

ОБОСНОВАНИЕ КРИТЕРИЕВ ОСНОВНЫХ УГЛОВЫХ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА СДВИЖЕНИЯ ДЛЯ УСЛОВИЙ ОТРАБОТКИ ЗАПАСОВ ВЕРХНЕКАМСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ КАЛИЙНО-МАГНИЕВЫХ СОЛЕЙ

Ю. С. Щегольков,
ПАО «Уралкалий», г. Березники, Россия

Аннотация: В условиях отработки запасов Верхнекамского месторождения калийно-магниевых солей изучение особенностей и выявление закономерностей развития процесса сдвижения базируются главным образом на данных инструментальных наблюдений по профильным линиям грунтовых реперов. Одними из важнейших составляющих исследования процесса сдвижения земной поверхности от влияния горных работ являются угловые параметры, которые в обобщенной интерпретации являются комплексными показателями физико-механических свойств всей сдвигающейся породной толщи. В вопросе установления и уточнения как численных значений отдельных угловых параметров процесса сдвижения, так и зависимостей, их определяющих, особую актуальность имеют критерии, позволяющие определить местоположение точек, характерных для отдельных углов. Вопрос обоснования величин вышеупомянутых критериев имеет высокую значимость для условий отработки запасов на рассматриваемом месторождении вследствие их недостаточной изученности и освещенности. В статье приведены результаты исследований обозначенного вопроса. Обоснованы и актуализированы значения критериев основных угловых параметров процесса сдвижения. Результаты исследований могут быть полезными при обосновании величин основных угловых параметров процесса сдвижения.

Ключевые слова: угловые параметры, критерии, сдвижение, оседание, наклон, горизонтальная деформация, кривизна, безопасность подрабатываемых объектов.

Благодарности: Автор выражает глубокую признательность академику РАН, доктору технических наук А. А. Баряху и кандидату технических наук Л. О. Тенисон за ценные советы и рекомендации.

Для цитирования: 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.

SUBSTANTIATION OF THE CRITERIA OF THE MAIN ANGULAR PARAMETERS OF THE SHEAR PROCESS FOR THE CONDITIONS OF MINING THE VERKHNEKAMSKOYE POTASSIUM-MAGNESIUM SALT DEPOSIT

Y. S. Shchegolkov,
PJSC «Uralkaliy», Berezniki, Russia

Abstract: Under the conditions of development of the reserves of the Verkhnekamskoye potassium-magnesium salt deposit, the study of the features and identification of the patterns of the development of the displacement process is based mainly on the data of instrumental observations along the profile lines of ground benchmarks. One of the most important components of the study of the process of displacement of the earth's surface from the influence of mining are the angular parameters, which in a generalized interpretation are complex indicators of the physical and mechanical properties of the entire shearing rock mass. In the issue of establishing and refining both the numerical values of the individual angular parameters of the displacement process, and the dependencies that determine them, criteria that allow determining the location of points characteristic of individual angles are of particular relevance. The issue of substantiating the values of the mentioned criteria is of high importance for the conditions of development of reserves at the deposit under consideration due to their insufficient knowledge and illumination. The article presents research results designated issue. The values of the criteria for the main angular parameters of the displacement process are justified and updated. The research results can be useful in justifying the values of the main angular parameters of the displacement process.

Keywords: criteria for angular parameters of the displacement process, angular parameters of the displacement process, displacement, subsidence, inclination, horizontal deformation, curvature, safety of undermined objects.

Acknowledgments: 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 Y. S. Substantiation of the criteria of the main angular parameters of the shear process for the conditions of mining the Verkhnekamskoye potassium-magnesium salt deposit. Surveying and subsoil use. 2024;(3):42-54. (In Russ.). DOI: 10.56195/20793332_2024_3_42_54.

Верхнекамское месторождение калийно-магниевых солей (ВКМКС) является одним из крупнейших разрабатываемых в мире. Оно открыто в 1925 году и с 1934 года разрабатывается подземным способом. ВКМКС расположено на северо-востоке Пермского края, в районе Камского водохранилища, преимущественно на его левобережье.

Ввиду наличия над соляной толщей водоносных горизонтов и легкой растворимости солей отработка запасов месторождения ведется способами, исключающими возможность проникновения воды в выработанное пространство, что главным образом сопряжено с необходимостью сохранения водонепроницаемости пачки пород, расположенной между кровлей верхнего отрабатываемого пласта и подошвой первого снизу водоносного горизонта, называемой водозащитной толщей (ВЗТ) [1-2].

Нарушение сплошности ВЗТ может привести к затоплению рудника с сопутствующим комплексом негативных последствий для подработанных территорий [3-6] вплоть до образования провалов значительных размеров [7-10]. Во избежание этого на месторождении применяют камерную систему разработки с поддержанием кровли ленточными целиками. Геомеханическую систему, формируемую при отработке запасов ВКМКС, в обобщенной интерпретации нельзя назвать однородной. Это обусловлено необходимостью применения, даже в пределах отрабатываемых блоков, различных параметров, таких как количество отрабатываемых пластов, вид слагающей их соли, вынимаемая мощность, ширины камер и целиков, наличие, тип и объем вносимого закладочного материала в камеры и пр. Ввиду этого деление блоков осуществляется на отдельные зоны, в которые заключаются камеры с похожими параметрами отработки и степенью заполнения закладкой выработанного пространства.

Подземная отработка запасов сопровождается нарушением естественного равновесного состояния породного массива, в результате чего происходит перемещение (сдвижение) толщи горных пород в сторону выработанного пространства [11, 12]. Сам процесс сдвижения имеет характерные особенности для каждого конкретного месторождения и представляет собой сложное физическое явление, находящееся в зависимости от большого числа факторов [13]. Изучение особенностей и выявление закономерностей развития процесса сдвижения в условиях отработки запасов рассматриваемого месторождения базируется главным образом на данных инструментальных наблюдений. Последние получили активное развитие в середине прошлого века, что можно связать с планомерным вводом в эксплуатацию новых мощностей и увеличением площадей отработки запасов, прежде всего под промышленной и жилой застройкой городов Березники и Соликамска. Постепенное накопление данных инструментальных наблюдений положило начало проведению исследований процесса сдвижения, значимые

результаты которых находили отражение в периодически издаваемых (начиная с 1960 г.) нормативных документах — «Указаниях...» и «Инструкциях...», регламентирующих меры защиты рудников от затопления и охрану подрабатываемых объектов [18, 20].

Цель исследований. Обоснование критериев основных угловых параметров процесса сдвижения для условий отработки запасов Верхнекамского месторождения калийно-магниевых солей.

Материал и методы исследований

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.

Теоретические основы разработки вопроса исследований

Изучение процесса сдвижения носит несомненную актуальность для обеспечения безопасности подработки зданий и сооружений на земной поверхности, а также при планировании строительства на подрабатываемых территориях. В данном случае оцениваются величины возникающих после проведения горных работ деформаций земной поверхности, к которым относятся наклон i , кривизна K , радиус кривизны R и горизонтальная деформация ε .

Для условий ВКМКС ожидаемые значения обозначенных величин $i(z)$, $K(z)$, $R(z)$, $\varepsilon(z)$ в случае наличия данных инструментальных наблюдений на рассматриваемом участке шахтного поля рассчитываются из выражений:

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

$$K(z)_{n,n-1} = \frac{i(z)_n - i(z)_{n-1}}{0,5(l_n + l_{n-1})} q_k, \quad (2)$$

$$(z) = K(z)^{-1}, \quad (3)$$

$$\varepsilon(z) = (1 - \frac{l_p}{l}) q_\varepsilon, \quad (4)$$

где $\eta(t)_n$ и $\eta(t)_{n-1}$ — величины оседания земной поверхности по реперам n и $n-1$ в рассматриваемый период наблюдений, мм; $i(z)_n$ и $i(z)_{n-1}$ — ожидаемые значения наклона в предыдущем и последующем интервалах, мм/м; l_n и l_{n-1} — длины интервалов, соответствующие начальным измерениям между реперами n и $n-1$ и реперами $n-1$ и $n-2$, м; l_p и l — длины интервалов между реперами n и $n-1$, измеренные соответственно в рассматриваемый период наблюдений и начале наблюдений, м; q_i , q_k и q_ε — коэффициенты приведения значений наклона, кривизны и горизонтальной деформации к 15-метровому интервалу, вводимые для уменьшения ошибок определения указанных деформаций.

В общем случае расчет коэффициентов q_i , q_k и q_ε можно выполнить по формуле

$$q = 1 + \beta \sqrt{\frac{l_o}{15}} - 1, \quad (5)$$

где l_o — расстояние между двумя смежными реперами при расчете наклона и горизонтальной деформации или среднее расстояние между двумя парами смежных реперов при расчете кривизны, м; β — коэффициент аппроксимации, принимаемый равным 0,1414 для наклона, 0,1768 — для кривизны и 0,3535 — для горизонтальной деформации.

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

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

$$\eta(z) = \eta_m S(z), \quad (6)$$

$$i(z) = \frac{\eta_m S'(z) q_i}{L}, \quad (7)$$

$$K(z) = \frac{\eta_m S''(z) q_k}{L^2}, \quad (8)$$

$$R(z) = K(z)^{-1}, \quad (9)$$

$$\varepsilon(z) = m_e K(z) L, \quad (10)$$

где η_m — максимальное оседание на период окончания процесса сдвижения, м; $S(z)$, $S'(z)$ и $S''(z)$ — значения функций распределения относительных оседаний, наклонов и кривизны в краевой части мульды сдвижения; z — относительная координата рассматриваемой точки в краевой части мульды сдвижения, равная отношению расстояния от точки с максимальным оседанием земной поверхности до рассматриваемой точки к расчетной длине полумульды сдвижения; q_i и q_k — коэффициенты приведения значений наклона и кривизны к 15-метровому интервалу, вычисляемые из выражения 5, при расстоянии l_o , равному произведению расчетной длины полумульды сдвижения и интервала между относительными координатами в типовой функции распределения; L — длина полумульды сдвижения, значение которой определяется глубиной разработки H на рассматриваемом участке и величинами граничных углов и углов полных сдвижений, м; m_e — коэффициент перехода от $K(z)$ к $\varepsilon(z)$, принимается равным 0,05 при $K(z) \cdot 10^4 \geq 1$ или вычисляется как $0,05 + 0,09 (1 - K(z) \cdot 10^4)^{3,8}$ при $K(z) \cdot 10^4 < 1$.

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

Опираясь на вышеизложенное, можно отметить, что местоположение и численное значение вычисляемых деформаций при отсутствии данных инструментальных наблюдений тесно связано с величинами граничных углов и углов полных сдвижений. Так, если граничные точки, определяющие дли-

ну формируемой полумульды сдвижения, смещаются в пределах какого-то интервала, то происходит смещение и изменение численного значения ожидаемых деформаций. Граничные углы также используются при построении целиков под вертикальные стволы, а углы полных сдвижений определяют размеры плоского дна мульды.

Помимо вышерассмотренных угловых параметров в инженерной практике часто используются углы сдвижения и угол максимального оседания, при этом немаловажно отметить принятое для ВКМКС допущение о равенстве во всех направлениях отдельных угловых параметров, основанное главным образом на малых величинах углов падения промышленных пластов. Практическое назначение углов сдвижения состоит в определении границы зоны опасных сдвижений и построении предохранительных целиков под объекты на земной поверхности, а углы максимальных оседаний в условиях неполной подработки позволяют установить в мульде сдвижения местоположение точки, получившей наибольшее оседание.

Особую актуальность в вопросе установления и уточнения как численных значений отдельных угловых параметров процесса сдвижения, так и зависимостей, их определяющих, имеют критерии, позволяющие определить местоположение точек, характерных для отдельных углов. Вопрос обоснования величин упомянутых критериев имеет высокую значимость для условий отработки запасов на рассматриваемом месторождении вследствие их недостаточной изученности и освещенности. Ниже рассмотрено решение обозначенного вопроса для основных угловых параметров процесса сдвижения, наиболее часто используемых в инженерной практике ВКМКС.

Результаты исследований и их обсуждение

Граничные углы

Фактической границей мульды считается точка в ее краевой части, характеризующая нулевыми величинами сдвижений и деформаций. Определение истинного местоположения такой точки является невыполнимой задачей вследствие неизбежного наличия погрешностей инструментальных наблюдений, поэтому на практике в качестве граничных критериев используются некоторые условные значения сдвижений или деформаций, соответствующие возможным ошибкам их определения [14]. На ВКМКС в нормативных документах «Указания...», изданных с 1994 по 2008 год, в качестве граничных величин деформаций приняты значения $i = 0,3 \cdot 10^{-3}$ и $\varepsilon = 0,3 \cdot 10^{-3}$, а в последующих версиях упомянутого документа, изданных после 2013 года, информация о регламентируемых граничных критериях отсутствует. Обозначенные величины достаточно продолжительное время сохраняли актуальность и близки к регламентируемым «Указаниями...» 1985 года значениям $i = 0,4 \cdot 10^{-3}$ и $\varepsilon = 0,3 \cdot 10^{-3}$, что формирует необходимость их пересмотра с учетом накопленного опыта, технологического совершенствования измерительного оборудования и области применения (натурные инструментальные наблюдения или математическое моделирование процесса сдвижения).

Принимая во внимание вышеобозначенные интервальные граничные критерии i и ε , справедливо заметить невозможность независимого достоверного их использования на начальной стадии и в условиях медленного развития процесса сдвижения, когда между смежными реперами в крае-

вой части мульды наблюдаются небольшие разности оседаний или не происходит значимого изменения длин интервалов. С другой стороны, интервальные критерии i и ε характеризуются большей однозначностью использования их на практике по сравнению с точечным критерием оседания η . Для численного подтверждения сказанному уместно оценить вычисляемые по результатам натурных инструментальных наблюдений погрешности наклона, горизонтальной деформации и оседания, которые, в свою очередь, можно найти как погрешности функции общего вида.

Для функции общего вида $y = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$, согласно [15, 16], математическое выражение погрешности будет выглядеть следующим образом:

$$m_y = \pm \sqrt{\sum_1^n \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} m_{x_i} \right)^2}, \quad (11)$$

где $\partial f / \partial x_i$ — частные производные данной функции, вычисленные для соответствующих значений аргументов; m_{x_i} — средние квадратические погрешности соответствующих аргументов.

Погрешность определения наклона i возможно определить применяя формулу 11 к выражению 1, заменив разность $\eta(t)_n - \eta(t)_{n-1}$ превышением h и игнорируя эмпирический коэффициент q_i , не определяющий погрешность инструментальных наблюдений:

$$m_i = \pm \sqrt{\left(\frac{\partial i(z)_n}{\partial l_n} \right)^2 m_{l_n}^2 + \left(\frac{\partial i(z)_n}{\partial h} \right)^2 m_h^2}, \quad (12)$$

Учитывая, что

$$\frac{\partial i(z)_n}{\partial l_n} = \frac{h}{l_n^2} \approx 0, \text{ т.к. } l_n^2 \gg h, \\ \frac{\partial i(z)_n}{\partial h} = \frac{1}{l_n},$$

тогда выражение 12 можно представить в виде

$$m_i = \pm \frac{m_h}{l_n}. \quad (13)$$

Если учесть в выражении 13, что погрешность определения превышения mh на станции в соответствии с ЕППМР [17] составляет $\pm 0,7$ мм, а расстояние l_n в условиях наблюдений за процессом сдвижения на ВКМКС варьируется от 15 до 60 м, то погрешность определения наклона m_i не превысит $\pm 0,05 \cdot 10^{-3}$. Полученное значение обусловлено влиянием лишь инструментальных ошибок измерения, и при рассмотрении других влияющих факторов величина погрешности возрастет. Принимая за предельную ошибку определения превышения $mh_{пр}$ тройную среднюю квадратическую [16], предельная ошибка определения наклона m_i^{np} составит $\pm 0,15 \cdot 10^{-3}$. Эта величина в два раза меньше ранее регламентированного критерия по наклону и может быть использована как актуализированное его значение применительно к стадии активного развития процесса сдвижения, а также после нее.

Рассматривая критерий горизонтальной деформации ε , можно отметить некоторую органичность его использования

на практике, обусловленную прежде всего малым количеством профильных линий, где ведутся интервальные наблюдения длин с момента начала ведения горных работ.

В случае наличия своевременных систематических интервальных наблюдений в краевой части мульды сдвижения погрешность определения горизонтальной деформации m_ε можно найти аналогично ранее выполненным расчетам с использованием (11) применительно к (4), игнорируя при этом эмпирический коэффициент q_ε , не определяющий погрешность инструментальных наблюдений:

$$m_\varepsilon = \pm \frac{\sqrt{2} m_l}{l}. \quad (14)$$

Если учесть, что относительная погрешность определения длины интервала ml / l в соответствии с ЕППМР [17] не должна превышать $1/10000$, тогда значение m_ε составит $\pm 0,14 \cdot 10^{-3}$.

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

В случае отсутствия результатов фактических наблюдений длин интервалов возможно лишь вычислить ожидаемое значение горизонтальной деформации в краевой части мульды по (10), которое можно также связать и с ожидаемым наклоном $i(z)$. Для этого параметр $K(z)$ с учетом (8) и (7) можно преобразовать к виду

$$K(z) = \frac{S''(z) q_k i(z)}{S'(z) q_i L}. \quad (15)$$

Значения функций распределения относительных наклонов $S'(z)$ и кривизны $S''(z)$ [18] отражены в таблице 1.

Таблица 1 / Table 1

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

Values of typical distribution functions of relative settlements $S(z)$, slope $S'(z)$ and curvature $S''(z)$ in the displacement half-trough

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

Как видно из таблицы 1, каждая последующая точка в краевой части мульды (по направлению к ее границе) характеризуется меньшими сдвигами и деформациями относительно предыдущей. При линейной интерполяции значений $S'(z)$ и $S''(z)$ на участке z от 0,9 до 1,0 отношение $S'(z_{0,9-1,0}) / S''(z_{0,9-1,0})$ будет соответствовать величине 10/3, а отношение q_k / q_i на интервалах длиной 15-60 м не превысит величины 1,05.

При подстановке обозначенных величин в (15), а итогового результата в (10) получаем

$$\varepsilon(z_{0,9-1,0}) = 3,5 m_e i(z_{0,9-1,0}). \quad (16)$$

Если учесть, что кривизна $K(z)$ в краевой части мульды сдвигания стремится к нулю, тогда коэффициент m_e составит

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

Подставляя значение коэффициента m_e в (16) и выражая параметр $i(z)$, получаем

$$i(z_{0,9-1,0}) \approx 2 \varepsilon(z_{0,9-1,0}). \quad (17)$$

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

Рассматривая погрешность определения оседания $\eta(t)$, уместно заметить, что последнее вычисляется как разность высотных отметок, полученных в результате первоначального нивелирования H_0 и нивелирования на рассматриваемую дату H_i , тогда погрешность $m_{\eta(t)}$ можно с учетом (11) представить в виде

$$m_{\eta(t)} = \pm \sqrt{\left(\frac{\partial \eta(t)}{\partial H_0}\right)^2 m_{H_0}^2 + \left(\frac{\partial \eta(t)}{\partial H_i}\right)^2 m_{H_i}^2}, \quad (18)$$

Учитывая, что

$$\begin{aligned} \frac{\partial \eta(t)}{\partial H_0} &= \frac{\partial \eta(t)}{\partial H_i} = 1, \\ m_{H_i} &\approx m_{H_0} = m_H, \end{aligned}$$

тогда (18) можно привести к виду

$$m_{\eta(t)} = \pm \sqrt{2} m_H. \quad (19)$$

Численное значение погрешности m_H в (19) невозможно определить однозначно ввиду наличия различных влияющих на ее величину факторов, таких как тип хода (замкнутый по-

лигон, замкнутый или висячий ходы), его длина, местоположение в нем исследуемых реперов и т. д. Для примера можно рассмотреть одиночный замкнутый ход геометрического нивелирования, погрешность m_H для которого выражается формулой

$$m_H = \pm f \sqrt{\frac{N}{n}}. \quad (20)$$

где f — величина невязки в замкнутом полигоне, мм; N — число наблюдательных станций до рассматриваемого пункта; n — общее число наблюдательных станций в полигоне.

В качестве величины невязки f уместно ограничиться допустимым ее значением, которое для условий производства наблюдений за процессом сдвигания на ВКМКС (при числе станций на 1 км хода меньше 15) составляет $5\sqrt{L}$, мм, или (при числе станций на 1 км хода больше 15) $6\sqrt{L}$, мм [17]. Опираясь на изложенное, (19) можно привести к виду

$$m_{\eta(t)} = \pm 8,5 \sqrt{\frac{L \times N}{n}}. \quad (21)$$

где L — длина хода, км.

Как видно из (21), значение погрешности $m_{\eta(t)}$ может в значительной степени изменяться в зависимости от величин слагающих ее параметров, следовательно, для каждой исследуемой границы мульды необходим отдельный подсчет показателя $m_{\eta(t)}$, что на практике формирует некоторую неоднозначность и усложняет независимое использование точечного критерия оседания η . С другой стороны, если учесть преимущественное наличие опорных реперов в краевой части профильной линии, выходящей на постоянную границу выработанного пространства, то несложно оценить наибольшую возможную погрешность на интервале реперов от границы отработки до ближайшего опорного репера.

При этом погрешность m_H можно определить из выражения

$$m_H = \pm m_h \sqrt{K} = \pm m_h \sqrt{\frac{L_u}{l_n}}. \quad (22)$$

где K — количество станций до рассматриваемого пункта от ближайшего исходного опорного пункта; L_u — длина участка профильной линии от рассматриваемого пункта до ближайшего исходного опорного пункта, м.

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

$$L_{u(гп.от.-оп.пн.)} \approx 100 + H \operatorname{ctg} \delta, \quad (23)$$

где H — глубина разработки до подошвы нижнего отрабатываемого пласта, м; $\delta = 50^\circ$ — величина граничного угла, принимаемая для расчета рабочей длины профильной линии в [17].

Подставляя выражение 23 в 22, а результат в формулу 19 и учитывая вышеобозначенное значение погрешности $m_h = \pm 0,7$ мм, получаем

$$m_{\eta(t)(гп.от.-оп.пн.)} \approx \pm \sqrt{\frac{100 + 0,84H}{l_n}}. \quad (24)$$

Учитывая, что среди имеющихся лицензионных участков месторождения наибольшая глубина отработки запасов нижнего пласта КрП достигает величины, близкой к 450 м, а наименьшая длина интервала $l_n = 15$ м, тогда наибольшее значение погрешности $m_{\eta(t)}$ (зр.от.-оп.пн.) в (24) составит 6 мм. На практике вследствие того, что местоположение границы мульды тяготеют к опорным реперам, расстояние между смежными реперами в большинстве случаев больше 15 м, фактическое значение $m_{\eta(t)}$ (зр.от.-оп.пн.) будет кратно меньше 6 мм, таким образом, в обозначенной величине погрешности имеется некоторый запас, позволяющий компенсировать влияние ряда факторов, не связанных с инструментальными ошибками измерения. Опираясь на сказанное, можно заключить, что при наличии опорных реперов в краевой части исследуемого участка профильной линии граничным критерием оседания η может служить величина 6 мм.

Полученное значение наиболее целесообразно использовать для определения области возможного применения критериев i и ε . Учитывая ранее сделанный вывод об уменьшении оседания по направлению к краевой части мульды, несложно заметить, что при применении на практике пары критериев η - i в большинстве случаев определяющим будет являться первый из них, что отражено на рисунке 1.

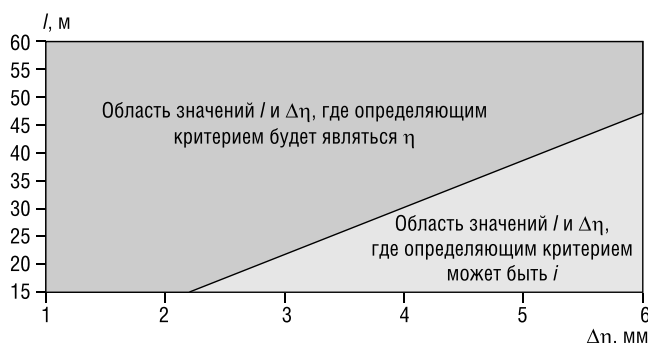


Рис. 1. Анализ использования пары критериев η - i при возможных значениях l и $\Delta\eta$ на границе мульды

Fig. 1. Analysis of the use of a pair of criteria η - i for possible values of l and $\Delta\eta$ at the displacement trough boundary

Из рисунка 1 видно, что критерий i может быть определяющим при разности оседаний двух смежных реперов в краевой части $\Delta\eta$ от 3 до 6 мм и длинах интервалов l от 15 до 47 м соответственно. Обозначенное обстоятельство в условиях наличия опорных реперов в краевой части исследуемого участка профильной линии позволяет считать критерий η основным.

Для сравнительной проверки «старых» и «новых» критериев уместно ограничиться использованием i и η - i соответственно. Такой выбор объясняется прежде всего отсутствием возможности практического применения критерия η и неизменившимся его значением. По результатам обработки данных инструментальных наблюдений по 15 профильным линиям на шахтных полях рудников СКРУ-1, БКПРУ-2, БКПРУ-4 можно отметить что «новые» критерии η - i по сравнению со «старым» критерием i определяют ожидаемо меньшие величины граничных углов δ . Разности между последними $\Delta\delta$ имеют значительный разброс в диапазоне от 1 до 23°, при этом прослеживается общая тенденция к их снижению с увеличением достигнутого оседания $\eta(t)$ по отноше-

нию к максимальному расчетному η_m , что наглядно видно из рисунка 2.

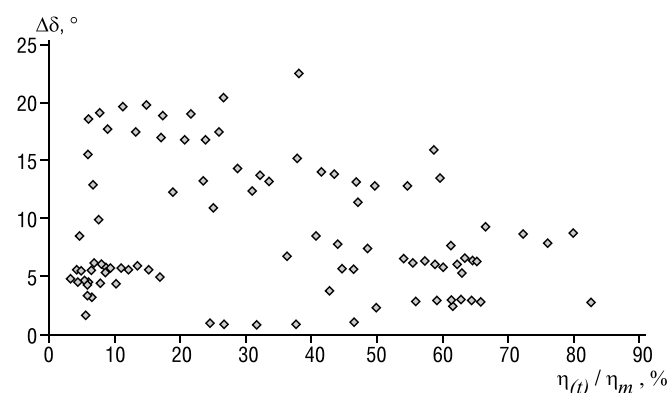


Рис. 2. Распределение величин разностей граничных углов $\Delta\delta$, получаемых при использовании старого i и новых критериев η - i

Fig. 2. Distribution of the values of the differences between the boundary angles $\Delta\delta$ obtained using the old i and new criteria η - i

Также нельзя не отметить, что «старый» критерий i в отличие от новых η - i не позволяет определять границу мульды при отношении $\eta(t)/\eta_m$ до 5 %, т. е. на начальном этапе процесса сдвижения.

Учитывая изложенное, можно сделать следующий вывод: пара критериев η - i позволяет идентифицировать местоположение границы мульды на большем удалении от площадей ведения горных работ и применима на начальной стадии, а также в условиях медленного развития процесса сдвижения.

В способах исследования процесса сдвижения, где отсутствуют характерные для нивелирных ходов погрешности, например при математическом моделировании, также уместно использовать критерий η . Параметр $m_{\eta(t)}$ в этом случае несложно выразить через погрешность определения превышения m_h , найденную аналогично вышеприведенным расчетам способом с учетом (11):

$$m_{\eta(t)} = \pm \frac{m_h}{\sqrt{2}}. \quad (25)$$

Подставляя в (25) вышеобозначенную величину погрешности $m_h = \pm 0,7$ мм, получаем $m_{\eta(t)} = \pm 0,5$ мм. Если принимать за предельную ошибку определения превышения m_{hnp} тройную среднюю квадратическую [16], предельная ошибка определения оседания $m_{\eta(t)}^{np}$ составит $\pm 1,5$ мм, а с учетом округления до целого значения — ± 2 мм. Полученное значение можно считать точечной альтернативой интервального критерия наклона при определении границ мульды способами, исключаяющими характерные для нивелирных ходов погрешности, например в условиях математического моделирования.

Углы сдвижения

С целью охраны различных объектов на земной поверхности от вредного воздействия подземной разработки на ВКМКС «Указаниями...» 1976–2008 годов установлены следующие опасные величины деформаций при среднем интервале 15–20 м между наблюдаемыми реперами: наклон $i = 4 \cdot 10^{-3}$, кривизна $K = 2 \cdot 10^{-4} \text{ м}^{-1}$, деформация растяжения

$\varepsilon = 2 \cdot 10^{-3}$. За искомую границу зоны опасных сдвижений принимают ближайшую к границе мульды точку, соответствующую одной из вышеприведенных величин деформаций. В последних версиях «Указаний...» 2014 и 2022 годов аналогичных величин не приводилось.

Использование подобных величин опасных деформаций прослеживается и в других действующих нормативных документах, не относящихся к рассматриваемому месторождению, например в [19] или [20], что в свою очередь свидетельствует об их высокой распространенности. Учитывая также, что рассматриваемые значения критических деформаций получены с учетом конструктивных особенностей различных сооружений и их пересмотр подразумевает проведение обширных практических и научно-исследовательских работ, можно заключить об отсутствии целесообразности их актуализации в рамках настоящей работы. Для практического использования уместно ограничиться ранее установленными величинами опасных деформаций.

Углы полных сдвижений

Выбор критериев для определения углов полных сдвижений неразрывно связан с установлением границы плоского дна мульды. Как правило, за границу плоского дна принимают ближайшую к границе мульды сдвижения точку с максимальным оседанием, деформации в которой близки к нулю [21].

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

Учитывая сказанное, нельзя сделать вывод о неактуальности граничных критериев для определения углов полных сдвижений на ВКМКС. Опираясь на данные инструментальных наблюдений за сдвижением земной поверхности в условиях рассматриваемого месторождения, можно отметить, что наиболее выраженное плоское дно мульды встречается на руднике БКПРУ-2 на участках, где у части зон вблизи к постоянной границы выработанного пространства велась отработка запасов с применением податливых целиков (рис. 3 и 4, см. вклейку на стр. 25).

Принимая во внимание ранее упомянутую информацию о нулевых деформациях на границе плоского дна мульды и учитывая равенство предельных ошибок определения наклона i и горизонтальной деформации ε как на границе плоского дна мульды, так и в ее краевой части, можно сделать вывод о возможности использования ранее определенных критериев для граничных углов $i = 0,15 \cdot 10^{-3}$ и $\varepsilon = 0,3 \cdot 10^{-3}$ применительно к углам полных сдвижений. Здесь немало важно отметить, что критерий ε также будет являться дополнительным и его использование возможно лишь в отдельных случаях при наличии своевременных систематических ин-

тервальных наблюдений на исследуемом участке профильной линии.

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

Аналогичные размышления справедливо экстраполировать и на критерий максимального оседания, который при независимом применении в условиях рассматриваемого месторождения не отражает истинного местоположения границы плоского дна мульды вследствие слабой выраженности постоянства численных значений ηm . Подтверждением сказанному на практике является высокая изменчивость относительно нуля наклонов и кривизны в плоском дне мульды, что наглядно видно из рисунков 3 и 4. С другой стороны, максимальное оседание является неотъемлемой характеристикой плоского дна мульды и должно быть задействовано для идентификации местоположения его границы. С учетом вышеизложенного наиболее уместным в рассматриваемом случае будет применение вышерассмотренных критериев i и ε в некой «области максимальных оседаний», характеризующей наличие плоского дна мульды. При этом «областью максимальных оседаний» можно считать визуально определяемый из разреза сдвижений и деформаций профильной линии участок мульды, где наблюдается тенденция к сохранению относительного постоянства максимальных оседаний, минимальных наклонов и горизонтальных деформаций среди группы смежных реперов.

Сравнивая углы полных сдвижений, полученные с использованием «старых» (1976 г.) и «новых» критериев применительно к данным инструментальных наблюдений по трем профильным линиям на руднике БКПРУ-2, можно отметить некоторое постоянство во времени численных величин определяемых углов, которое особенно выражено для «новых» критериев. «Старые» критерии определяют величины рассматриваемых углов, составляющих в среднем $55,4^\circ$, что близко к значению 55° , приведенному во всех версиях «Указаний...». «Новые» критерии по сравнению со «старыми» определяют аналогичные углы в среднем на $4,5^\circ$ меньше, т. е. около $50,9^\circ$.

Углы максимальных оседаний

В условиях неполной подработки земной поверхности, когда в мульде сдвижения отсутствует плоское дно, точка, характеризующая максимальным оседанием, является главным критерием для определения соответствующего угла. С другой стороны, для условий отработки запасов ВКМКС вследствие разнообразия геомеханических зон с различными параметрами отработки запасов характерно

формирование сложных форм мульд сдвижения, что не дает возможности непосредственного использования критерия максимального оседания. Подобные размышления справедливы и для критериев границы плоского дна мульды в условиях полной подработки. В описанных условиях отсутствует возможность непосредственно устанавливать величины отдельных существующих угловых параметров процесса сдвижения, а также при отсутствии инструментальных наблюдений выполнять достоверное определение деформаций на анализируемом участке шахтного поля. Решение описанной проблематики возможно с применением сочетательного подхода результирующей формы проявления сдвижений из отдельных мульд, образованных от каждой геомеханической зоны отработки запасов. Для реализации изложенного особую важность приобретает выделение вспомогательных угловых параметров процесса сдвижения и соответствующих им критериев, позволяющих установить виртуальные границы сочетаемых мульд, что можно отнести к последующим целям исследования.

Заключение

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

характерные для нивелирных ходов погрешности, например в условиях математического моделирования, основным критерием является оседание $\eta = 2$ мм.

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

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

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

5. Неоднородность сформированной на шахтных полях рудников геомеханической системы способна приводить к образованию мульд со сложной формой краевых частей и отсутствием выраженного плоского дна, что не дает возможности непосредственно устанавливать величины отдельных существующих угловых параметров процесса сдвижения, а также при отсутствии инструментальных наблюдений выполнять достоверное определение деформаций на анализируемом участке шахтного поля.

Решение описанной проблематики возможно с применением подхода сочетания отдельных мульд сдвижения, образованных от каждой геомеханической зоны отработки запасов, в результирующую суммарную форму проявления сдвижений, что в свою очередь формирует необходимость рассмотрения вопроса о выделении вспомогательных угловых параметров процесса сдвижения и соответствующих им критериев, позволяющих установить виртуальные границы сочетаемых мульд. Решение описанной проблемы можно отнести к последующим целям исследования. ■

ЛИТЕРАТУРА

1. Барях, А. А. Обоснование инженерных критериев безопасной подработки водозащитной толщи на Верхнекамском месторождении солей / А. А. Барях, Л. О. Тенисон // Горный журнал. - 2021. - № 4. - С. 57-63.
2. Кудряшов, А. И. Верхнекамское месторождение солей / А. И. Кудряшов. - 2-е изд., перераб. - М.: Эпсилон Плюс, 2013. - 368 с.
3. Барях, А. А. Горнотехнические аварии: затопление Первого Березниковского калийного рудника / А. А. Барях, А. Е. Красноштейн, И. А. Санфилов // Вестник Пермского научного центра УрО РАН. - 2009. - № 2. - С. 40-49.
4. Шиман, М. И. Предотвращение затопления калийных рудников. - М.: Недра, 1992. - 176 с.
5. Тенисон, Л. О. Прогнозирование вертикальных деформаций земной поверхности в условиях затопленного рудника БКПРУ-1 // ГИАБ. - 2016. - № 1. - С. 230-242.
6. Ковалев, О. В. Некоторые подходы к обеспечению безопасной отработки калийных месторождений / О. В. Ковалев, С. П. Мозер // Записки Горного института. - 2014. - Т. 207. - С. 55-59.
7. Борзаковский, Б. А. О возможности образования новых провалов на затопленном руднике БКПРУ-1 / Б. А. Борзаковский, В. Н. Аптуков, Л. О. Тенисон // ГИАБ. - 2015. - № 10. - С. 5-13.
8. Whyatt, J. Catastrophic Failures of Underground Evaporite Mines / J. Whyatt, F. Varley // Proceedings of the 27th International Conference on Ground Control in Mining. - West Virginia: National Institute for Occupational Safety and Health, 2008. - P. 113-122.
9. Time Series Effect on Surface Deformation above Goaf Area with Multiple-Seam Mining / Z. Shi, Q. Wang, P. Wang [et al.] // Symmetry. - 2020. - Vol. 12. - P. 1428.
10. Engineering geology and ground collapse mechanism in the Chengchao Iron-ore Mine in China / K. Xia, C. Chen, Y. Zheng, H. Zhang // Engineering Geology. - 2019. - Vol. 249. - P. 129-147.
11. Investigation of processes of rocks deformation and the earth's surface subsidence during underground coal mining / V. Buzlyo, A. Pavlychenko, O. Borysovskaya, D. Saveliev // E3S Web of Conferences. - 2019. - Vol. 123. - P. 01050.

12. Luan, Y. Surface and New Building Deformation Analysis of Deep Well Strip Mining / Y. Luan, Y. Dong, Y. Ma // *Advances in Materials Science and Engineering*. - 2020. - Vol. 2. P. 1-14.
13. Harms, S. Overburden Subsidence and Sinkholes / S. Harms, H. Konietzky. - TU Bergakademie FREIBERG, Institut für Geotechnik, 2020.
14. Казаковский, Д. А. Сдвигание земной поверхности под влиянием горных разработок / Д. А. Казаковский. - М.: Углетехиздат, 1953. - 228 с.
15. Гудков, В. М. Математическая обработка маркшейдерско-геодезических измерений: учебник для вузов / В. М. Гудков, А. В. Хлебников. - М.: Недра, 1990. - 335 с.
16. Азаров, Б. Ф. Решение задач по теории ошибок геодезических измерений / Б. Ф. Азаров, И. В. Карелина; Алт. гос. техн. ун-т им. И. И. Ползунова. - Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 2013. - 29 с.
17. Единый проект производства маркшейдерских работ на объектах ПАО «Уралкалий». 3-я редакция. - Березники, 2018.
18. Указания (мероприятия) по защите рудников ПАО «Уралкалий» от затопления и охране объектов на земной поверхности от вредного влияния подземных разработок на ВКМКС: Методические рекомендации: в двух частях / ГИ УрО РАН. - Пермь, 2022.
19. Правила охраны сооружений и природных объектов от вредного влияния подземных горных разработок на угольных месторождениях. - СПб., 1998. - 291 с.
20. РД 07-166-97: Инструкция по наблюдениям за сдвиганиями земной поверхности и расположенными на ней объектами при строительстве в Москве подземных сооружений [Электронный ресурс]. - URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200029700> (дата обращения: 11.04.2024).
21. Михайлова, Т. В. Сдвигание и деформации пород и земной поверхности при ведении горных работ / Т. В. Михайлова, Т. Б. Рогова. - Кемерово: КузГТУ, 2017. - 110 с.

REFERENCES

1. 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.).
2. Kudryashov AI. Verkhnekamsk salt deposit. 2nd ed., revised. Moscow, 2013 (In Russ.).
3. Baryakh AA, Krasnoshtein AE, Sanfirov IA/ Mining accidents: flooding of the First Berezniki potash mine. *Bulletin of the Perm Scientific Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences*. 2009;2:40-9 (In Russ.).
4. Shiman MI. Avoiding of flooding of potassium mines. Moscow: Nedra, 1992 (In Russ.).
5. Tenison LO. Prediction of vertical deformations of ground surface in conditions of flooded mine Berezniki 1. *GIAB*. 2016;1:230-42 (In Russ.).
6. Kovalev OV, Mozer SP. Some approaches to secure mining of potash deposits. *Journal of Mining Institute*. 2014;207:55-9 (In Russ.).
7. Borzakovskiy BA, Aptukov VN, Tenison LO. On possibility of new sink holes in the flooded mine Berezniki 1. *GIAB*. 2015;10:5-13 (In Russ.).
8. Whyatt J, Varley F. Catastrophic Failures of Underground Evaporite Mines. *Proceedings of the 27th International Conference on Ground Control in Mining. West Virginia: National Institute for Occupational Safety and Health*, 2008.
9. Shi Z, Wang Q, Wang P, et al. Time Series Effect on Surface Deformation above Goaf Area with Multiple-Seam Mining. *Symmetry*. 2020;12:1428.
10. Xia K, Chen C, Zheng Y, et al. Engineering geology and ground collapse mechanism in the Chengchao Iron-ore Mine in China. *Engineering Geology*. 2019;249:129-47.
11. Buzlyo V, Pavlychenko A, Borysovska O, et al. Investigation of processes of rocks deformation and the earth's surface subsidence during underground coal mining. *E3S Web of Conferences*. 2019;123:01050.
12. Luan Y, Dong Y, Ma Y. Surface and New Building Deformation Analysis of Deep Well Strip Mining. *Advances in Materials Science and Engineering*. 2020;(2):1-14.
13. Harms S, Konietzky H. Overburden Subsidence and Sinkholes. TU Bergakademie FREIBERG, Institut für Geotechnik, Updated: 26 October 2020.
14. Kazakovskiy DA. The displacement of the earth's surface under the influence of mining. Moscow:Ugletekhizdat, 1953 (In Russ.).
15. Gudkov VM, Khlebnikov AV. Mathematical processing of mine surveying and geodetic measurements: Proc. for universities. Moscow: Nedra, 1990 (In Russ.).
16. Azarov BF, Karelina IV. Solving problems in the theory of errors of geodetic measurements / Alt. state tech. un-t im. I.I. Polzunov. Barnaul, 2013 (In Russ.).
17. A single project for the production of surveying work at the facilities of PJSC «Uralkali». 3rd edition. Berezniki, 2018 (In Russ.).
18. 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. 2 Part. Perm, 2022 (In Russ.).
19. Rules for the protection of structures and natural objects from the harmful effects of underground mining in coal deposits. St. Petersburg, 1998 (In Russ.).
20. GD 07-166-97: Instructions for observing the movements of the earth's surface and objects located on it during the construction of underground structures in Moscow. Available from: <https://docs.cntd.ru/document/1200029700> (In Russ.).
21. Mikhailova TV, Rogova TB. Movement and deformation of rocks and earth surface during mining. Kemerovo: KuzGTU, 2017 (In Russ.).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Щегольков Юрий Сергеевич:

главный специалист,
аналитический отдел проектно-аналитического управления,
ПАО «Уралкалий»,
г. Березники, Россия

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Shchegolkov Yuri Sergeevich:

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