

# ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГРАНИЧНЫХ УГЛОВ ПРОЦЕССА СДВИЖЕНИЯ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ ПРИ ОТРАБОТКЕ ЗАПАСОВ ВЕРХНЕКАМСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ КАЛИЙНО-МАГНИЕВЫХ СОЛЕЙ

Ю. С. Щегольников✉

ПАО «Уралкалий», г. Березники, Российская Федерация

✉ [rabota.shegolkov@mail.ru](mailto:rabota.shegolkov@mail.ru)

**Аннотация:** Приведены результаты исследований, направленных на поиск временной зависимости изменения величин граничных углов от основных возможных влияющих факторов. В ходе проведенного исследования выявлено, что граничные углы подвержены изменениям главным образом на начальном этапе развития процесса сдвижения. Установлена математическая модель, позволяющая определить значение граничного угла в зависимости от величины достигнутого оседания над центром зоны, примыкающей к постоянной границе выработанного пространства. Результаты исследования могут быть полезными при совершенствовании нормативной базы по рассматриваемой тематике, а также при разработке мероприятий, направленных на охрану поверхностных объектов от вредного влияния подземных горных работ.

**Ключевые слова:** угловые параметры процесса сдвижения, граничные углы, сдвижение, мульда, безопасность обрабатываемых объектов

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

**Для цитирования:** Щегольников Ю. С. Определение граничных углов процесса сдвижения земной поверхности при отработке запасов Верхнекамского месторождения калийно-магниевого солей. *Маркшейдерия и недропользование*. 2024;(6):25-32. [https://doi.org/10.56195/20793332\\_2024\\_6\\_25\\_32](https://doi.org/10.56195/20793332_2024_6_25_32).

# DETERMINATION OF BOUNDARY ANGLES OF THE PROCESS OF EARTH'S SURFACE DISPLACEMENT DURING THE MINING OF RESERVES OF THE VERKHNEKAMSKOE DEPOSIT OF POTASSIUM-MAGNESIUM SALTS

Y. S. Shchegolkov✉

PJSC «Uralkali», Berezniki, Russian Federation

✉ [rabota.shegolkov@mail.ru](mailto:rabota.shegolkov@mail.ru)

**Abstract:** The study of the displacement process is undoubtedly relevant for ensuring the safety of undermining of buildings and structures on the earth's surface, as well as when planning construction in undermining areas. Of particular importance when assigning protection measures is the determination of expected deformations of the earth's surface, the location and numerical value of which, in the absence of instrumental observations on the considered section of the mine field, are closely related to the angular parameters of the displacement process. The fixed values of boundary angles currently used in practice do not always allow for reliable calculation of the length of the displacement half-trough and, as a result, for correct calculation of the expected deformations. The article presents the results of studies aimed at finding the time dependence of changes in the values of boundary angles on the main possible influencing factors. The study revealed that the boundary angles are subject to changes mainly at the initial stage of the displacement process. A mathematical model has been established that allows determining the value of the boundary angle depending on the amount of subsidence achieved above the center of the zone adjacent to the constant boundary of the mined-out space. The results of the study may be useful in improving the regulatory framework on the topic under consideration, as well as in developing measures aimed at protecting surface objects from the harmful effects of underground mining operations.

**Keywords:** angular parameters of the displacement process, boundary angles, displacement, trough, safety of the objects being processed

**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. Determination of boundary angles of the process of earth's surface displacement during the mining of reserves of the Verkhnekamskoe deposit of potassium-magnesium salts. *Mine Surveying and Subsurface Use*. 2024;(6):25-32. (In Russ.). [https://doi.org/10.56195/20793332\\_2024\\_6\\_25\\_32](https://doi.org/10.56195/20793332_2024_6_25_32).

### Введение

На Верхнекамском месторождении калийно-магниевых солей (ВМКМС) широкое распространение получило применение камерной системы разработки с поддержанием кровли ленточными целиками. Постепенное разрушение оставляемых междукамерных целиков и междупластий сопровождается нарушением естественного равновесного состояния породного массива, в результате чего происходит перемещение (сдвижение) толщи горных пород в сторону выработанного пространства.

В работах М. П. Нестерова, Н. Ф. Аникина, А. В. Львовой и др. [1–4] выявлено, что процесс сдвижения на ВМКМС, даже в пределах отдельных частей шахтного поля, может отличаться многообразием характерных особенностей его протекания: мульда способна приобретать достаточно сложную форму, которая изменяется во времени на разных ее участках по различным законам, при этом интенсивность протекания процесса может варьироваться от нескольких мм в год до нескольких мм в сутки, а продолжительность — от нескольких лет до десятилетий. Это обуславливается большим количеством влияющих факторов как геологических (различия в глубинах отработки, составе породной толщи, строении ВЗТ, прочностных характеристиках пород, слагающих отработываемые пласты и пр.), так и горнотехнических (количество отработываемых пластов, их вынимаемая мощность, размеры выработанного пространства и оставляемых целиков, наличие и тип закладочного материала и пр.).

Развитие процесса сдвижения в той или иной степени оказывает отрицательное влияние на подрабатываемые поверхностные и подземные объекты, вызывая в них конструкционные нарушения, что в конечном результате способно привести к значительным повреждениям зданий и сооружений, вплоть до их разрушения [5–9]. Особенно важным при назначении мер охраны является определение ожидаемых вертикальных (наклон, кривизна) и горизонтальных деформаций земной поверхности, которые в случае отсутствия данных инструментальных наблюдений на рассматриваемом участке шахтного поля рассчитываются в точках главных сечений мульды с использованием безразмерных функций распределения соответствующих величин. Местоположение и численное значение ожидаемых деформаций тесно связано с граничными углами. Так, если граничные точки, определяющие длину формируемой полумульды сдвижения, смещаются в пределах какого-то интервала, то происходит смещение и изменение численного значения ожидаемой деформации.

В качестве примера было рассмотрено условие полной подработки (углы полных сдвижений  $\psi = 55^\circ$  [10]) при максимальном оседании  $\eta_m = 1,5$  м и глубине разработки  $H = 350$  м. В этом варианте отклонение на  $1^\circ$  от используемого на практике значения граничного угла ( $\delta_0 = 55^\circ$ ) приводит к изменению размеров расчетной длины мульды  $L$  на величину, близкую к 10 м. Это отражается на последующих изменениях максимальных ожидаемых деформаций (без учета коэффициентов перегрузки) —  $\Delta i$  до  $0,12 \cdot 10^{-3}$ ,  $\Delta K$  до  $0,02 \cdot 10^{-4}$ ,  $\Delta \varepsilon$  до  $0,01 \cdot 10^{-3}$ . Таким образом, величины граничных углов можно отнести к одной из важнейших составляющих исследования процесса сдвижения [11–15], в основе изучения которого на

ВМКМС лежат систематические инструментальные наблюдения по профильным линиям реперов на земной поверхности.

За время отработки месторождения величины граничных углов и подходы к их определению непрерывно изменялись, что было отражено в нормативных документах, регламентирующих меры защиты рудников от затопления и охрану подрабатываемых объектов на ВМКМС, указаниях и инструкциях, периодически издаваемых начиная с 1960 года. Неизменным лишь оставалось постоянство значений граничных углов по восстанию, падению и простиранию пластов вследствие принятого допущения об условно горизонтальном залегании калийно-магниевого залежи.

Первые значения граничных углов  $\delta_0 = 45^\circ$  были приняты в «Указаниях...» (1972 года) и оставались неизменными вплоть до 1985 года, когда их величины были изменены на  $50^\circ$ . В «Инструкции...» (1994 г.) впервые была установлена взаимосвязь величин граничных углов со степенью нагружения  $C$ , оставляемых при отработке запасов междукамерных целиков, и отношением достигнутого или расчетного оседания на заданный период времени  $\eta(t_i)$  к максимальному конечному  $\eta_m$ . Так, при  $C \leq 0,4$  значение граничного угла принималось равным  $50^\circ$ , а при  $C > 0,4$  значение, лежащее в диапазоне от  $50^\circ$  до  $75^\circ$ , определялось по таблице из отношения  $k_t = \eta(t_i) / \eta_m$ .

В последующей версии «Указаний...» (2004 год) значение  $\delta_0$  при  $C \leq 0,4$  осталось неизменным, а табличная форма определения  $\delta_0$  при  $0,4 < C \leq 0,7$  была преобразована в зависимость

$$\delta_0 = \arccotg(0,839 k_t^{0,686}),$$

где  $k_t$  — коэффициент, соответствующий отношению достигнутого оседания  $\eta(t_i)$  к максимальному расчетному  $\eta_m$ .

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

$$\delta_{оп} = \arccotg((\chi - 0,15)\chi \frac{ctg \delta_0}{1,75}),$$

где  $\chi$  — коэффициент, определяемый отношением размеров выработанного пространства  $D$  к глубине разработки  $H$ ;

$\delta_0$  — значение граничного угла для условий полной подработки, принимаемое равным  $50$  при  $C \leq 0,55$  и вычисляемое при  $0,55 < C \leq 0,70$  из выражения

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

здесь  $C$  — показатель степени нагружения междукамерных целиков.

В последних версиях «Указаний...» (2014 и 2022 года) для расчета деформаций вдоль постоянных границ выработанного пространства приняты фиксированные величины граничных углов  $\delta_0 = 55$ , использование которых на практике далеко не всегда позволяет с достаточной степенью достоверности определить длину полумульды сдвижения и в конечном итоге приводит к ошибкам в определении ожи-

даемых деформаций. Кроме того, используемые в настоящее время величины  $\delta_0$  не всегда отражают фактическое местоположение границы мульды, которое склонно изменяться ввиду продолжительности процесса сдвижения. Дополнительно можно отметить, что в работе [16] актуализированы ранее используемые на практике граничные критерии, позволяющие установить местоположение границы мульды (граничной точки), что в свою очередь также формирует необходимость пересмотра величин граничных углов.

Обобщая вышеизложенное, можно сделать вывод о необходимости поиска временной зависимости граничных углов  $\delta_0$  от основных факторов, таких как геологические, горнотехнические.

**Цель исследования:** определение временной зависимости изменения величин граничных углов процесса сдвижения земной поверхности в зависимости от основных возможных влияющих факторов при отработке 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, а также корреляционно-регрессионный анализ сформированного массива данных.

### Результаты исследований

#### *Выявление наиболее значимых факторов, которые могли бы оказать влияние на формирование граничных углов*

Первым этапом исследования будет являться выявление наиболее значимых факторов, которые могли бы оказать влияние на формирование граничных углов  $\delta_0$ . Рассматривая этот вопрос в широком смысле, уместно отметить, что местоположение граничной точки мульды на отдельно взятом участке может быть связано с особенностями развития процесса сдвижения, которые в свою очередь формируются особенностями отработки полезного ископаемого и особенностями строения породного массива.

Особенности отработки полезного ископаемого являются первопричиной развития процесса сдвижения и тесно связаны со сформированной геомеханической системой, образованной четырьмя основными элементами: камерой, закладкой, междуканальным целиком, междупластом. Первые два из перечисленных элементов задают возможный потенциально реализуемый объем пустот, а постепенное разрушение двух последних определяет характер и скорость развития процесса сдвижения.

Как правило, в широкой инженерной практике при расчете сдвижений не прибегают к прямому использованию возможного потенциально реализуемого объема пустот, а применяют вместо этого параметра его линейную альтернативу — расчетное значение максимального оседания  $\eta_m$ .

Скорость разрушения оставляемых целиков в условиях отработки запасов ВМКМС определяются величиной степени их нагружения  $C$ , которую также можно отнести к косвенным показателям оценки характера развития процесса сдвижения. Разрушение оставляемых целиков и погашение пустот выработанного пространства наиболее точно можно отследить по результатам обработки натурных инструментальных наблюдений по профильным линиям реперов на

земной поверхности. В рассматриваемом случае наиболее значимым критерием являются достигнутые оседания  $\eta(t_i)$  над центром зоны, непосредственно примыкающей к границе выработанного пространства.

Особенности строения породного массива определяют характер его поведения под воздействием факторов, формируемых особенностями отработки полезного ископаемого.

В рассматриваемом случае влияние на местоположение граничной точки можно связать:

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

Одним из примеров последних являются наносы [17], покрывающие подавляющую часть осваиваемой площади месторождения. Согласно «Правилам охраны...» [18], угловые параметры в наносах учитываются при их мощности более 5 м. На ВМКМС мощность наносов достигает 65 м (скв. № 1018) и составляет в среднем 10,6 м. Помимо наносов, в разрезе надсолевой толщи присутствуют и другие близкие к ним по крепости породы ( $f$  до 1), представленные глинами, которые встречаются в терригенно-карбонатной и пестроцветной толщах. Распространены такие слои преимущественно в северо-западной части месторождения, суммарная их мощность на отдельных участках превышает 50 м (скв. № 54, 867, 142с, 1026 и др.) и составляет в среднем по месторождению 7,7 м. Таким образом, в рассматриваемом случае целесообразен комплексный учет слабых пород в разрезе надсолевой толщи. При этом для выделения отдельных слоев, участвующих в суммировании, целесообразно воспользоваться значением мощности 5 м по аналогии с ранее обозначенным критерием учитываемой мощности наносов.

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

В вопросе учета углов залегания отрабатываемых пластов  $\alpha$  по отношению к постоянной границе выработанного пространства, пересекаемой профильной линией, можно отметить, что в осваиваемой части месторождения наблюдается преимущественно пологое залегание свиты промышленных пластов ( $\alpha$  от  $0^\circ$  до  $4^\circ$ ), при этом участки с относительно высокими значениями углов падения ( $\alpha \geq 4^\circ$ ) локализуются в немногочисленных местах, характеризующихся наличием высокоамплитудных складок.

Обобщая вышеизложенное, можно заключить, что для следующего этапа исследования, направленного на выявление зависимости граничных углов  $\delta_0$  от основных возможных влияющих факторов, стоит принять во внимание: расчетные

значения максимальных оседаний  $\eta_m$ , достигнутые оседания  $\eta(t_i)$ , степени нагружения оставляемых целиков  $C$ , углы залегания отработанных пластов  $\alpha$ , глубины разработки  $H$ , а также суммарные мощности слабых  $\Sigma m_{\text{сп.}}$  и крепких  $\Sigma m_{\text{кп.}}$  пород в разрезе надсолевой толщи. Такой комплексный параметр, как степень нагружения оставленных целиков  $C$ , ввиду возможных различий его значения на разных отработанных пластах в анализируемых зонах нуждается в отдельном подходе анализа.

**Исследование зависимости граничных углов от основных наиболее значимых влияющих факторов**

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

Расчет значений  $\delta_{0i}$  производился из зависимости

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

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

$z_{ti}$  — абсцисса граничной точки 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 граничных критериев. В соответствии с работой [16], за границу мульды при наличии опорных реперов в краевой ее части может быть принята точка, получившая оседание  $\eta = 6$  мм. В качестве дополнительного уточняющего критерия может быть использована величина наклона  $i = 0,15 \cdot 10^{-3}$ .

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

Затем в центральных частях зон, пересекаемых отобранными профильными линиями и непосредственно примыкающих к границам выработанного пространства, определены величины достигнутых к датам инструментальных наблюдений оседаний  $\eta(t_i)$ . Также для рассматриваемых зон, опираясь на фактические горнотехнические параметры отработки запасов, в соответствии с методикой нормативного документа [10], определены показатели степени нагружения отработанных пластов  $C$  и расчетные суммарные значения максимальных оседаний  $\eta_m$ .

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

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

Таблица / Table

**Корреляционная матрица исходного массива данных / Correlation matrix of the original data array**

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

Из таблицы видно, что некоторая линейная взаимосвязь  $\delta_0$  прослеживается лишь с параметром  $\eta(t_i)$ , также видно отсутствие мультиколлинеарности между парами отдельных параметров. Поиск линейной многофакторной модели зависимости  $\delta_0$  от  $\eta(t_i)$ ,  $\Sigma m_{\text{сп.}}$ ,  $\Sigma m_{\text{кп.}}$ ,  $\alpha$ ,  $H$ ,  $\eta_m$  с последовательным исключением из рассмотрения факторов, обладающих малой значимостью по  $t$ -критерию Стьюдента, ожидаемо не привел к получению адекватного уравнения. В ходе моделирования было замечено, что распределение остатков величин  $\eta(t_i)$  имеет вид, близкий к степенной функции, что дает основание для дальнейшего рассмотрения многофакторной степенной регрессии.

При поиске степенной математической модели зависимости  $\delta_0$  от рассматриваемых возможных влияющих факторов, с последовательным исключением из рассмотрения тех из них, которые обладают малой значимостью по  $t$ -критерию Стьюдента, получено следующее уравнение регрессии

$$\delta_{0i} = 53,91 \frac{\eta_m^{0,05}}{\eta(t_i)^{0,07}}, \quad (1)$$

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

$\eta_m$  — расчетное значение максимального оседания над зоной, непосредственно примыкающей к границе выработанного пространства, м.

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

Принимая во внимание параметры  $\eta_m$  и  $\eta(t_i)$ , справедливо заметить, что первый из них является расчетной величиной, постоянной для каждого из рассматриваемых участков профильных линий, в то время как значения граничных углов  $\delta_0$  непостоянны на различные даты инструментальных наблюдений, поэтому оценивать взаимосвязь пары параметров  $\delta_0$  и  $\eta_m$  напрямую нецелесообразно. Относительно второго параметра  $\eta(t_i)$  прослеживается выраженная нелинейная

сгруппированность величин  $\delta_0$ , наглядно отраженная на рисунке 1.

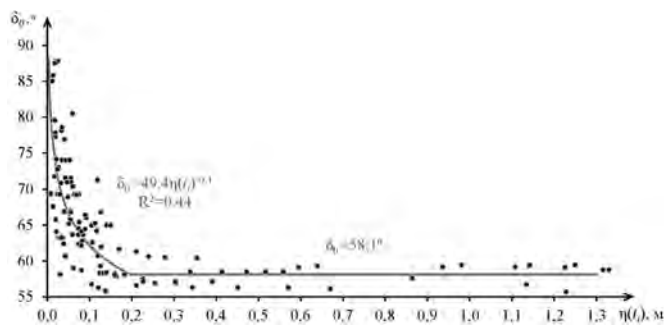


Рис. 1. Корреляционное поле значений граничных углов  $\delta_0$  и достигнутых оседаний  $\eta(t)$  /

Fig. 1. Correlation field of values of boundary angles  $\delta_0$  and achieved settlements  $\eta(t)$

Из рисунка 1 можно заметить, что величины  $\delta_0$  лежат в диапазоне от  $55,1^\circ$  до  $87,8^\circ$ , а значения  $\eta(t)$  изменяются от 0,008 до 2,048 м. Наибольшие изменения величин  $\delta_0$  прослеживаются на интервале  $\eta(t)$  от 0 до 0,2 м, после чего наблюдается выраженная консолидация их значений на уровне  $55,1\text{--}61,3^\circ$ .

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

$$\delta_{0i} = 49,4\eta(t_i)^{-0,1}, \quad (2)$$

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

Выражение (2) характеризуется средней относительной ошибкой определения граничного угла  $\epsilon_{\text{ср.}} = 6,6\%$ , а максимальная ошибка составляет  $\epsilon_{\text{макс.}} = 21,2\%$ . Наибольшие относительные ошибки тяготеют к первой половине интервала, т. е.  $\eta(t) \in (0; 0,1)$  м. На второй половине интервала  $\eta(t) \in [0,1; 0,2)$   $\epsilon_{\text{макс.}}$  составляет 14,3 %. На интервале  $\eta(t) \geq 0,2$  м, представляющем наибольший практический интерес, величины  $\delta_0$  имеют разброс от  $55,1^\circ$  до  $61,3^\circ$ , составляя в среднем  $\delta_{0\text{ср.}} = 58,1^\circ$ . Относительные ошибки отклонения фактических величин  $\delta_0$  от  $\delta_{0\text{ср.}}$  равны  $\epsilon_{\text{ср.}} = 2,3\%$ ,  $\epsilon_{\text{макс.}} = 5,4\%$ .

Для принятия решения о значимости и дальнейшем использовании ранее упомянутого критерия максимального расчетного оседания  $\eta_m$  уместно рассмотреть некоторое усложнение полученной модели зависимости граничных углов  $\delta_0$  от достигнутого оседания  $\eta(t)$  путем комбинирования критериев  $\eta(t)$  и  $\eta_m$ . Среди возможных их комбинаций в первую очередь необходимо рассмотреть отношение достигнутого оседания  $\eta(t)$  к максимальному расчетному  $\eta_m$ , которое ранее уже использовалось на практике.

Оценивая распределение  $\delta_0$  относительно  $\eta(t)/\eta_m$ , можно также отметить выраженную нелинейную сгруппированность данных, наглядно отраженную на рисунке 2.

Из рисунка 2 видно, что наибольшие изменения  $\delta_0$  прослеживаются в диапазоне  $\eta(t)/\eta_m$  от 0 до 0,1, после чего наблюдается плавное уменьшение их величин до значения, близкого к  $55^\circ$ . Изменение граничных углов  $\delta_0$  в рассматриваемом случае может быть охарактеризовано зависимостью

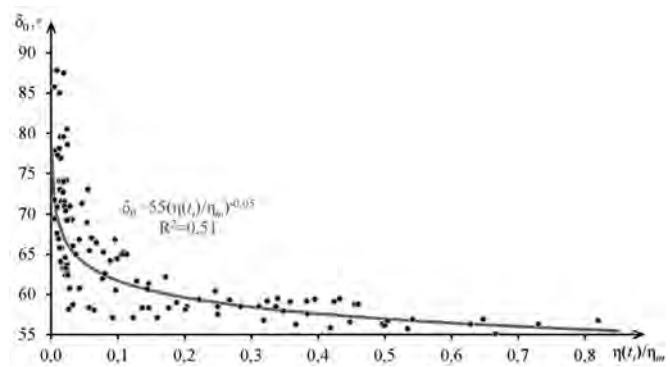


Рис. 2. Корреляционное поле значений граничных углов  $\delta_0$  и отношений достигнутого оседания к максимальному расчетному  $\eta(t)/\eta_m$  /

Fig. 2. Correlation field of the values of the boundary angles  $\delta_0$  and the ratios of the achieved subsidence to the maximum calculated  $\eta(t)/\eta_m$

$$\delta_{0i} = 55\left(\frac{\eta(t_i)}{\eta_m}\right)^{-0,05}, \quad (3)$$

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

$\eta_m$  — расчетное значение максимального оседания над зоной, непосредственно примыкающей к границе выработанного пространства м.

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

Сравнивая полученные модели зависимости граничных углов  $\delta_0$  от факторов  $\eta(t)$  и  $\eta(t)/\eta_m$ , можно отметить сопоставимую простоту их практического использования и похожие величины относительных погрешностей определения искомой величины. Основной отличительной особенностью моделей является описание области, следующей за начальной стадией развития процесса сдвижения. В первом случае предлагается фиксированная величина граничного угла, а во втором функциональная зависимость, описывающая плавное уменьшение искомой величины до значения, близкого к  $55^\circ$ . Учитывая тенденцию распределения величин  $\delta_0$  на начальном этапе развития процесса сдвижения, вторая из моделей выглядит более достоверной, поэтому предпочтение стоит отдать ей.

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

Последним нерассмотренным фактором является показатель степени нагружения  $C$ . Анализируя распределения  $\delta_0$  относительно параметра  $C$ , нельзя отметить наличия какой-либо видимой их взаимосвязи. В рассматриваемом случае, как было отмечено ранее, основной сложностью учета величины степени нагружения  $C$  являются различные значения этого показателя на разных отработанных пластах в рассмотренных зонах, кроме того, рассчитанные показатели  $C$  нельзя считать достоверными для всех этапов развития процесса сдвижения, поскольку выработанная на сегодняшний день методика приближенной оценки  $C$  базируется на условиях:

- действующая на целик нагрузка равна весу породного столба, приходящегося на поддерживаемую им площадь выработанного пространства и площадь самого целика;

- несущая способность целика равна тому значению, которое он имеет сразу же после оконтуривания его горными выработками.

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

Наиболее простым способом оценки влияния рассматриваемого показателя  $C$  является разбиение исходного массива данных  $\delta_0$  на два диапазона по максимальным значениям степени нагружения целиков среди отработанных пластов в анализируемых зонах ( $C \leq 0,4$  и  $C > 0,4$ ) с последующей оценкой их эмпирического корреляционного отношения  $\eta_{\text{эмп}}$  [19]. Рассчитанная величина  $\eta_{\text{эмп}} \approx 0,01$ , что свидетельствует об отсутствии связи между  $\delta_0$  и  $C$ .

Альтернативным способом оценки влияния степени нагружения  $C$  на формирование величин граничных углов  $\delta_0$  является рассмотрение этого параметра как фактора, определяющего скорость развития процесса сдвижения  $\eta'_r$ , т. е.  $\eta'_r = f(C)$ .

В такой постановке задачи уместно оценить взаимосвязь годовых скоростей изменения граничных углов  $\delta'_0$  и фактических оседаний  $\eta'_r$ , что наглядно отражено на рисунке 3.

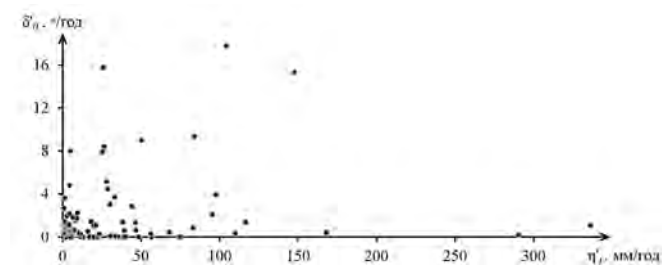


Рис. 3. Корреляционное поле скоростей изменения граничных углов  $\delta'_0$  и скоростей фактических оседаний  $\eta'_r$   
Fig. 3. Correlation field of rates of change of boundary angles  $\delta'_0$  and actual subsidence rates  $\eta'_r$

Из рисунка 3 видно отсутствие взаимосвязи между параметрами  $\delta'_0$  и  $\eta'_r$ , следовательно, степень нагружения  $C$  нельзя отнести к значимым факторам, оказывающим влияние на формирование величин граничных углов  $\delta_0$ . Таким образом, вышерассмотренные методики определения граничных углов  $\delta_0$ , использовавшиеся до 2008 года, можно считать недостоверными, чем и объясняется последующий отказ от их использования.

## Выводы

Выполненное исследование позволяет сделать следующие выводы:

1. В условиях отработки запасов на ВМКМС значения граничных углов  $\delta_0$  подвержены изменениям на начальном этапе развития процесса сдвижения и зависят от отношения достигнутого оседания над центром зоны, примыкающей к постоянной границе выработанного пространства  $\eta(t_r)$  к максимальному расчетному значению  $\eta_m$ .

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

3. Полученные результаты исследования направлены на снижение вероятности опасных последствий подземной подработки поверхностных объектов на ВМКМС и могут быть полезными при совершенствовании нормативной базы по рассматриваемой тематике.

4. В случае отсутствия данных инструментальных наблюдений на рассматриваемом участке шахтного поля для определения ожидаемых деформаций земной поверхности, помимо вышерассмотренных величин граничных углов  $\delta_0$ , высокой значимостью обладает вопрос обоснования величин углов полных сдвижений и максимальных оседаний. Также, учитывая, что краевая часть мульды изменяет форму непрерывно с развитием процесса сдвижения, особый интерес представляет вопрос исследования характера изменений во времени распределений относительных оседаний, наклонов и кривизны. Решение обозначенных вопросов можно отнести к последующим целям исследования.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Нестеров, М. П. Основные особенности закономерностей деформаций земной поверхности на калийных рудниках / М. П. Нестеров, А. В. Львова, Н. Ф. Аникин // Строительные конструкции, НИИСК. — Киев: Будивельник, 1974. — Вып. 23.
2. Нестеров, М. П. Основные закономерности деформирования земной поверхности на Верхнекамском калийном месторождении и методы его предрасчета / М. П. Нестеров, Н. Ф. Аникин // Механика горных пород при разработке природных солей: Тр. ВНИИГ. — Л., 1974. — Вып. 67. — С. 3—21.
3. Нестеров, М. П. Особенности процесса деформирования земной поверхности на калийных месторождениях и специфика их учета при выборе конструктивных мер защиты подрабатываемых объектов / М. П. Нестеров // Доклады на Международном симпозиуме по защите окружающей среды от последствий подземной эксплуатации минерального сырья. — Тузла (Югославия), 1975.
4. Аникин, Н. Ф. Особенности формирования краевых частей мульды сдвижения в условиях Верхнекамского месторождения / Н. Ф. Аникин

кин, А. В. Львова, Э. Ф. Бешенцева // Контроль, прогнозирование и управление состоянием пород в калийных рудниках: сб. науч. тр. — Л.: ВНИИГ, 1985. — 186 с.

5. Усанов, С. В. Исследование причин повреждений жилых малоэтажных зданий в зоне влияния подземных горных работ / С. В. Усанов, Ю. П. Коновалова, А. В. Усанова // Известия ТулГУ. Науки о Земле. — 2023. — № 2. — С. 334–346.

6. Research on reasonable mining scheme for coal recovery in thick coal seam under buildings and other structures / M. Zhanga, Y. Zhangb, M. Jia [et al.] // Journal of Mines, Metals and Fuels. — 2019. — Vol. 67, № 2. — P. 90–98.

7. Guo, G. An approach to protect cultivated land from subsidence and mitigate contamination from colliery gangue heaps / G. Guo, H. Li, J. Zha // Process Safety and Environmental Protection. — 2019. — Vol. 124. — P. 336–344. — DOI: 10.1016/j.psep.2019.03.004.

8. Combining subsidence theory and slope stability analysis method for building damage assessment in mountainous mining subsidence regions / X. Diao, K. Wu, D. Zhou [et al.] // PLOS ONE. — 2019. — Vol. 14, № 2. — P. 0210021. — DOI: 10.1371/journal.pone.0210021.

9. Pawluszek-Filipiak, K. Integration of DInSAR and SBAS Techniques to Determine Mining-Related Deformations Using Sentinel-1 Data: The Case Study of Rydułtowy Mine in Poland / K. Pawluszek-Filipiak, A. Borkowski // Remote Sensing. — 2020. — Vol. 12, № 2. — P. 242. — DOI: 10.3390/rs12020242.

10. Указания (мероприятия) по защите рудников ПАО «Уралкалий» от затопления и охране объектов на земной поверхности от вредного влияния подземных разработок на ВКМКС / ГИ УрО РАН. — Пермь, 2022.

11. Казаковский, Д. А. Сдвигение земной поверхности под влиянием горных разработок / Д. А. Казаковский. — М.: Углетехиздат, 1953. — 228 с.

12. Посыльный, Ю. В. Геометрия мульды сдвижения земной поверхности над горными выработками угольных шахт / Ю. В. Посыльный. — Новочеркасск: ЮРГТУ (НПИ), 2012. — 216 с.

13. Викторов, С. Д. Сдвигение и разрушение горных пород / С. Д. Викторов, М. А. Иофис, С. А. Гончаров; [Отв. ред. К. Н. Трубецкой]. — М.: Наука, 2005. — 277 с.

14. Назаренко, В. А. Исследование зависимости граничных углов от мощности наносов и глубины разработки / В. А. Назаренко, И. Е. Балафин // Наукові праці УКРНДМІ НАН України / Під заг. ред. А. В. Анциферова. — Донецьк, УкрНДМІ НАН України, 2011. — Вип. 9. — С. 180–189.

15. Гвинианидзе, Д. В. Исследование граничных угловых параметров на шахтах Западного Донбасса / Д. В. Гвинианидзе, В. А. Назаренко, А. С. Кучин // Геотехнічна механіка: Межвед. сб. науч. тр. — Днепропетровск: ИГТМ НАНУ, 2013. — Вип. 110. — С. 50–62.

16. Щегольков, Ю. С. Обоснование критериев основных угловых параметров процесса сдвижения для условий отработки запасов Верхнекамского месторождения калийно-магнєвых солей / Ю. С. Щегольков // Маркшейдерия и недропользование. — 2024. — № 3. — С. 42–54.

17. Лонжид, Э. Определение граничных углов четвертичного отложения на основе физико-механических свойств горных пород / Э. Лонжид // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2017. — № 4 — С. 337–344.

18. Правила охраны сооружений и природных объектов от вредного влияния подземных горных разработок на угольных месторождениях. — СПб., 1998. — 291 с.

19. Гмурман, В. Е. Теория вероятностей и математическая статистика: учебное пособие для вузов / В. Е. Гмурман. — М.: Высшая школа, 2003. — 479 с.

## REFERENCES

1. 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.).

2. 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.).

3. 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.).

4. 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 (In Russ.).

5. 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. *Izvestia of Tula State University. Geosciences*. 2023;2:334-46 (In Russ.).

6. Zhanga M, Zhangb Y, Jia M, et al. 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.

7. 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.

8. 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.

9. 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.

10. 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. MI Ural Branch of the Russian Academy of Sciences. Perm, 2022 (In Russ.).

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

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

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

14. Nazarenko VA, Balafin IE. Study of the dependence of boundary angles on the thickness of sediments and the depth of development. Sciences practices OF UKRNDMI NAS Ukraine. Donetsk, 2011;9:180-9 (In Russ.).

15. Gvinianidze DV, Nazarenko VA, Kuchin AS. Study of boundary angular parameters in the mines of Western Donbass. *Geotechnical mechanics: Interdisciplinary*. 2013;110:50-62 (In Russ.).

16. 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. *Surveying and subsoil use*. 2024;3:42-4 (In Russ.).

17. Longid E. Determination of boundary angles of Quaternary sediments based on the physical and mechanical properties of rocks. *Mining Information and Analytical Bulletin*. 2017;4:337-44 (In Russ.).

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

19. Gmurman VE. Probability theory and mathematical statistics: textbook for universities. Moscow, 2003 (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](mailto:rabota.shegolkov@mail.ru)

### Информация о статье

Поступила в редакцию: 17.10.2024.

Поступила после рецензирования: 18.11.2024.

Принята к публикации: 19.11.2024.

### Article info

Received: 17.10.2024.

Revised: 18.11.2024.

Accepted: 19.11.2024.

## 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](mailto:rabota.shegolkov@mail.ru)