

## ОЦЕНКА СТЕПЕНИ НАГРУЖЕНИЯ МЕЖДУКАМЕРНЫХ ЦЕЛИКОВ ПРИ ОТРАБОТКЕ ДВУХ ПЛАСТОВ НА ВЕРХНЕКАМСКОМ МЕСТОРОЖДЕНИИ СОЛЕЙ

А.А. Барях<sup>1</sup>, И.С. Ломакин<sup>1</sup>, Н.А. Самоделкина<sup>1</sup>, Л.О. Тенисон<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Горный институт УрО РАН, Пермь, Россия, e-mail: bar@Mi-perm.ru

<sup>2</sup> ПАО «Уралкалий», Березники, Россия

**Аннотация:** Разработана процедура оценки степени нагружения междукамерных целиков, основанная на определении методами математического моделирования нормированной величины интенсивности напряжений в центре их вертикального сечения. В отличие от стандартной методики Турнера-Шевякова данный подход не ограничен простыми вариантами камерной системы разработки (выемка одиночного пласта, субгоризонтальное его залегание, каноническая форма целиков) и может быть использован в более сложных горнотехнических ситуациях. Предложенная схема расчета реализована применительно к отработке двух сильвинитовых пластов при соосном и несоосном расположении очистных камер. Установлено, что при соосной отработке двух сильвинитовых пластов использование формулы Турнера-Шевякова в целом дает заниженные значения степени нагружения междукамерных целиков. Уровень этого снижения зависит от мощности технологического междупластья и соотношения размеров очистных камер на обоих рабочих пластах. При несоосном расположении очистных камер методика Турнера-Шевякова, наоборот, обуславливает существенно завышенные оценки степени нагружения междукамерных целиков при мощности технологического междупластья менее 4 м, поскольку не учитывает разгрузку целиков, особенно в условиях подработки. Формально, полученные результаты указывают на возможность повышения извлечения руды из недр при несоосной отработке, но требуют детального геомеханического обоснования вследствие опасности обрушения целика на верхнем обрабатываемом пласте в камеру нижнего пласта.

**Ключевые слова:** камерная система, междукамерные целики, степень нагружения, математическое моделирование, напряженное состояние, интенсивность напряжений, прочность, разрушение.

**Благодарность:** Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант № 19-77-30008).

**Для цитирования:** Барях А. А., Ломакин И. С., Самоделкина Н. А., Тенисон Л. О. Оценка степени нагружения междукамерных целиков при отработке двух пластов на Верхнекамском месторождении солей // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2023. – № 1. – С. 5–19. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2023\_1\_0\_5.

---

## Loading of rib pillars in multiple seam mining at the Upper Kama salt deposit

A.A. Baryakh<sup>1</sup>, I.S. Lomakin<sup>1</sup>, N.A. Samodelkina<sup>1</sup>, L.O. Tenison<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Mining Institute of Ural Branch, Russian Academy of Sciences, Perm, Russia, e-mail: bar@Mi-perm.ru

<sup>2</sup> Uralkali, Berezniki, Russia

---

**Abstract:** The load estimation procedure for rib pillars uses the methods of mathematical modeling to find a normalized value of shear stress intensity in the center of vertical pillar section. As distinct from the standard procedure by Turner–Shevyakov, the new approach is unlimited by simple options of an open stoping system (single seam mining, flat lying seam, canonically shaped pillars) and is applicable in complex geotechnical situations. The article describes implementation of the calculation as a case-study of two sylvinitic seams in cases of in-line and off-line arrangement of stopes. It is found that in the in-line stoping in mining of two sylvinitic seams, the Turner–Shevyakov formula produces generally lower estimates of loading of rib pillars. The underestimation level depends on the thickness of the seam parting and on the size ratio of stopes in both working seams. In the off-line arrangement of stopes, the Turner–Shevyakov procedure, vice versa, gives essentially overestimated loading of rib pillars when the seam parting is less than 4 m thick as the procedure neglects unloading of the pillars, especially in undermining. Formally, the research findings demonstrate feasibility of increased extraction of ore in case of the off-line stoping but need a comprehensive geomechanical validation because of the hazard of caving of the upper working seam pillar to the stoping void of the lower working pillar.

**Key words:** stoping system, rib pillars, loading, mathematic modeling, stress state, stress intensity, strength, failure.

**Acknowledgements:** The study was supported by the Russian Science Foundation, Grant No. 19-77-30008.

**For citation:** Baryakh A. A., Lomakin I. S., Samodelkina N. A., Tenison L. O. Loading of rib pillars in multiple seam mining at the Upper Kama salt deposit. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2023;(1):5-19. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2023\_1\_0\_5.

---

### Введение

Камерная и камерно-столбовая системы отработки широко применяются на рудных, угольных, калийных и соляных месторождениях. При этом инженерные методики расчетов целиков базируются на различных модификациях известной формулы Турнера-Шевякова [1], которая определяет степень их нагружения. Расчет данного показателя основывается на отношении действующей на целик на-

рузки к его несущей способности. Нагрузка определяется весом всей налегающей породной толщи, а несущая способность зависит от формы целика (отношение высоты к ширине), прочности пород и ряда структурных геологических факторов, характерных для конкретных месторождений [2 – 6]. Нормативными документами степень нагружения междукамерных целиков регламентируется и обычно не превышает 0,5, что соответствует

коэффициенту запаса несущей способности более 2. Увеличение степени нагружения целиков повышает риски прорыва пресных вод в горные выработки [7] и обуславливает более высокий уровень техногенной нагрузки на подработанную территорию [8].

Следует отметить, что в условиях полной подработки, надлежащем подборе коэффициентов, корректирующих прочность целиков, метод Турнера-Шевякова обеспечивает достаточное качество практических расчетов и с успехом уже много лет применяется в мировой горной практике [9–11]. Вместе с тем использование формулы Турнера-Шевякова ограничено простыми вариантами подземной разработки: субгоризонтальное залегание рабочих пластов, одинаковые размеры целиков, их каноническая форма и т.д. В более сложных случаях в последние годы для расчета целиков все шире применяются методы математического моделирования. При этом в рамках упругих постановок дается оценка коэффициента безопасности или степени нагружения целиков [12–14]. Несмотря на относительную простоту, этот подход позволяет сохранить для горняков-практиков привычную идеологию расчета устойчивости целиков. Используются и более сложные модели, основанные на критериях Кулона-Мора, Хука-Брауна в сочетании с различным поведением геоматериалов под нагрузкой [15–17]. В последние годы при расчете опорных целиков значительное внимание стало уделяться дискретным и гибридным методам анализа их устойчивости [18, 19]. Несмотря на очевидную их привлекательность, численная реализация этих подходов требует существенных вычислительных затрат и устойчивого параметрического обеспечения.

Целью настоящих исследований является оценка степени нагружения междукамерных целиков применительно к

отработке свиты силвинитовых пластов в условиях Верхнекамского месторождения солей (ВКМС). Необходимость этой работы обусловлена тем, что метод Турнера-Шевякова определяет степень нагружения целиков раздельно для каждого рабочего пласта и не учитывает их взаимное влияние.

### Основные методические положения

На ВКМС расчет степени нагружения ленточных междукамерных целиков (С) базируется на методике Турнера-Шевякова, которая в действующем технологическом регламенте (ТР) [22] определяется следующим соотношением:

$$C = \xi \gamma H_0 \frac{a+b}{bk_f \sigma_m}, \quad (1)$$

где  $\xi$  — коэффициент, учитывающий изменение нагрузки на целики вследствие влияния различных горнотехнических факторов (пригрузка от солеотвалов, опорное давление, наличие межходовых целиков и др.);  $\gamma$  — объемный вес пород;  $H_0$  — максимальное значение расстояния от земной поверхности до кровли целиков;  $a$  — ширина очистных камер;  $b$  — ширина междукамерных целиков;  $k_f$  — коэффициент формы целиков;  $\sigma_m$  — агрегатная прочность пород в массиве, которая вычисляется на основе эквивалентной прочности пород, слагающих целики, с использованием нескольких коэффициентов, определяющих усредненное влияние особенностей их строения и состояния (наличие масштабного фактора, глинистых прослоек, увлажнения пород и т.п.).

В работе [14] на основе анализа многовариантных вычислительных экспериментов установлена взаимосвязь между степенью нагружения целиков  $C$ , определенной по формуле (1), и нормированной величиной интенсивности напряжений  $K = \sigma_i / \sigma_m$ , где  $\sigma_i = \sqrt{I_2(D_\sigma)}$  —

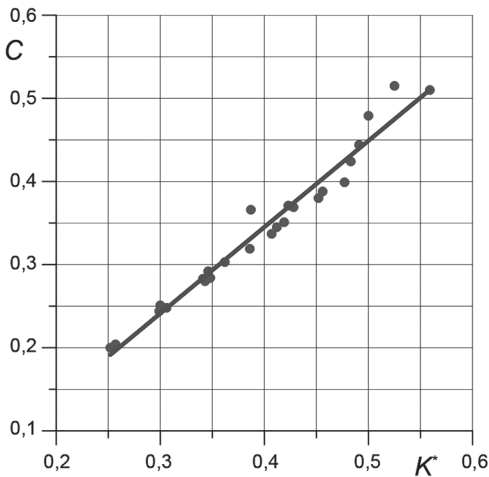


Рис. 1. Взаимосвязь степени нагружения, рассчитанной по методике Турнера-Шевякова, с нормированной величиной интенсивности напряжений в центре вертикального сечения целика

Fig. 1. The relationship between load degree, calculated by Tournaire-Shevyakov method, and tangential stress intensity normalized value in the middle of pillar vertical section

интенсивность напряжений, определяемая величиной второго инварианта девиатора напряжений.

Показано [14], что

$$C \approx K^*, \quad (2)$$

где  $K^*$  — максимальная величина показателя  $K$ , достигаемая в каждом вертикальном сечении целика.

Соотношение (2) использовалось [14] для оценки степени нагружения междукамерных целиков при наклонном залегании рабочих пластов, анализе влияния на этот показатель межхвостовых целиков и, в целом, показало вполне приемлемую работоспособность. Вместе с тем выявились и недостатки реализации данной схемы математического моделирования, связанные, в частности, с вычислительным неудобством определения показателя  $K^*$  по изолиниям распределения в вертикальном сечении междукамерного целика максимальной нормированной величины интенсивности напряжений.

В этой связи в широком диапазоне вариации степени нагружения междукамерных целиков (от 0,2 до 0,6) выполнены численные эксперименты по установлению зависимости этого показателя от нормированной величины интенсивности напряжений, определенной в центре вертикального сечения целика. Математическое моделирование проводилось методом конечных элементов [20, 21]. Исходное распределение напряжений в ненарушенном горными работами соляном массиве принималось гидростатическим. Расчетная схема соответствовала стандартному анализу напряженного состояния однопластового горизонтально залегающего камерного блока, находящегося в условиях полной подработки. В этой связи в силу симметрии на боковых границах камерного блока горизонтальные смещения, а на нижней — вертикальные считались равными нулю. Верхняя граница, соответствующая земной поверхности, являлась свободной. В пределах рассматриваемой области задавались массовые силы интенсивностью  $\gamma_i$  ( $\gamma_i$  — удельный вес пород  $i$ -го элемента геологического разреза).

На основе результатов математического моделирования установлена устойчивая линейная взаимосвязь между нормированной величиной интенсивности напряжений, определенной в центре вертикального сечения целика, и степенью его нагружения, рассчитанной по методике Турнера-Шевякова (рис. 1). Полученная взаимосвязь аппроксимируется выражением

$$C = f(K^*) = 1,05 \cdot K^* - 0,1 \quad (3)$$

с коэффициентом корреляции 0,98.

Использование соотношения (3) открывает возможность достаточно простой оценки степени нагружения междукамерных целиков в условиях отработки, не охваченных методикой Турнера-Шевякова. Это и наклонное залегание ра-

бочих пластов, и многослойная отработка, включая несоосное расположение очистных камер, и многие другие горнотехнические случаи.

### **Отработка двух пластов с соосным расположением очистных камер**

Рассматривалась отработка двух сильвинитовых пластов АБ и Кр// с соосным расположением камер (межосевое расстояние одинаковое для обоих пластов ( $l_{АБ} = l_{Кр//}$ ), разделенных технологическим междупластьем. В этом случае расчет степени нагружения междукамерных целиков согласно нормативному документу [22] предусматривает только возможность независимого определения этого показателя для каждого пласта. Вместе с тем при двухпластовой отработке формируется взаимосвязанная система очистных камер, которая априори должна оказывать влияние на степень нагружения целиков. В этой связи можно предположить, что основными факторами, влияющими на степень нагружения целиков, являются мощность технологического междупластья и соотношение размеров камер на пластах АБ и Кр//.

В качестве расчетных вариантов рассматривалась отработка верхнего пласта АБ комбайном «Урал-61А» (ширина камеры  $a_{АБ} = 3,05$  м; ширина целика  $b_{АБ} = 8,05$  м; вынимаемая мощность  $m_{АБ} = 3,1$  м) и комбайном «Урал-20Р» ( $a_{АБ} = 5,1$  м; ширина целика  $b_{АБ} = 6,0$  м;

вынимаемая мощность  $m_{АБ} = 3,05$  м). Выемка пласта Кр// производилась комбайном «Урал-20Р» в два хода по высоте ( $a_{Кр//} = 5,1$  м; ширина целика  $b_{Кр//} = 6,0$  м; вынимаемая мощность  $m_{Кр//} = 5,0$  м). Результаты оценки степени нагружения междукамерных целиков, выполненные в соответствии с нормативными рекомендациям ТР, представлены в табл. 1. Здесь же для сравнения приведены расчеты степени нагружения целиков, полученные методом математического моделирования с использованием соотношения (3) для условий отработки одного рабочего пласта. Как видно, отмечается хорошее согласование результатов математического моделирования с методикой Турнера-Шевякова, адаптированной к ВКМС.

Принципиальная геомеханическая расчетная схема двухпластового камерного блока для двух вариантов отработки пласта АБ представлена на рис. 2.

На рис. 3 показано распределение нормированной величины интенсивности напряжений по сечению двухпластового камерного блока.

Результаты расчета степени нагружения междукамерных целиков при двухпластовой отработке и мощности технологического междупластья 3 м в сравнении с однопластовой (табл. 1), оценка которой выполнена в соответствии с ТР, приведены в табл. 2 (округление до 2-го знака). Анализ выполнялся для двух размеров очистных камер пласта АБ, сфор-

Таблица 1

#### **Степень нагружения целиков при отработке одного рабочего пласта Pillar load degree for one-layer mining**

Пласт	Комбайн	Глубина до кровли пласта, м	Степень нагружения целиков	
			по методике ТР	математическое моделирование
АБ	Урал-20Р	391	0,336	0,336
АБ	Урал-61А	391	0,23	0,235
Кр//	Урал-20Р	397	0,382	0,381

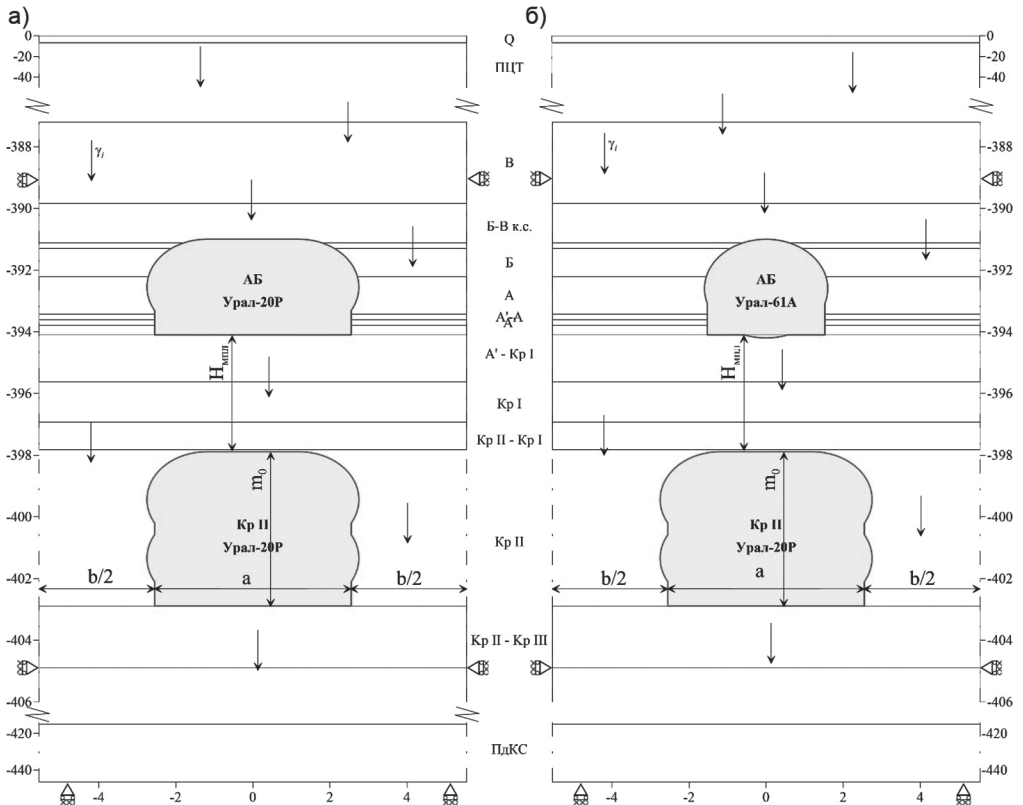


Рис. 2. Принципиальная геомеханическая схема расчетов: отработка пласта АБ комбайном «Урал-20Р» (а); отработка пласта АБ комбайном «Урал-61А» (б)

Fig. 2. Fundamental geomechanical calculation scheme: AB layer is mined by «Ural-20R» combine (a); AB layer is mined by «Ural-61A» combine (b)

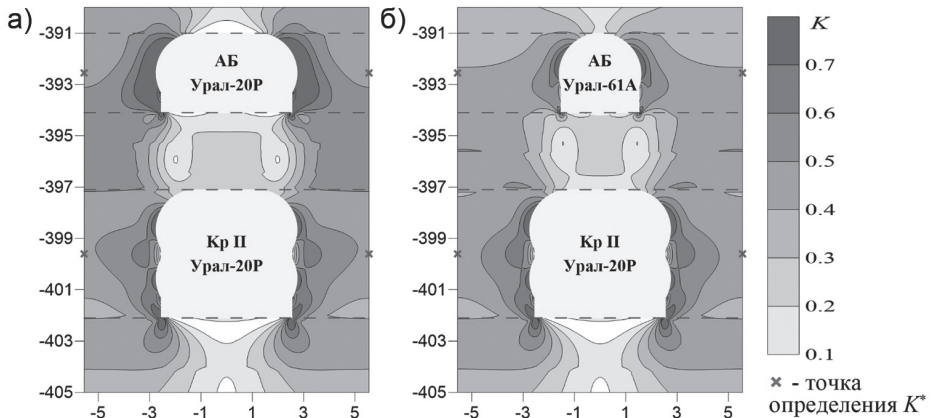


Рис. 3. Распределение нормированной величины интенсивности напряжений по сечению двухпластового камерного блока: при отработке пласта АБ комбайном «Урал-20Р» (а); при отработке пласта АБ комбайном «Урал-61А» (б)

Fig. 3. Tangential stress intensity normalized value cross-section distribution in two-layer chamber block: AB layer is mined by «Ural-20R» combine (a); AB layer is mined by «Ural-61A» combine (b)



Таблица 2

**Степень нагружения целиков при отработке двух сильвинитовых пластов**  
**Pillar load degree for two sylvinite layers mining**

Варианты	Пласт	Комбайн	Степень нагружения целиков	
			по методике ТР	математическое моделирование
1	АБ	Урал-20Р	0,34	0,39
	КрII	Урал-20Р	0,38	0,42
2	АБ	Урал-61А	0,23	0,33
	КрII	Урал-20Р	0,38	0,39

мированных соответственно комбайнами «Урал-20Р» и «Урал-61А».

Полученные оценки (см. табл. 2) в качественном и количественном отношении достаточно очевидно отражают взаимное влияние очистных камер пластов АБ и КрII на степень нагружения целиков. При одинаковых размерах камер, пройденных комбайном «Урал-20Р», погрешность определения степени нагружения целиков по методике ТР соизмерима для обоих пластов и варьируется в диапазоне от 10,5% (пласт КрII) до 15% (пласт АБ). Отметим, что учет фактора «двухпластовая отработка» обуславливает увеличение степени нагружения целиков, т.е. оценки этого показателя, рассчитанные согласно нормативному документу ТР, являются заниженными.

Еще более заниженные оценки степени нагружения целиков на верхнем сильвинитовом пласте АБ имеют место при его отработке камерами меньшей ширины («Урал-61А») по отношению к нижнему пласту КрII. При этом влияние отработки пласта АБ на междукамерные целики пласта КрII оказывается минимальным и использование формулы Турнера-Шевякова вполне допустимо (см. табл. 2).

Как уже отмечалось, уровень взаимного влияния отработки пластов АБ и КрII на степень нагружения целиков в значительной мере будет зависеть от мощности технологического междупластья. На рис. 4 представлены результаты оценки погрешности методики ТР при определении степени нагружения меж-

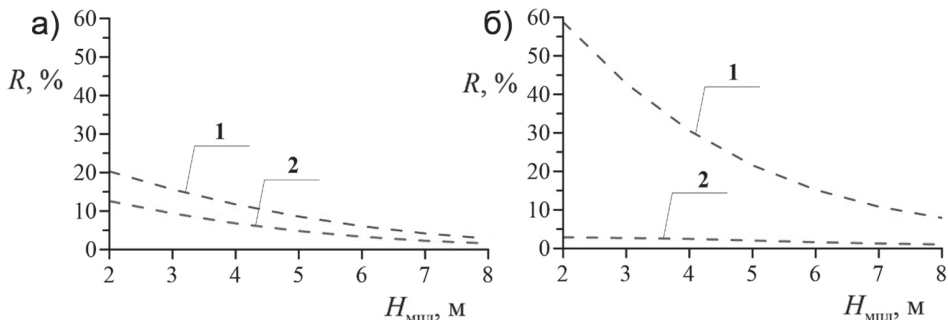


Рис. 4. Зависимость погрешности оценки степени нагружения междукамерных целиков на пласте АБ (1) и КрII (2) от мощности технологического междупластья: отработка пласта АБ комбайном «Урал-20Р» (а); отработка пласта АБ комбайном «Урал-61А» (б)

Fig. 4. Dependence of rib pillar load degree estimation error at AB (1) and KrII (2) layers on interlayer pillar width: AB layer is mined by «Ural-20R» combine (a); AB layer is mined by «Ural-61A» combine (b)

дукамерных целиков в условиях двухпластовой отработки в зависимости от мощности технологического междупластья. Погрешность определялась в процентах согласно следующему соотношению:

$$R = (C_m / C_0 - 1) \cdot 100\%, \quad (4)$$

где  $C_m$  — степень нагружения, рассчитанная методом математического моделирования;  $C_0$  — по методике ТР. Мощность междупластья изменялась от 2 до 8 м.

Представленные на рис. 4 результаты анализа показывают, что при одинаковых размерах очистных камер (рис. 4, а) и мощности технологического междупластья более 6 м погрешность оценки по нормативной методике [22] обеспечивают приемлемую оценку степени нагружения междуканальных целиков. При меньших мощностях междупластья погрешность может достигать 20% для целиков пласта АБ и 13% для целиков пласта КрII.

При очистной выемке пласта АБ комбайном «Урал-61А» (ширина камеры 3,05 м), как уже отмечалось, расчет степени нагружения целиков пласта КрII вне зависимости от мощности междупластья может производиться по схеме отработки одиночного пласта, по формуле Турнера-Шевякова (рис. 4, б). Вместе с тем отработка пласта КрII комбайном «Урал-20Р» обуславливает существенное увеличение степени нагружения целиков на пласте АБ. В этом случае погрешность использования методики ТР может достигать более 50%.

### Несоосное расположение камер

Один из вариантов несоосного расположения очистных камер на двух рабочих пластах представлен в виде расчетной схемы на рис. 5. Он коррелирует с рассмотренным выше случаем, когда пласт АБ отрабатывается комбайнами «Урал-61А» или «Урал-20Р», а пласт КрII — комбайном «Урал-20Р». При этом для простоты анализа на обоих пла-

Таблица 3

**Степень нагружения целиков при несоосном расположении камер и отработке пласта АБ комбайном «Урал-20Р»**

***Pillar load degree for out-of-alignment mining chamber layout during AB layer mining by «Ural-20R» combine***

Мощность междупластья, м	Пласт	Комбайн	Степень нагружения целиков	
			по методике ТР	математическое моделирование
2,0	АБ	Урал-20Р	0,336	0,14
	КрII	Урал-20Р	0,381	0,23
3,0	АБ	Урал-20Р	0,336	0,21
	КрII	Урал-20Р	0,382	0,29
4,0	АБ	Урал-20Р	0,336	0,26
	КрII	Урал-20Р	0,383	0,33
6,0	АБ	Урал-20Р	0,336	0,31
	КрII	Урал-20Р	0,385	0,37
8,0	АБ	Урал-20Р	0,336	0,33
	КрII	Урал-20Р	0,387	0,38



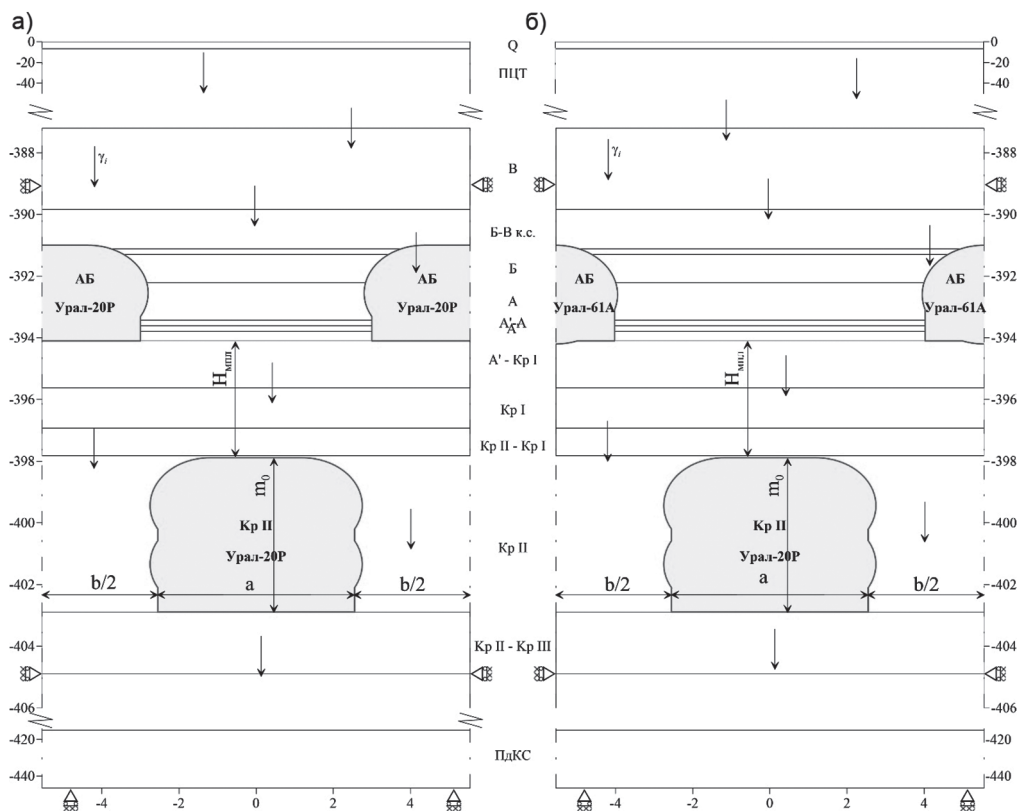


Рис. 5. Расчетная схема варианта несоемного расположения очистных камер: отработка АБ комбайном «Урал-20Р» (а); отработка пласта АБ комбайном «Урал-61А» (б)

Fig. 5. Calculation scheme of out-of-alignment mining chamber layout variant: AB layer is mined by «Ural-20R» combine (a); AB layer is mined by «Ural-61A» combine (b)

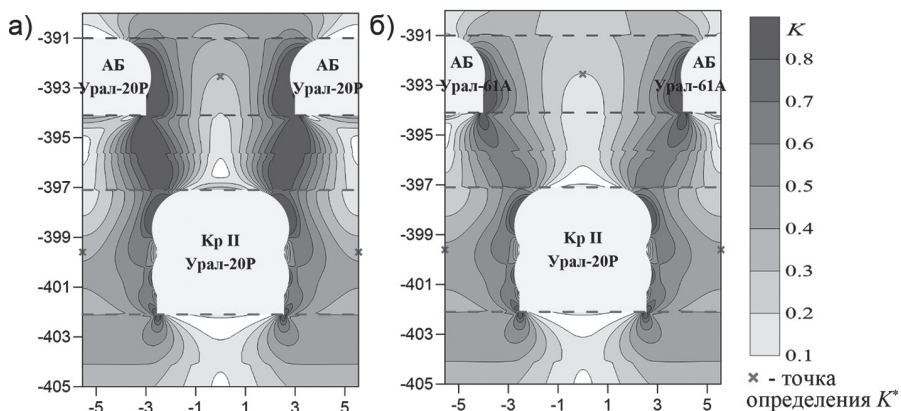


Рис. 6. Распределение нормированной величины интенсивности напряжений по сечению двухпластового камерного блока при несоемном расположении очистных камер: отработка пласта АБ комбайном «Урал-20Р» (а); отработка пласта АБ комбайном «Урал-61А» (б)

Fig. 6. Tangential stress intensity normalized value cross-section distribution in two-layer chamber block for out-of-alignment mining chamber layout: AB layer is mined by «Ural-20R» combine (a); AB layer is mined by «Ural-61A» combine (b)

Таблица 4

**Степень нагружения целиков при несоосном расположении камер и отработке пласта АБ комбайном «Урал-61А»**  
**Pillar load degree for out-of-alignment mining chamber layout during AB layer mining by «Ural-61A» combine**

Мощность между-пластья, м	Пласт	Комбайн	Степень нагружения целиков	
			по методике ТР1	математическое моделирование
2,0	АБ	Урал-61А	0,23	0,06
	Кр II	Урал-20Р	0,381	0,3
3,0	АБ	Урал-61А	0,23	0,11
	Кр II	Урал-20Р	0,382	0,34
4,0	АБ	Урал-61А	0,23	0,15
	Кр II	Урал-20Р	0,383	0,36
6,0	АБ	Урал-61А	0,23	0,2
	Кр II	Урал-20Р	0,385	0,38
8,0	АБ	Урал-61А	0,23	0,22
	Кр II	Урал-20Р	0,387	0,39

стах сохраняется принятое ранее межосевое расстояние:  $l_{AB} = l_{KpII} = 11,1$  м.

Распределение нормированной величины интенсивности напряжений для данного варианта несоосного расположения камер при мощности технологического междупластья 3 м показано на рис. 6. Как видно, междукамерные целики находятся в разгруженном состоянии, что отражается в количественных значениях степени их нагружения. Безусловно, снижение данного показателя напрямую зависит от мощности технологического междупластья (табл. 3, 4). По отношению к расчетным оценкам по стандартной методике Турнера-Шевякова [22] полученные величины степени нагружения междукамерных целиков определяются более низкими значениями. Особенно выражено это проявляется на обоих пластах при их отработке комбайном «Урал-20Р» и малой мощности междупластья (до 4 м). Очистная выемка пласта АБ «узкими» камерами (комбайн «Урал-61А») обуславливает менее

интенсивную разгрузку целиков пласта КрII и уменьшение степени их нагружения. В целом можно констатировать, что при несоосном расположении камер действующая методика ТР дает завышенные оценки степени нагружения междукамерных целиков, что связано с неучетом взаимного влияния отработки двух пластов.

Изменение погрешности определения степени нагружения междукамерных целиков в зависимости от мощности технологического междупластья, рассчитанной по формуле (4), иллюстрируется на рис. 7 (знак «-» указывает на превышение результатов расчета по методике ТР в сравнении с математическим моделированием). Здесь наглядно видно, что с увеличением мощности междупластья (более 6 м) взаимное влияние пластов нивелируется и значения степени нагружения целиков, полученные по методике ТР и методом математического моделирования, практически совпадают. При меньших мощностях меж-

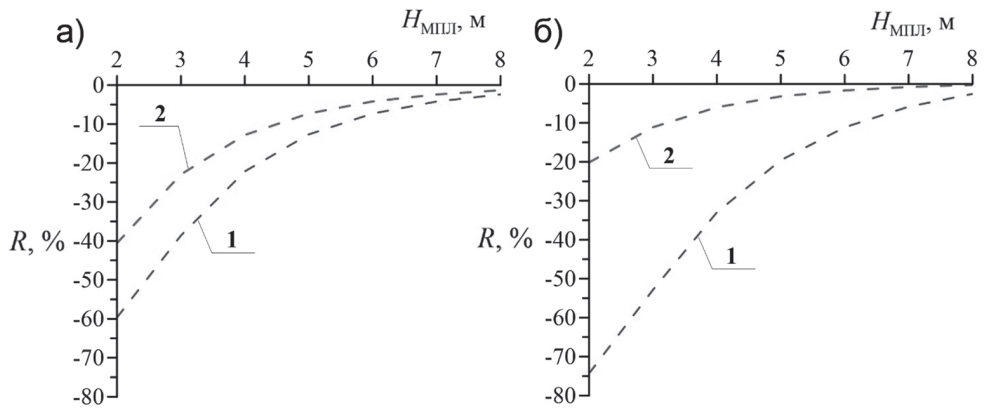


Рис. 7. Зависимость погрешности оценки степени нагружения междукамерных целиков на пласте АБ (1) и Кр II (2) от мощности технологического междупластья при несоосном расположении очистных камер: отработка пласта АБ комбайном «Урал-20Р» (а); отработка пласта АБ комбайном «Урал-61А» (б)  
 Fig. 7. Dependence of rib pillar load degree estimation error at AB (1) and Kr II (2) layers on interlayer pillar width for out-of-alignment mining chamber layout: AB layer is mined by «Ural-20R» combine (a); AB layer is mined by «Ural-61A» combine (b)

дупластья для обоих пластов методика ТР дает явно завышенные степени нагружения междукамерных целиков. Причем для рассмотренных вариантов отработки в количественном выражении более завышенные оценки отмечаются для целиков пласта АБ.

Анализ результатов определения степени нагружения междукамерных целиков формально указывает на возможность повышения извлечения руды при несоосном расположении очистных камер. Однако этот вопрос гораздо сложнее, чем кажется на первый взгляд. Предваритель-

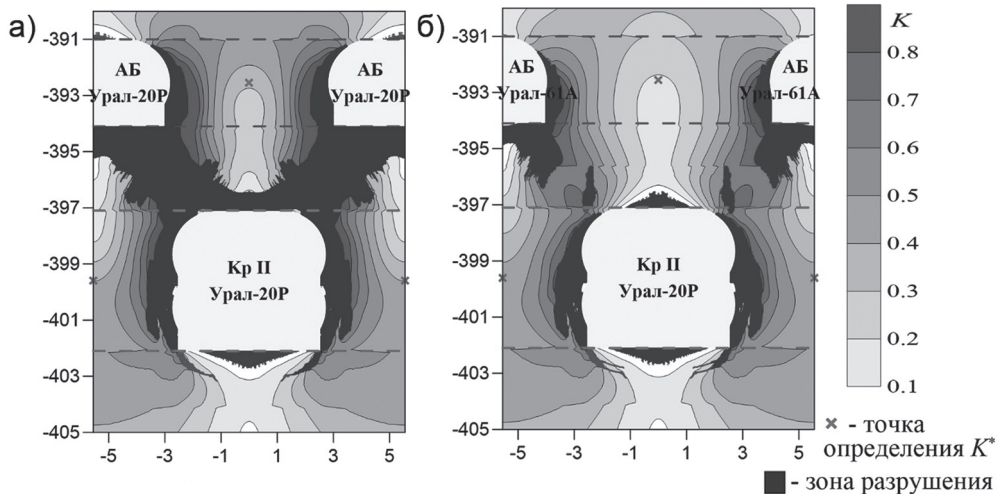


Рис. 8. Характер разрушения технологического междупластья мощностью 3 м при несоосном расположении очистных камер: отработка пласта АБ комбайном «Урал-20Р» (а); отработка пласта АБ комбайном «Урал-61А» (б)  
 Fig. 8. Failure pattern of 3-meter-wide interlayer pillar for out-of-alignment mining chamber layout: AB layer is mined by «Ural-20R» combine (a); AB layer is mined by «Ural-61A» combine (b)

ные прочностные оценки, выполненные по критерию Кулона-Мора (рис. 8), показали, что в технологическом междупластье формируются зоны разрушения, которые обуславливают риски «сползания» целика на верхнем отработываемом пласте АБ в камеру нижнего пласта КрII. В этой связи для анализа реальных перспектив повышения извлечения руды за счет несоосного расположения очистных камер требуется проведение специальных детальных геомеханических исследований, основанных на обосновании оптимальных параметров отработки пластов, увязанных с горно-геологическими условиями разработки.

### **Заключение**

1. Разработана основанная на математическом моделировании напряженно-деформированного состояния междукамерных целиков методика определения степени их нагружения. Предложенная расчетная схема позволяет получить оценку данного показателя для различных вариантов камерной системы разработки, не охваченных стандартной методикой Турнера-Шевякова: наклонное залегание рабочих пластов, неканоническая форма целиков, многопластовая отработка, включая несоосное расположение очистных камер и др.

2. Показано, что при отработке двух сильвинитовых пластов с соосным расположением очистных камер применение формулы Турнера-Шевякова в целом дает заниженные значения степени нагружения междукамерных целиков, вследствие неучета взаимного влияния рабочих пластов. Уровень этого снижения зависит от мощности технологического междупластья и соотношения размеров очистных камер на обоих рабочих пластах.

3. При несоосном расположении очистных камер методика Турнера-Шевякова обуславливает существенно завышенные оценки степени нагружения междукамерных целиков при мощности технологического междупластья менее 4 м. Это формально указывает на возможность повышения извлечения руды из недр за счет уменьшения ширины междукамерных целиков. Вместе с тем предварительные прочностные расчеты показали, что при несоосном расположении очистных камер возникают риски обрушения целика на верхнем отработываемом пласте в камеру нижнего пласта. Для обоснования реальных перспектив повышения извлечения руды из недр за счет несоосного расположения очистных камер требуется проведение детальных геомеханических исследований.

### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Шевяков Л. Д. Разработка месторождений полезных ископаемых. — М.: Госгортехиздат, 1963. — 728 с.
2. Горпинченко В. А., Сазнов В. В., Андреев А. А., Вильчинский В. Б. Методика определения эффективных параметров разгрузочных скважин для безопасной разработки удачноопасных месторождений Норильского промышленного района // Горный журнал. — 2015. — № 6. — С. 68–73. DOI: 10.17580/gzh.2015.06.14.
3. Sankovsky A. A., Aleksenko A. G., Nikiforov A. V. Practical experience analysis: superimposed seams series mining at the Verkhnekamsk potassium-magnesium salts deposit applying room-and-pillar mining method // International Journal of Civil Engineering and Technology. 2018, vol. 9, no. 6, pp. 715–728.
4. Осинцев В. А., Беркович В. М., Горбунов А. Г., Любавина В. А. Расчет нагруженности ленточных междукамерных целиков // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. — 2013. — № 1. — С. 11–14.

5. Барях А. А., Лобанов С. Ю., Ломакин И. С. Анализ изменения степени нагружения междукамерных целиков во времени на Верхнекамском месторождении солей // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. — 2015. — № 4. — С. 70–82.
6. Qin X. S., Cao H., Guo L. J. Sensitivity analysis of factors influencing pillar stability in the deep slope of underground salt mine // China Rock 2020. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2020, vol. 570, no. 2, article 022002. DOI: 10.1088/1755-1315/570/2/022002.
7. Беляков Н. А., Беликов А. А. Прогноз целостности водозащитной толщи на Верхнекамском месторождении калийных руд // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2022. — № 6-2. — С. 33–46. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2022\_62\_0\_33.
8. Барях А. А., Тенисон Л. О., Самоделкина Н. А. К определению горизонтальных деформаций подработанных территорий // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2021. — № 11. — С. 5–18. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2021\_11\_0\_5.
9. Беньявски З. Управление горным давлением. — М.: Мир, 1990. — 254 с.
10. Salamon M. D. G. Strength of coal pillars from back-calculation / 37th U.S. Symposium on Rock Mechanics, Vail Rocks. 1999, pp. 29–36.
11. Терентьев В. Б. Определение времени устойчивости междупластовых потолочин для условий сближенного залегания сильвинитовых пластов Усольского калийного комбината // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2016. — № 2. — С. 295–308.
12. Бакиров Ж. Б., Такишов А. А., Бакиров М. Ж., Михайлов В. Ф. Определение ширины целиков при камерной отработке рудного месторождения // Труды университета. — 2021. — № 4 (85). — С. 119–125. DOI: 10.52209/1609\_1825\_2021\_4\_119.
13. Suorineni F. T., Mgumbwa J. J., Kaiser P. K., Thibodeau D. Mining of orebodies under shear loading. Part 2. Failure modes and mechanisms // Mining Technology. 2014, vol. 123, no. 4, pp. 240–249. DOI: 10.1179/1743286314Y.0000000072.
14. Барях А. А., Самоделкина Н. А. К расчету устойчивости целиков при камерной системе разработки // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. — 2007. — № 1. — С. 11–20.
15. Martin C. D., Maybee W. G. The strength of hard-rock pillars // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 2000, vol. 37, no. 8, pp. 1239–1246. DOI: 10.1016/S1365-1609(00)00032-0.
16. Mortazavi A., Hassani F. P., Shabani M. A numerical investigation of rock pillar failure mechanism in underground openings // Computers and Geotechnics. 2009, vol. 36, no. 5, pp. 691–697. DOI: 10.1016/j.compgeo.2008.11.004.
17. Rashed G., Slaker B., Sears M. M., Murphy M. M. A parametric study for the effect of dip on stone mine pillar stability using a simplified model geometry // Mining, Metallurgy & Exploration. 2021, vol. 38, no. 2, pp. 967–977. DOI: 10.1007/s42461-021-00394-y.
18. Hamediazad F., Bahrani N. Simulation of hard rock pillar failure using 2D continuum-based Voronoi tessellated models: The case of Quirke Mine, Canada // Computers and Geotechnics. 2022, vol. 148, article 1048. DOI: 10.1016/j.compgeo.2022.104808.
19. Li X., Kim E., Walton G. A study of rock pillar behaviors in laboratory and in-situ scales using combined finite-discrete element method models // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 2019, vol. 118, pp. 21–32. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2019.03.030.
20. Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике. — М.: Мир, 1975. — 541 с.
21. Zienkiewicz O. C., Taylor R. L., Zhu J. Z. The finite element method: Its basis and fundamentals. 7th edition. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2013. 756 p.
22. Указания по защите рудников от затопления и охране подрабатываемых объектов в условиях Верхнекамского месторождения калийных солей (технологический регламент). — СПб., 2014. — 130 с. 

## REFERENCES

1. Shevyakov L. D. *Razrabotka mestorozhdeniy poleznykh iskopaemykh* [Mineral deposit development], Moscow, Gosgortekhizdat, 1963, 728 p.

2. Gorpichenko V. A., Saznov V. V., Andreev A. A., Vilchinskiy V. B. Procedure for determining efficient parameters of relief holes for safe destressing of rockburst-hazardous rock masses in the Norilsk Industrial Area. *Gornyi Zhurnal*. 2015, no. 6, pp. 68–73. [In Russ]. DOI: 10.17580/gzh.2015.06.14.
3. Sankovskiy A. A., Aleksenko A. G., Nikiforov A. V. Practical experience analysis: superimposed seams series mining at the Verkhnekamsk potassium-magnesium salts deposit applying room-and-pillar mining method. *International Journal of Civil Engineering and Technology*. 2018, vol. 9, no. 6, pp. 715–728.
4. Osintsev V. A., Berkovich V. M., Gorbunov A. G. Calculation of loading of inter-chamber rib pillars. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal*. 2013, no. 1, pp. 11–14. [In Russ].
5. Baryakh A. A., Lobanov S. Y., Lomakin I. S. Analysis of time-to-time variation of load on interchamber pillars in mines of the upper Kama potash salt deposit. *Fiziko-tekhnicheskkiye problemy razrabotki poleznykh iskopayemykh*. 2015, no. 4, pp. 70–82. [In Russ].
6. Qin X. S., Cao H., Guo L. J. Sensitivity analysis of factors influencing pillar stability in the deep stope of underground salt mine. *China Rock* 2020. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2020, vol. 570, no. 2, article 022002. DOI: 10.1088/1755-1315/570/2/022002.
7. Belyakov N. A., Belikov A. A. Prediction of the integrity of the water-protective stratum at the Verkhnekamskoye potash ore deposit. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022, no. 6-2, pp. 33–46. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2022\_62\_0\_33.
8. Baryakh A. A., Tenison L. O., Samodelkina N. A. Assessment of horizontal deformations in undermined areas. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2021, no. 11, pp. 5–18. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2021\_11\_0\_5.
9. Benyavski Z. *Upravlenie gornym davleniem* [Mountain pressure management], Moscow, Mir, 1990, 254 p.
10. Salamon M. D. G. Strength of coal pillars from back-calculation. *37th U.S. Symposium on Rock Mechanics*, Vail Rocks. 1999, pp. 29–36.
11. Terentyev V. B. Determining tolerance time of interbed cap pillars for the conditions of contiguous bedding of sylvinitic seams of Usolskiy potash plant. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2016, no. 2, pp. 295–308. [In Russ].
12. Bakirov Zh. B., Takishov A. A., Bakirov M. Zh., Mikhailov V. F. Determination of the pillar width during the chamber mining of an ore deposit. *University Proceedings*. 2021, no. 4(85), pp. 119–125. [In Russ]. DOI: 10.52209/1609\_1825\_2021\_4\_119.
13. Suorineni F. T., Mgumbwa J. J., Kaiser P. K., Thibodeau D. Mining of orebodies under shear loading. Part 2. Failure modes and mechanisms. *Mining Technology*. 2014, vol. 123, no. 4, pp. 240–249. DOI: 10.1179/1743286314Y.0000000072.
14. Baryakh A. A., Samodelkina N. A. To the calculation of pillar stability under condition of chamber mining. *Fiziko-tekhnicheskkiye problemy razrabotki poleznykh iskopayemykh*. 2007, no. 1, pp. 11–20.
15. Martin C. D., Maybee W. G. The strength of hard-rock pillars. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2000, vol. 37, no. 8, pp. 1239–1246. DOI: 10.1016/S1365-1609(00)00032-0.
16. Mortazavi A., Hassani F. P., Shabani M. A numerical investigation of rock pillar failure mechanism in underground openings. *Computers and Geotechnics*. 2009, vol. 36, no. 5, pp. 691–697. DOI: 10.1016/j.compgeo.2008.11.004.
17. Rashed G., Slaker B., Sears M. M., Murphy M. M. A parametric study for the effect of dip on stone mine pillar stability using a simplified model geometry. *Mining, Metallurgy & Exploration*. 2021, vol. 38, no. 2, pp. 967–977. DOI: 10.1007/s42461-021-00394-y.
18. Hamediazad F., Bahrani N. Simulation of hard rock pillar failure using 2D continuum-based Voronoi tessellated models: The case of Quirke Mine, Canada. *Computers and Geotechnics*. 2022, vol. 148, article 1048. DOI: 10.1016/j.compgeo.2022.104808.



19. Li X., Kim E., Walton G. A study of rock pillar behaviors in laboratory and in-situ scales using combined finite-discrete element method models. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2019, vol. 118, pp. 21 – 32. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2019.03.030.

20. Zenkevich O. *Metod konechnykh elementov v tekhnike* [The finite element method in engineering], Moscow, Mir, 1975, 541 p.

21. Zienkiewicz O. C., Taylor R. L., Zhu J. Z. *The finite element method: Its basis and fundamentals*. 7th edition. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2013. 756 p.

22. *Ukazaniya po zashchite rudnikov ot zatopleniya i okhrane podrabatyvaemykh ob"ektov v usloviyakh Verkhnekamskogo mestorozhdeniya kaliynykh soley (tekhnologicheskiiy reglament)* [Instructions on water flood protection of mines and conservation of undermined objects in conditions of Verkhnekamskoe Potash Deposit], Saint-Petersburg, 2014, 130 p. [In Russ].

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

*Барях Александр Абрамович*<sup>1</sup> – д-р техн. наук, академик РАН, руководитель научного направления «Горные науки», e-mail: bar@Mi-Perm.ru, ORCID ID: 0000-0003-2737-6166,

*Ломакин Иван Сергеевич*<sup>1</sup> – канд. техн. наук, научный сотрудник, e-mail: Lomakin@Mi-Perm.ru, ORCID ID: 0000-0001-9852-351X,

*Самоделькина Надежда Анатольевна*<sup>1</sup> – канд. техн. наук, ведущий научный сотрудник, e-mail: Samodelkina@Mi-Perm.ru,

*Тенисон Людмила Олеговна* – канд. техн. наук, начальник Управления, ПАО «Уралкалий», e-mail: Lyudmila.Tenison@uralkali.com,

<sup>1</sup> Горный институт Уральского отделения РАН.

**Для контактов:** Барях А.А., e-mail: bar@Mi-Perm.ru.

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

*A.A. Baryakh*<sup>1</sup>, Dr. Sci. (Eng.), Academician of Russian Academy of Sciences, e-mail: bar@Mi-Perm.ru, ORCID ID: 0000-0003-2737-6166,

*I.S. Lomakin*<sup>1</sup>, Cand. Sci. (Eng.), Researcher, e-mail: Lomakin@Mi-Perm.ru, ORCID ID: 0000-0001-9852-351X,

*N.A. Samodelkina*<sup>1</sup>, Cand. Sci. (Eng.), Leading Researcher, e-mail: Samodelkina@Mi-Perm.ru

*L.O. Tenison*, Cand. Sci. (Eng.), Head Department, Uralkali, Berezniki, Russia, e-mail: Lyudmila.Tenison@uralkali.com,

<sup>1</sup> Mining Institute of Ural Branch, Russian Academy of Sciences, 614007, Perm, Russia.

**Corresponding author:** A.A. Baryakh, e-mail: bar@Mi-Perm.ru.

Получена редакцией 07.10.2022; получена после рецензии 28.10.2022; принята к печати 10.12.2022.

Received by the editors 07.10.2022; received after the review 28.10.2022; accepted for printing 10.12.2022.