы зон с различными параметрами отработки запасов до границы плоского дна мульды, м; 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. Корреля-

ционное поле вычисленных значений ψ_{2i} и η_{1i} / η_{2i} с цветовым обозначением отдельных групп, соответствующих различным величинам ΔC_m , представлено на рисунке 6 (см. цв. вклейку на стр. 59).

Анализируя рисунок 6, справедливо отметить выраженную нелинейную сгруппированность данных, при этом отдельные группы значений углов ψ_{2i} (соответствующие различным величинам ΔC_m) выражено 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 функция арктангенса, представленная ниже:

$$\psi_2 = 59,5 + 0,2 \arctg(8 \frac{\eta_{1i}}{\eta_{2i}} - 3,2), \quad (4)$$

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

Выражение 4 характеризуется высоким коэффициентом детерминации $R^2 = 0,91$. Относительные ошибки отклонения фактических величин ψ_{2i} от расчетных значений ψ_2 составляют $\epsilon_{ср.} = 3,1 \%$, $\epsilon_{макс.} = 9,1 \%$. В рассматриваемом случае значения углов ψ_2 наименее достоверны в области экстраполяции аппроксимирующей функции, то есть на интервале оси абсцисс $\eta_{1i} / \eta_{2i} > 0,75$. Учитывая, что в границах упомянутого интервала изменение величин ψ_2 малозначительно (составляет $1,6^\circ$) и является отображением общей тенденции распределения анализируемых углов, справедливо считать полученную зависимость 4 приемлемой для дальнейшего использования.

Принимая во внимание то, что наименьшая расчетная величина угла ψ_2 из зависимости 4 равна 45° и должна соответствовать ранее определенной в выражении 2 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 в выражение 2 и заменяя обозначения отдельных переменных, получим

$$\psi' = \arctg \frac{H_{гр.}}{D_{гр.з.} + H_{с.гр.} \cdot ctg(59,5 + 0,2 \arctg(8 \frac{\eta_{гр.з.i}}{\eta_{с.гр.i}} - 3,2))}, \quad (5)$$

при $\psi' < \psi_{гр.з.}$

где $H_{гр.}$ и $H_{с.гр.}$ – глубины разработки, соответствующие среднему расстоянию от земной поверхности до почвы нижнего отработываемого пласта соответственно над граничной зоной и над смежным участком отработки запасов до границы плоского дна мульды, м; $D_{гр.з.}$ – размеры граничной зоны в направлении, ортогональном к рассматриваемой постоянной границе выработанного пространства (обычно около 200 м), м; $\eta_{гр.i}$ и $\eta_{с.гр.i}$ – достигнутые или прогнозные величины оседаний соответственно над граничной и смежной с ней зонами, м; $\psi_{гр.з.}$ – значения углов полных сдвижений для граничной зоны, определенных с применением условий однородного

строения геомеханической системы на основании максимального показателя степени нагружения C_m междукламерных целиков.

Очевидно, что величины углов ψ' , полученные из зависимости 5, не могут быть больше значений углов $\psi_{гр.з.}$. В случае если $\psi' \geq \psi_{гр.з.}$, анализируемую геомеханическую систему из совокупности зон можно условно считать однородной и в качестве угла полных сдвижений использовать величину $\psi_{гр.з.}$.

При использовании выражения 5 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 5 путем учета ряда различных комбинаций геомеханических зон, следующих за граничной, нецелесообразно. 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 $H_{с.гр.} \cdot \operatorname{ctg} 45^\circ = H_{с.гр.}$.

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 [8, 22] нет прямых данных по этому вопросу.

Расчет длины полумульды сдвижения в условиях напольной подработки, согласно [8, 22], выполняется из зависимости:

$$\begin{aligned} L &= H(\operatorname{ctg} \delta_0 + \operatorname{ctg} \psi_0) = \\ H(\operatorname{ctg} \delta_0 + 0,5D/H) &= 0,5D + H \cdot \operatorname{ctg} \delta_0, \end{aligned} \quad (6)$$

где H – глубина до почвы нижнего отрабатываемого пласта на рассматриваемом участке, м; δ_0 – величина граничного угла, °; ψ_0 – величина угла полных сдвижений в условиях неполной подработки, °; D – ширина выработанного пространства, м.

Аналогичный расчет длины полумульды сдвижения с использованием угла θ вместо ψ_0 может быть представлен зависимостью

$$L = 0,5D + H(\operatorname{ctg} \delta_0 - \operatorname{ctg} \theta), \quad (7)$$

где D – ширина выработанного пространства, м; H – глубина до почвы нижнего отрабатываемого пласта на рассматриваемом участке, м; δ_0 – величина граничного угла, °; θ – величина угла максимальных оседаний, °.

Значения угла $\theta > 90^\circ$ в выражении 7 свидетельствуют о смещении границы дна мульды относительно центра рассматриваемого участка отработки шириной D в сторону удаления от постоянной границы, а значения $\theta < 90^\circ$, наоборот, – о смещении границы дна в сторону приближения к постоянной границе.

Соответствие выражений 6 и 7 будет наблюдаться лишь в случае, когда $\operatorname{ctg} \theta = 0$, то есть при $\theta = 90^\circ$. Таким образом, можно утверждать, что в настоящее время расчет 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 междукламерных 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 ВКМКС 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 ВКМКС 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

$$\theta_i = \arctg \frac{H_i}{z_{(\eta_m)i}}, \quad (8)$$

где H_i – глубина разработки в центральной части анализируемого локального участка отработки запасов, соответствующая расстоянию от земной поверхности до почвы нижнего отрабатываемого 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 $\theta_{ср.}$ над анализируемыми участками отработки запасов. Величины углов $\theta_{ср.}$ лежат в диапазоне от $94,5^\circ$ до $97,7^\circ$, а их среднее $\theta_{ср.}$ составляет $95,6^\circ$. Относительные ошибки отклонения величин $\theta_{ср.}$ от $\theta_{ср.}$ достаточно малы и равны $\epsilon_{ср.} = 1,0\%$, $\epsilon_{макс.} = 2,1\%$.

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 $\theta_{\text{ср.}}$, а также малость исходного массива данных, можно сделать вывод о том, что в сложившейся ситуации установление степени влияния каждого отдельного из обозначенных факторов неуместно. Для практического использования при наличии факторов, потенциально способствующих отклонению границы дна мульды сдвижения, наиболее целесообразно ограничиться вышеприведенным средним значением угла θ , равным $95,6^\circ$.

Выводы

1. Величины углов полных сдвижений ψ на ВМКМС 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 пять лет с момента отработки запасов). Учитывая, что упомянутые скорости $\dot{\eta}$ в обозначенный интервал времени характеризуется выраженной взаимосвязью с рассчитываемыми степенями нагружения C оставляемых междуканальных целиков, показатель C можно использовать в качестве основы для оценки величин углов ψ .

Выполненные исследования позволили установить представленную ниже зависимость:

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

где C_m – наибольшее значение степени нагружения C_m 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 .

Полученная зависимость нуждается в последующих корректировках после накопления новых данных результатов инструментальных наблюдений над участками отработки запасов, однородных по строению геомеханической системы.

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 междуканальных целиков.

2. Опираясь на вышеизложенные результаты исследования, уместно дополнительно уточнить коэффициент χ , характеризующий условие полной подработки:

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

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.

3. В условиях, 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, 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 для определения углов ψ'

$$\psi' = \arctg \frac{H_{\text{г.р.}}}{D_{\text{г.р.з.}} + H_{\text{с.г.р.}} \text{ctg } (59,5 + 0,2 \arctg (8 \frac{\eta_{\text{г.р.з.и}}}{\eta_{\text{с.г.р.и}}} - 3,2))}, \text{ при } \psi' < \psi_{\text{г.р.з.}}$$

где $H_{\text{г.р.}}$ и $H_{\text{с.г.р.}}$ – глубины разработки, соответствующие среднему расстоянию от земной поверхности до почвы нижнего отработываемого пласта, соответственно над граничной зоной и над смежным участком отработки запасов до границы плоского дна мульды, м; $D_{\text{г.р.з.}}$ – размеры граничной зоны в направлении, ортогональном к рассматриваемой постоянной границе выработанного пространства (обычно около 200 м), м; $\eta_{\text{г.р.и}}$ и $\eta_{\text{с.г.р.и}}$ – достигнутые или прогнозные величины оседаний соответственно над граничной и смежной с ней зонами, м; $\psi_{\text{г.р.з.}}$ – значения углов полных сдвижений для граничной зоны, определенных с применением условий однородного строения геомеханической системы на основании максимального показателя степени нагружения C_m междуканальных целиков.

При $\psi' \geq \psi_{\text{г.р.з.}}$ анализируемую геомеханическую систему из совокупности зон можно условно считать однородной и в качестве угла полных сдвижений использовать величину $\psi_{\text{г.р.з.}}$.

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 $H_{\text{с.г.р.}} \cdot \text{ctg } 45^\circ = H_{\text{с.г.р.}}$.

4. Расчет длины полумульды сдвижения L в условиях неполной подработки наиболее целесообразно выполнять на основании зависимости, базирующейся на использовании угла максимальных оседаний θ :

$$L = 0,5D + H(\text{ctg } \delta_0 - \text{ctg } \theta),$$

где D – ширина выработанного пространства, м; H – глубина до почвы нижнего отработываемого пласта на рассматриваемом участке, м; δ_0 – величина граничного угла, $^\circ$; θ – величина угла максимальных оседаний, $^\circ$.

При выраженной однородности строения геомеханиче-

ской системы, относительной близости сроков отработки запасов и закладки выработанного пространства в совокупности зон, составляющих 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 .

Полученное значение угла $\theta = 95,6^\circ$ нуждается в последующих корректировках с учетом накопления новых данных инструментальных наблюдений над участками отработки запасов, соответствующих рассматриваемым условиям.

5. Учитывая, что длина полумульды сдвижения склонна к изменению во времени, с целью развития полного понимания о характере деформирования краевой части мульды сдвижения особый интерес представляет вопрос исследования характера изменений во времени распределений относительных оседаний, наклонов и кривизны. Решение обозначенного вопроса можно отнести к последующим целям исследования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

- Барях АА, Тенисон ЛО. Обоснование инженерных критериев безопасной подработки водозащитной толщи на Верхнекамском месторождении солей. *Горный журнал*. 2021;4:57-63.
- Baryakh AA, Tenison LO. Justification of engineering safety criteria for undermining of water-proof layer in the Upper Kama Salt Deposit. *Mining magazine*. 2021;4:57-63. (In Russ.).
- Усанов СВ, Коновалова ЮП, Усанова АВ. Исследование причин повреждений жилых малоэтажных зданий в зоне влияния подземных горных работ. *Известия ТулГУ. Науки о Земле*. 2023;2:334-46.
- Usanov SV, Konovalova YuP, Usanova AV. Study of the causes of damage to residential low-rise buildings in the zone of influence of underground mining. *News of Tula State University: Geosciences*. 2023;2:334-46. (In Russ.).
3. Strzałkowski P. Some Remarks on Impact of Mining Based on an Example of Building Deformation and Damage Caused by Mining in Conditions of Upper Silesian Coal Basin. *Pure and Applied Geophysics*. 2019;176(6):2595-605. doi: 10.1007/s00024-019-02127-1.
4. Zhanga M, Zhangb Y, Jia M, Jiao P. Research on reasonable mining scheme for coal recovery in thick coal seam under buildings and other structures. *Journal of Mines, Metals and Fuels*. 2019;67(2):90-8.
5. Guo G, Li H, Zha J. An approach to protect cultivated land from subsidence and mitigate contamination from colliery gangue heaps. *Process Safety and Environmental Protection*. 2019;(124):336-44. doi: 10.1016/j.psep.2019.03.004.
6. Diao X, Wu K, Zhou D, et al. Combining subsidence theory and slope stability analysis method for building damage assessment in mountainous mining subsidence regions. *PLOS ONE*. 2019;14(2):0210021. doi: 10.1371/journal.pone.0210021.
7. Pawluszek-Filipiak K, Borkowski A. Integration of DInSAR and SBAS Techniques to Determine Mining-Related Deformations Using Sentinel-1 Data: The Case Study of Rydułtowy Mine in Poland. *Remote Sensing*. 2020;12(2):242. doi: 10.3390/rs12020242.
8. Указания (мероприятия) по защите рудников ПАО «Уралкалий» от затопления и охране объектов на земной поверхности от вредного влияния подземных разработок на ВКМКС. Часть 1: Основные положения. Часть 2: Методические рекомендации – ГИ УрО РАН, Пермь, 2022.
- Regulations for the protection of the mines of PJSC Uralkali from flooding and the protection of objects on the earth's surface from the harmful effects of underground mining on the VDPMS. Part 1. Basic provisions. Part 2. Guidelines - MI Ural Branch of the Russian Academy of Sciences. Perm, 2022. (In Russ.).
9. Нестеров МП, Львова АВ, Аникин НФ. Основные особенности закономерностей деформаций земной поверхности на калийных рудниках. *Строительные конструкции* Киев, 1974.
- Nesterov MP, Lvova AV, Anikin NF. The main features of the patterns of deformation of the earth's surface in potash mines. *Building structures*. Kyiv, 1974. (In Russ.).
10. Нестеров МП, Аникин НФ. Основные закономерности деформирования земной поверхности на Верхнекамском калийном месторождении и методы его предрасчета. *Механика горных пород при разработке природных солей: Тр. ВНИИГ*. 1974;67.
- Nesterov MP, Anikin NF. Basic patterns of deformation of the earth's surface at the Verkhnekamskoye potassium deposit and methods for its pre-calculation. *Rock mechanics in the development of natural salts*. Leningrad, 1974. (In Russ.).
11. Нестеров МП. Особенности процесса деформирования земной поверхности на калийных месторождениях и специфика их учета при выборе конструктивных мер защиты подрабатываемых объектов. *Доклады на Международном симпозиуме по защите окружающей среды от последствий подземной эксплуатации минерального сырья*. Тузла (Югославия), 1975.
- Nesterov MP. Features of the process of deformation of the earth's surface in potash deposits and the specifics of their consideration when choosing constructive measures to protect undermined objects. *Reports at the international Symposium on environmental protection from the consequences of underground exploitation of mineral raw materials*. Tuzla (Yugoslavia), 1975. (In Russ.).
12. Нестеров МП. Оседания земной поверхности при разработке калийных месторождений и горно-технические меры уменьшения их вредного влияния. *Доклады на III Международном симпозиуме по маркшейдерскому делу: Т. 3*. Леобен (Австрия), 1976.
- Nesterov MP. Subsidence of the earth's surface during the development of potash deposits and mining and technical measures to reduce their harmful effects. In the book: *Reports at the III International Symposium on Mine Surveying*. Vol. 3. Leoben (Austria), Mining University, 1976. (In Russ.).
13. Аникин НФ. Развитие сдвижения земной поверхности во времени на Верхнекамском калийном месторождении при системах с податливыми целиками. *Сдвижение земной поверхности и толщи на калийных месторождениях*. Ленинград, 1977.
- Anikin NF. Development of displacement of the earth's surface in time at the Verkhnekamsk potash deposit in systems with yielding pillars. *Shift of the earth's surface and strata in potash deposits*. Leningrad, 1977. (In Russ.).
14. Аникин НФ, Львова АВ, Бешенцева ЭФ. Особенности формирования краевых частей мульды сдвижения в условиях Верхнекамского

месторождения. *Контроль, прогнозирование и управление состоянием пород в калийных рудниках: сборник научных трудов*. Ленинград, 1985:186.

Anikin NF, Lvova AV, Beshentseva EF. Features of the formation of the edge parts of shear troughs in the conditions of the Verkhnekamskoye field. *Monitoring, forecasting and managing the condition of rocks in potash mines*. Leningrad, 1985:186 (In Russ.).

15. Казаковский ДА. Сдвигение земной поверхности под влиянием горных разработок. Москва, 1953:228 с.

Kazakovskiy DA. The displacement of the earth's surface under the influence of mining. Moscow, 1953:228. (In Russ.).

16. Викторов СД, Иофис МА, Гончаров СА. Сдвигение и разрушение горных пород. Москва, 2005: 277.

Viktorov SD, Iofis MA, Goncharov SA. Displacement and destruction of rocks. Moscow, 2005: 277. (In Russ.).

17. Посыльный ЮВ. Геометрия мульды сдвигения земной поверхности над горными выработками угольных шахт. Новочеркасск, 2012: 216.

Posylny YuV. Geometry of the trough of displacement of the earth's surface over the workings of coal mines. Novocherkassk, 2012:216. (In Russ.).

18. Михайлова ТВ, Рогова ТБ. Сдвигение и деформации пород и земной поверхности при ведении горных работ. Кемерово, 2017:110.

Mikhailova TV, Rogova TB. Movement and deformation of rocks and earth surface during mining. Kemerovo 2017:110 p. (In Russ.).

19. Правила охраны сооружений и природных объектов от вредного влияния подземных горных разработок на угольных месторождениях. Санкт-Петербург, 1998:291.

Rules for the protection of structures and natural objects from the harmful effects of underground mining in coal deposits. St. Petersburg, 1998:291. (In Russ.).

20. Щегольков ЮС. Обоснование критериев основных угловых параметров процесса сдвигения для условий отработки запасов Верхнекамского месторождения калийно-магниевых солей. *Маркшейдерия и недропользование*. 2024;(3):42-54.

Shchegolkov YuS. Justification of the criteria for the main angular parameters of the displacement process for the conditions of development of reserves of the Verkhnekamskoye field potassium-magnesium salts. *Mine Surveying and Subsurface Use*. 2024;(3):42-54. (In Russ.) doi: 10.56195/20793332_2024_3_42_54.

21. Щегольков ЮС. Определение граничных углов процесса сдвигения земной поверхности при отработке запасов Верхнекамского месторождения калийно-магниевых солей. *Маркшейдерия и недропользование*. 2024;(6):25-32. doi: 10.56195/20793332_2024_6_25_32.

Shchegolkov YuS. Determination of boundary angles of the process of earth's surface displacement during the mining of reserves of the Verkhnekamskoye deposit of potassium-magnesium salts. *Mine Surveying and Subsurface Use*. 2024;(6):25-3 (In Russ.).

22. Указания по защите рудников от затопления и охране объектов на Верхнекамском месторождении калийно-магниевых солей. Санкт-Петербург – Пермь, 2014.

Regulations for the protection of mines from flooding and the protection of facilities at the Verkhnekamskoye potassium-magnesium salt deposit. St. Petersburg – Perm, 2014. (In Russ.).

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

Юрий Сергеевич Щегольков –

главный специалист аналитического отдела проектно-аналитического управления ПАО «Уралкалий». 618426, г.

Березники, Российская Федерация,

e-mail: rabota.shegolkov@mail.ru

ABOUT THE AUTHOR

Yuri S. Shchegolkov –

main specialist of the analytical department of design and analytical management, PJSC «Uralkali», 618426, Berezniki,

Russian Federation, e-mail: rabota.shegolkov@mail.ru

Информация о статье

Поступила в редакцию: 17.10.2024.

Поступила после рецензирования: 09.01.2025.

Принята к публикации: 20.01.2025.

Article info

Received: 17.10.2024.

Revised: 09.01.2025.

Accepted: 20.01.2025.