

НАУКИ О ЗЕМЛЕ**EARTH SCIENCES**

УДК 622.363.2.023.2 : 623.223.3(476)

<https://doi.org/10.29235/1561-8323-2021-65-4-484-494>

Поступило в редакцию 09.03.2021

Received 09.03.2021

А. Б. Петровский¹, член-корреспондент В. Я. Прушак², Е. А. Лутович³¹*Беларуськалий, Солигорск, Республика Беларусь*²*Солигорский институт проблем ресурсосбережения с Опытным производством, Солигорск, Республика Беларусь*³*Институт горного дела, Солигорск, Республика Беларусь***ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПОРОД, СЛАГАЮЩИХ И ПЕРЕКРЫВАЮЩИХ ТРЕТИЙ КАЛИЙНЫЙ ПЛАСТ СТАРОБИНСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ**

Аннотация. Выполнено исследование геологического строения и физико-механических свойств пород, слагающих и перекрывающих Третий калийный пласт на участках шахтного поля рудоуправления № 4 ОАО «Беларуськалий», планируемых к отработке. Построены геологические разрезы Третьего калийного пласта и его кровли, измерены мощности сильвинитовых и галитовых слоев, дана оценка обрушаемости пород кровли пласта на высоту до 20 м, определен тип непосредственной кровли по составу и строению слагающих ее пород. Установлено, что прочность при одноосном сжатии как сильвинитовых, так и галитовых слоев для рассматриваемых участков отличается незначительно. Поэтому для решения инженерных задач по обеспечению устойчивости горных выработок и расчета параметров крепления могут быть использованы усредненные значения прочности по группам слоев, которые хорошо коррелируют с процентным содержанием в слоях слабых и глинистых прослоек. То же касается и коэффициента поперечных деформаций, значения которого для разных слоев пласта отличаются незначительно и могут приниматься путем их усреднения. Показано, что основным фактором, негативно влияющим на прочность пород, залегающих в кровле Третьего калийного пласта, является содержание слабых и глинистых прослоек, возрастающее с увеличением глубины. Внедрение полученных результатов позволило повысить достоверность расчетов параметров крепления горных выработок, снизить затраты на их поддержание и повысить безопасность горных работ при отработке Третьего калийного пласта в сложных горно-геологических и горнотехнических условиях.

Ключевые слова: калийный пласт, прочностные и деформационные свойства пород

Для цитирования. Петровский, А. Б. Физико-механические свойства пород, слагающих и перекрывающих Третий калийный пласт Старобинского месторождения / А. Б. Петровский, В. Я. Прушак, Е. А. Лутович // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 2021. – Т. 65, № 4. – С. 484–494. <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2021-65-4-484-494>

Andrey B. Petrovsky¹, Corresponding Member Victor Ya. Prushak², Evgeniy A. Lutovich³¹*Belaruskali JSC, Soligorsk, Republic of Belarus*²*Soligorsk Institute of Resource Saving Problems with Pilot Production, Soligorsk, Republic of Belarus*³*Institute of Mining, Soligorsk, Republic of Belarus***PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF THE ROCKS OF THE STAROBINSKY DEPOSIT FORMING THE THIRD POTASH LAYER AND ITS ROOF**

Abstract. The geological structure and the physical-mechanical properties of rocks composing and overlapping the Third potash formation in the areas of the mine field mine No. 4 JSC Belaruskali, which are scheduled to practice, are studied. The geological sections of the Third potash layer and its roof were built, the thickness of sylvinit and halite layers was measured, the roof falling of the rocks of the layer with a height of up to 20 m was assessed, and the type of immediate roof was determined by the composition and structure of its constituent rocks. It was established that the strength under uniaxial compression of both sylvinit and halite layers for the areas under consideration differs slightly. Therefore, to solve engineering problems of ensuring the stability of mine workings and to calculate fastening parameters, strength values averaged over the groups of layers can be used that correlate well with the percentage of weak and clay interlayers. The same applies to Poisson's

ratio, the values of which for various layers of formation are slightly different and can be taken by their averaging. It is shown that the main factor that negatively affects the strength of rocks occurring in the roof of the Third potash seam is the presence of weak and clay interlayers, which increases with depth. The introduction of the obtained results allows us to improve the calculation accuracy of securing mining parameters, to reduce the costs of their maintenance, and to improve the safety of mining operations in developing the Third potash formation in complex geological and mining conditions.

Keywords: potash seam, strength and deformation properties of rocks

For citation. Petrovsky A. B., Prushak V. Ya., Lutovich E. A. Physical and mechanical properties of the rocks of the Starobinsky deposit forming the Third potash layer and its roof. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2021, vol. 65, no. 4, pp. 484–494 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2021-65-4-484-494>

Введение. В ближайшие годы на руднике рудоуправления № 4 ОАО «Беларуськалий» освоение новых площадей Третьего калийного пласта планируется в основном в западной и восточной частях шахтного поля, которые характеризуются увеличением глубины разработки и содержанием глинистых прослоек в кровле пласта, а также недостаточной изученностью прочностных и деформационных свойств пород. Ранее выполненные исследования геологического строения и физико-механических свойств пород, слагающих и перекрывающих Третий калийный пласт, относятся к участкам шахтного поля, лучшим по горно-геологическим и горнотехническим условиям, с отличной и зачастую с менее сложной структурой пород [1–6]. При этом отсутствие фактических данных о прочностных и деформационных свойствах пород снижает достоверность расчетов параметров крепления планируемых горных выработок, что в конечном итоге приводит или к необоснованному увеличению затрат на их поддержание или к снижению безопасности горных работ. В связи с этим не вызывает сомнения актуальность выполненного комплекса исследований, направленных на изучение геологического строения и физико-механических свойств пород, слагающих и перекрывающих Третий калийный пласт на планируемых к отработке участках шахтного поля упомянутого рудника.

В процессе исследования решались следующие задачи: изучить геологическое строение и определить прочностные свойства пород, перекрывающих Третий калийный пласт на высоту до 20 м от кровли 4-го сильвинитового слоя; определить прочностные и деформационные характеристики пород Третьего калийного пласта по сильвинитовым слоям 2, 3, 4 и галитовым слоям 2–3, 3–4, 4–5; разработать рекомендации по применению полученных новых данных о прочностных и деформационных свойствах пород Третьего калийного пласта для расчетов крепления горных выработок.

Объектом исследований явились глинисто-соляные породы, слагающие и перекрывающие Третий калийный пласт в восточном и западном направлениях шахтного поля. Выбор конкретных участков исследования осуществлялся с учетом плана развития горных работ рудника.

Материалы и методы исследования. План шахтного поля в районе проведения исследований приведен на рис. 1. Глубина залегания Третьего калийного пласта на участках проведения исследований составила: 580, 745, 790 и 830 м. В местах проведения исследований из слоев 2, 2–3, 3, 3–4, 4 и 4–5 были отобраны монолиты, а также пробурены 8 скважин эксплуатационной разведки, по две в каждой локации с отбором керн на высоту не менее 20 м от кровли 4-го сильвинитового слоя.

В результате исследований керн, отобранного из скважин, были построены геологические разрезы кровли пласта, измерены мощности сильвинитовых и галитовых слоев, а также дана оценка обрушаемости пород кровли пласта на высоту до 20 м и определен тип непосредственной кровли по составу и строению слагающих пород.

В соответствии с действующими в ОАО «Беларуськалий» нормативными документами на геологическом разрезе условно выделялась непосредственная и основная кровля пласта¹. К непосредственной кровле относили несколько слоев пород мощностью до 10 м, залегающих непосредственно над отработываемым пластом (начинается от кровли 4-го сильвинитового слоя), не способных образовывать больших завесаний и обрушающихся при передвижке крепи лав. К основной кровле относили несколько слоев пород, залегающих над непосредственной кровлей на

¹ Инструкция по применению систем разработки на Старобинском месторождении. Солигорск, 2018. – 146 с.

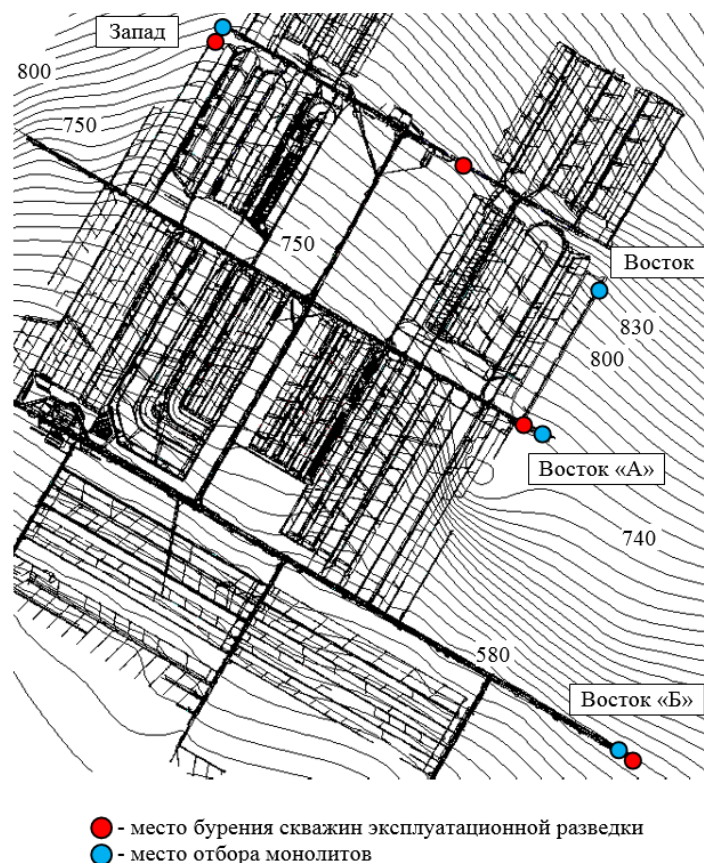


Рис. 1. План шахтного поля в районе проведения исследований

Fig. 1. Plan of the mine field in the research area

высоте 10–20 м и имеющих в своем составе более прочные, чем в непосредственной кровле, слои пород.

Оценка пород кровли на обрушаемость осуществлялась исходя из содержания слабых прослоек (глина, карналлит, глина с включениями карналлита, карналлит с включениями глины) и суммарной мощности прочных прослоек (каменная соль, сильвинит, доломит, песчанико-видная каменная соль) по керновому материалу на высоту до 20 м. При этом учитывались все видимые слабые прослойки мощностью не менее 1 мм. Кроме того, по составу и строению непосредственной кровли определялся ее тип согласно классификации ОАО «Белгорхимпром»¹.

Результаты и их обсуждение. В результате выполненного анализа геологического строения Третьего калийного пласта и его кровли было установлено, что непосредственная кровля пласта в местах проведения исследований на западном и восточном направлениях является легкообрушаемой (содержание слабых прослоек в керновом материале более 60 %); непосредственная кровля пласта в местах проведения исследований на восточном «А» и восточном «Б» направлениях является труднообрушаемой (содержание слабых прослоек менее 50 %); основная кровля во всех местах проведения исследований труднообрушаемая (содержание слабых прослоек менее 16 %); непосредственная кровля на интервале 0–2 м во всех местах проведения исследований относится к I типу по своему составу и строению согласно упомянутой классификации ОАО «Белгорхимпром» (средняя мощность прочных слоев не более 12 см, содержание слабых прослоек не менее 30 %); мощность слоев, слагающих Третий калийный пласт, в целом не изменяется при движении от восточного тектонического блока к западному крылу месторождения, и при этом удовлетворяет параметрам кондиций; сильвинитовые слои 5 и 6 в скважинах восточного направления замещены карналлитом.

¹ Инструкция по охране и креплению горных выработок на Старобинском месторождении. Солигорск, 2018. – 194 с.

В результате испытаний образцов пород, изготовленных из монолитов, были определены следующие прочностные и деформационные свойства пород, слагающих Третий калийный пласт: предел прочности при одноосном сжатии, который определялся по формуле

$$\sigma_{сж} = (K_b P / S)10, \text{ МПа};$$

модуль деформации, который определялся по формуле

$$E_d = \sigma_k - \sigma_n / \varepsilon_{1к} - \varepsilon_{1н}, \text{ МПа};$$

коэффициент поперечной деформации, который определялся по формуле

$$\nu = \varepsilon_{2к} - \varepsilon_{2н} / \varepsilon_{1к} - \varepsilon_{1н};$$

модуль упругости, который определялся по формуле

$$E_y = \sigma_k - \sigma_n / \varepsilon'_{1к} - \varepsilon'_{1н}, \text{ МПа},$$

где P – разрушающая образец сила, кН; S – площадь поперечного сечения образца, см²; K_b – коэффициент высоты образца; σ_k, σ_n – напряжение в конце и начале диапазона при нагружении или разгрузке образца, МПа; $\varepsilon_{1к}, \varepsilon_{1н}$ – относительные продольные деформации образца в конце и начале диапазона при его нагружении; $\varepsilon_{2к}, \varepsilon_{2н}$ – относительные поперечные деформации образца в конце и начале диапазона при его нагружении; $\varepsilon'_{1к}, \varepsilon'_{1н}$ – относительные продольные деформации образца в конце и начале диапазона при его разгрузке.

С использованием результатов испытания прочностных и деформационных свойств пород слоев 2, 2–3, 3, 3–4, 4 и 4–5 (рис. 2) был выполнен факторный анализ этих свойств. Как видно из рис. 2, полученные прочностные и деформационные свойства пород различаются как для разных слоев, так и для разных глубин их залегания.

Для количественной оценки влияния этих факторов проводился дисперсионный анализ, который осуществлялся с использованием специального инструмента – пакета анализа электронных таблиц MS Excel [7; 8]. При этом выдвигались две гипотезы: влияние фактора расположения образцов в различных слоях Третьего калийного пласта и влияние фактора глубины залегания пласта в интервале 580–830 м. Согласно методике дисперсионного анализа, гипотеза о наличии влияния фактора принималась, если при заданном уровне значимости вычисленное значение тестовой статистики ($F_{набл}$) больше значения случайной величины, имеющей распределение Фишера с соответствующими степенями свободы ($F_{кр}$). Проверялись следующие гипотезы: 1 – влияние на предел прочности при одноосном сжатии фактора расположения в разных слоях пласта; 2 – влияние на предел прочности при одноосном сжатии фактора глубины залегания пласта; 3 – влияние на модуль деформации фактора расположения в разных слоях пласта; 4 – влияние на модуль деформации фактора глубины залегания пласта; 5 – влияние на коэффициент поперечной деформации фактора расположения в разных слоях пласта; 6 – влияние на коэффициент поперечной деформации фактора глубины залегания пласта; 7 – влияние на модуль упругости фактора расположения в разных слоях пласта; 8 – влияние на модуль упругости фактора глубины залегания пласта.

Согласно полученным результатам условие $F_{набл} > F_{кр}$ удовлетворяется лишь для гипотез 1, 3, 5 и 7, в которых утверждается влияние на свойства пород фактора расположения в разных слоях пласта. Речь идет о следующих свойствах пород: предел прочности при одноосном сжатии, модуль деформации, коэффициент поперечной деформации и модуль упругости. Максимальное влияние фактора расположения в слое сказывается на пределе прочности при одноосном сжатии, а минимальное – на модуле деформации. Влияние на рассматриваемые свойства пород глубины залегания в интервале 580–830 м не установлено. Также не установлено влияние расположения в разных слоях пласта и разной глубины залегания на коэффициент поперечной деформации.

На основании сделанных с помощью дисперсионного анализа выводов о существенном влиянии на свойства пород их расположения в слоях пласта и несущественном влиянии на свойства пород глубины залегания пласта произведено усреднение данных по всем образцам для каждого

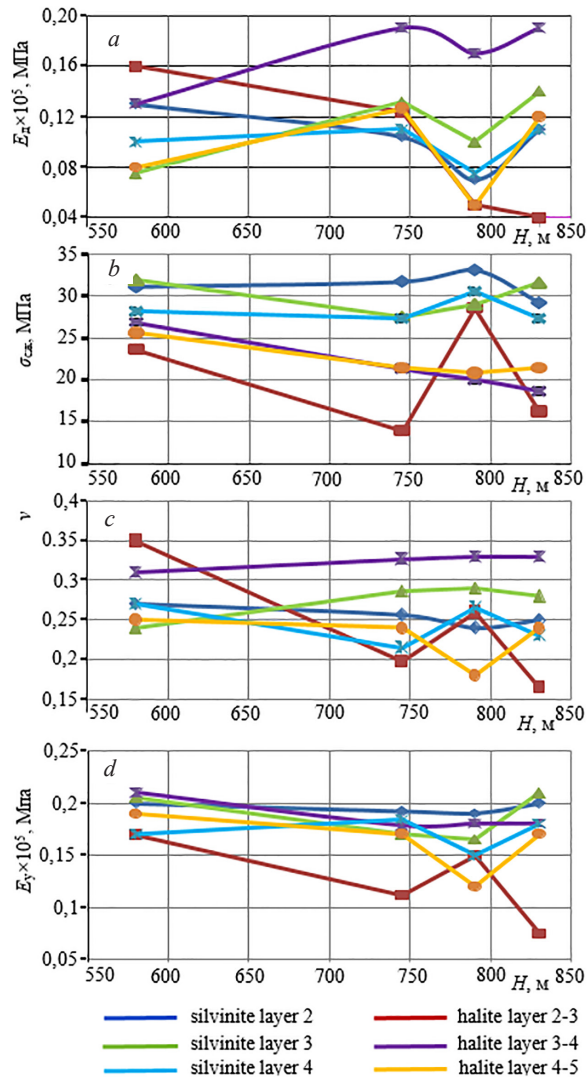


Рис. 2. Прочностные и деформационные свойства пород слоев Третьего калийного пласта в зависимости от глубины H его залегания: a – модуль деформации пород пласта E_d ; b – предел прочности при одноосном сжатии $\sigma_{сж}$; c – коэффициент поперечной деформации ν ; d – модуль упругости E_y

Fig. 2. Strenght and deformation properties of rock layers of the Third potash layer depending on its depth H : a – deformation modulus of rock formation E_d ; b – compressive strenght $\sigma_{сж}$; c – lateral deformation coefficient ν ; d – modulus of elasticity E_y

из слоев Третьего калийного пласта. Некоторые из полученных усредненных значений мощности слоев, основных прочностных и деформационных свойств пород Третьего калийного пласта представлены в таблице.

В целом на основе анализа прочностных и деформационных свойств пород было установлено, что наибольший разброс данных наблюдается для предела прочности при одноосном сжатии. Об этом свидетельствует максимальное значение (4,69) среднего квадратического отклонения данного показателя, превышающего аналогичные значения (0,03) других показателей (модуль деформации E_d , коэффициент поперечной деформации ν , модуль упругости E_y) на два порядка.

Анализ показателей, усредненных по слоям, содержащим преимущественно сильвинитовые и галитовые породы, показал, что для предела прочности при одноосном сжатии может применяться усреднение данных в пределах слоев сильвинита и галита. При этом относительная разница в значениях предела прочности по сильвинитовым и галитовым слоям составляет 39 %. Второе место по максимальным значениям принадлежит модулю упругости (относительная

Мощность слоев, прочностные и деформационные свойства пород Третьего пласта
Layer thickness, strength and deformation properties of rocks of the Third potash layer

Наименование слоя породы	Мощность слоев, прочностные и деформационные свойства пород Третьего пласта на руднике 4 РУ															
	Западное направление ($H = 790$ м)				Восточное направление ($H = 830$ м)				Восточное «А» направление ($H = 745$ м)				Восточное «Б» направление ($H = 580$ м)			
	Средняя мощность слоя ($m_{ср}$), м	Предел прочности при одноосном сжатии ($\sigma_{сж}$), МПа	Коэффициент поперечной деформации (ν)	Средняя мощность слоя ($m_{ср}$), м	Предел прочности при одноосном сжатии ($\sigma_{сж}$), МПа	Коэффициент поперечной деформации (ν)	Средняя мощность слоя ($m_{ср}$), м	Предел прочности при одноосном сжатии ($\sigma_{сж}$), МПа	Коэффициент поперечной деформации (ν)	Средняя мощность слоя ($m_{ср}$), м	Предел прочности при одноосном сжатии ($\sigma_{сж}$), МПа	Коэффициент поперечной деформации (ν)	Средняя мощность слоя ($m_{ср}$), м	Предел прочности при одноосном сжатии ($\sigma_{сж}$), МПа	Коэффициент поперечной деформации (ν)	
6-й сильвинитовый слой	0,13	–	–	0,10	–	–	0,22	–	–	–	–	0,24	–	–	–	
5-6-й галитовый слой	0,30	–	–	0,35	–	–	0,29	–	–	–	–	0,58	–	–	–	
5-й сильвинитовый слой	0,015	–	–	0,005	–	–	0,02	–	–	–	–	0,15	–	–	–	
4-5-й галитовый слой	0,42	20,8	0,18	0,52	21,4	0,24	0,48	21,4	0,24	21,4	0,24	0,58	25,6	0,25	0,25	
4-й сильвинитовый слой	1,23	30,6	0,27	1,26	27,3	0,23	1,30	27,3	0,22	27,3	0,22	1,33	28,2	0,27	0,27	
3-4-й галитовый слой	0,93	–	–	0,92	18,6	0,33	0,98	18,6	0,33	21,3	0,33	1,28	26,9	0,31	0,31	
3-й сильвинитовый слой	0,83	29,0	0,29	0,83	31,6	0,28	0,88	31,6	0,28	27,6	0,29	1,04	31,9	0,24	0,24	
2-3-й галитовый слой	0,46	28,6	0,26	0,49	16,3	0,17	0,52	13,9	0,20	13,9	0,20	0,59	23,6	0,35	0,35	
2-й сильвинитовый слой	0,68	33,1	0,24	0,66	29,2	0,25	0,69	31,7	0,26	31,7	0,26	0,74	31,1	0,27	0,27	
1-2-й галитовый слой	0,54	–	–	0,50	–	–	0,57	–	–	–	–	0,62	–	–	–	
1-й сильвинитовый слой	0,21	–	–	0,22	–	–	0,23	–	–	–	–	0,26	–	–	–	

разница 19 %), третье место – модулю деформации (относительная разница 10 %). Вероятно, что такое различие в значениях этих показателей объясняется большей пластичностью сильвинита и хрупкостью галита. Коэффициент поперечной деформации практически одинаков для сильвинитовых и галитовых слоев пласта. В связи с этим очевидно, что предел прочности при одноосном сжатии, а также модули упругости и деформации необходимо определять либо для каждого из слоев пласта, либо усредненно по сильвинитовым и галитовым слоям, тогда как коэффициент поперечной деформации может определяться по любому из слоев.

В процессе исследования изменчивости прочностных и деформационных свойств пород слоев Третьего калийного пласта также оценивали их связь с содержанием слабых и глинистых прослоек в этих слоях. Установлено, что наиболее тесная связь (с коэффициентом корреляции более 0,5) наблюдается лишь между пределом прочности пород при одноосном сжатии и содержанием в слоях глинистых прослоек. Между остальными свойствами пород в слоях и содержанием в них слабых, а также глинистых прослоек теснота связи менее значительна (коэффициент корреляции составляет не более 0,4).

Таким образом, в интервале глубин 580–830 м большинство из прочностных и деформационных свойств пород слоев Третьего калийного пласта существенно зависят от расположения в слоях пласта и не зависят от глубины залегания пласта. Прочностные же свойства пород в слоях пласта зависят прежде всего от состава слоев (наличия сильвинита или галита) и содержания в них слабых и глинистых прослоек.

Для пород кровли пласта проводился анализ изменчивости их состава и прочностных свойств по длине скважин и по их расположению относительно шахтного поля. Для анализа использовались оцифрованные данные о литологических разностях (составе, мощности, расположении относительно устья скважины) и данные испытаний, полученных из керна образцов на прочность при одноосном сжатии. При этом осуществлялся поинтервальный расчет содержания глинистых прослоек, слоев карналлита, а также количества, суммарной средней мощности слабых прослоек сильвинита и галита мощностью менее 30 мм.

В процессе исследования оценивалось, какая величина интервала усреднения является оптимальной для решения задач по обеспечению устойчивости выработок и безопасной отработке месторождения. При этом исходили из того, что необходимо уточнение рекомендованных в действующих на месторождении методиках оценки учета состава и строения пород кровли величин интервалов (2 и 5 м). Указанные методики отражают прошлый опыт отработки лучших по горно-геологическим и горнотехническим условиям участков месторождения, и не учитывают перехода на участки с более сложными условиями отработки, и поэтому нуждаются в пересмотре с учетом вновь получаемого опыта. По нашему мнению, на участках со сложными условиями отработки требуется более тщательный анализ влияния геологических факторов, в том числе учет содержания слабых и глинистых прослоек на меньших интервалах породной толщи.

В результате экспериментов с различными методами и интервалами усреднения установлено, что при анализе керна, полученного из скважин эксплуатационной разведки, целесообразно использовать прямой метод усреднения на интервалах в 1 м, что обеспечивает необходимую тесноту связи, при этом имеется возможность выделения (дифференциации) интервалов с наиболее слабыми породами, по которым может происходить первоначальное отслоение после проходки выработок. При более мелкой разбивке (например, на интервалы до 0,1 м) точность усредненных данных возрастает незначительно, но при этом существенно возрастает трудоемкость их определения. Использование усредненных данных по более крупным интервалам (5 м и более) способно более чем в 1,5 раза занижить получаемые показатели, и тем самым менее дифференцированно оценить различие в поведении непосредственной кровли при ее обнажениях, при том, что также позволяет оценить общие тенденции изменения характера влияния геологического фактора на процесс деформирования выработок. Поэтому при исследовании изменчивости данного фактора на новых участках шахтных полей целесообразно применять более мелкий интервал усреднения.

Установлено, что для соляных пород, находящихся выше кровли 4-го сильвинитового слоя, характерна высокая изменчивость содержания глинистых, а также слабых и глинистых прослой-

ков по высоте. Максимальные значения содержания глинистых прослоек (15–61 %) характерны для кровли в интервале высоты от 0 до 8–9 м. На этом же интервале суммарное содержание слабых и глинистых прослоек изменяется от 56 до 90 %. О высокой изменчивости содержания глинистых, а также слабых и глинистых прослоек в кровле свидетельствуют показанные на рис. 3 гистограммы распределения этих показателей, усредненных по всем пробуренным скважинам в интервалах 1 и 5 м. Как видно из рис. 3, *a*, максимальные значения содержания глинистых прослоек (61 %) принадлежат интервалу 2–3 м. Именно на этом интервале при значительных обнажениях кровли в ней будут наблюдаться первичные отслоения. Среднее содержание глинистых прослоек в интервале 1–5 м при этом составляет 49,5 %, а в следующем пятиметровом интервале снижается до 30 %, хотя максимальное значение на интервале 5–6 м составляет около 45 %. Очевидно, что усреднение в интервале 1 м позволяет более дифференцированно оценить возможное поведение непосредственной кровли при ее обнажениях. Как видно из рис. 3, *b*, на интервале кровли 4–5 м содержание слабых (в том числе содержащих карналлит) и глинистых прослоек достигает 90 %, что вызывает сложности с дифференцированием такой кровли по составу и строению применительно к оценке устойчивости выработок с большими пролетами, кровля которых располагается в пределах 4-го сальвинитового слоя.

Установлено, что прочность пород кровли пласта находится в обратной зависимости к содержанию глинистых, а также слабых и глинистых прослоек. Данные зависимости между усредненным (в метровых интервалах) по всем скважинам пределом прочности пород и содержанием глинистых прослоек, а также между пределом прочности пород и содержанием слабых и глинистых прослоек, были определены с помощью линейной аппроксимации. Как видно из рис. 4, *a*, увеличение содержания глинистых прослоек от 0 до 60 % способствует снижению агрегатной (усредненной по метровым интервалам) прочности пород с 19–20 до 12–13 МПа. На такую же величину происходит снижение прочности при увеличении суммарного содержания слабых и глинистых прослоек от 0 до 90 %. При усреднении данных прочностных свойств и содержания глинистых прослоек на интервалах в 1,0 м коэффициент корреляции связи составляет 0,59. Учет влияния помимо глинистых еще и слабых прослоек несколько снижает тесноту связи между факторами (коэффициент корреляции 0,42) по сравнению с учетом влияния только

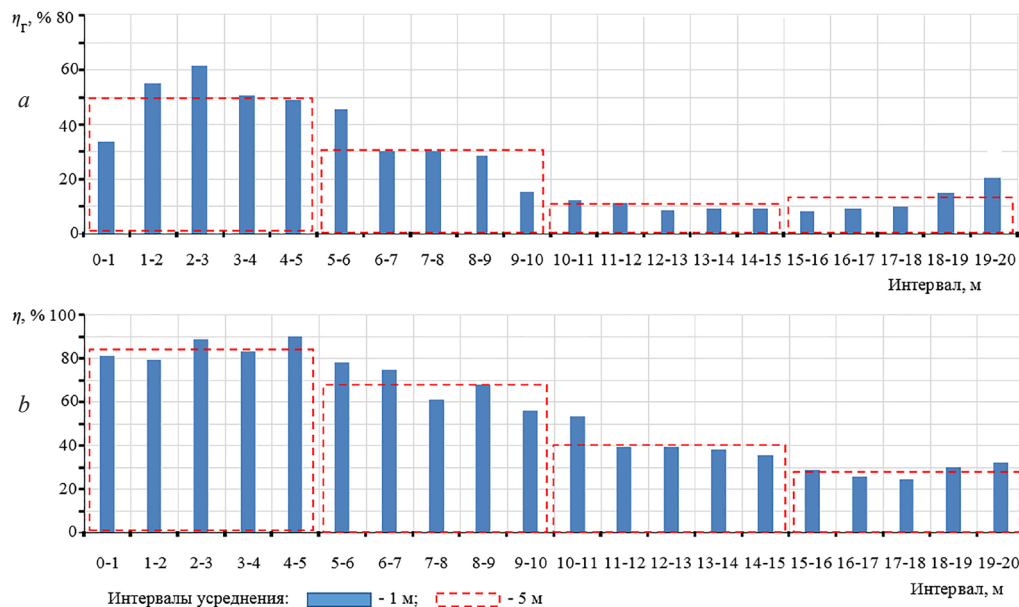


Рис. 3. Изменение содержания слабых и глинистых прослоек в кровле пласта при использовании усреднения в интервалах 1 и 5 м: *a* – изменение содержания глинистых прослоек (η_1 , %) в кровле пласта; *b* – изменение содержания слабых и глинистых прослоек (η , %) в кровле пласта

Fig. 3. Changes in the content of weak and clay layers in the seam roof when averaging in the intervals from 1 to 5 m: *a* – changes in the content of clay layers (η_1 , %) in the seam roof; *b* – changes in the content of weak and clay layers (η , %) in the seam roof

глинистых прослоек. Также установлено, что еще более снижает тесноту связи между факторами учет содержания карналлита в кровле. Очевидно, что наличие карналлита и слабых прослоек воздействует на снижение агрегатной прочности пород несколько слабее, чем наличие глинистых прослоек. Поэтому при оценке устойчивости породных обнажений целесообразно определять степень ослабленности пород по наиболее влияющему фактору – содержанию глинистых прослоек, при этом для уточнения воздействия желательнее также определять наличие слабых прослоек и суммарное содержание слабых и глинистых прослоек.

Анализ данных, полученных по всем скважинам, показал, что имеются сравнительно тесные связи с коэффициентом корреляции от 0,66 до 0,88 между усредненным в интервале 0–20 м содержанием глинистых прослоек, а также слабых и глинистых прослоек в кровле Третьего калийного пласта и глубиной его залегания. Связи между данными показателями проиллюстрированы на графиках рис. 4, *b* и 4, *c*. При увеличении глубины залегания пласта от 580 до 830 м происходит рост среднего содержания глинистых прослоек от 16,5 до 30 %, а среднее содержание слабых и глинистых прослоек возрастает от 48 до 60 %.

Также установлена незначительная связь (с коэффициентом корреляции 0,3) между усредненным в интервале 0–20 м пределом прочности пород и глубиной залегания. Данный факт объясняется тем, что с увеличением глубины залегания пласта на исследуемых участках шахтного поля

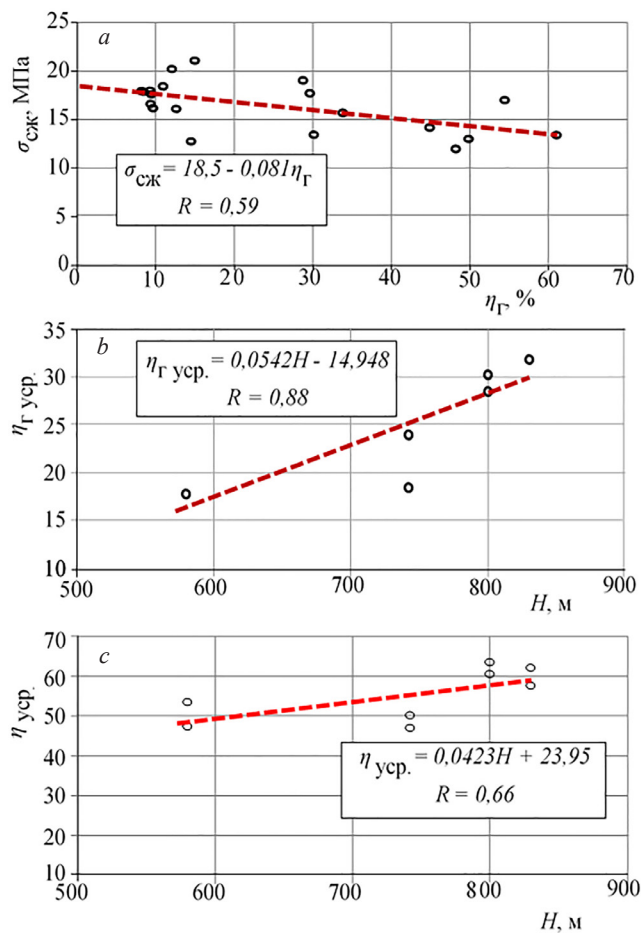


Рис. 4. Связь между усредненным содержанием слабых и глинистых прослоек в кровле пласта, прочностью пород и глубиной залегания: *a* – связь между содержанием глинистых прослоек η_{Γ} и прочностью пород при одноосном сжатии $\sigma_{сж}$; *b* – связь между содержанием глины $\eta_{\Gamma \text{ уср}}$ и глубиной залегания H ; *c* – связь между содержанием слабых и глинистых прослоек в кровле пласта $\eta_{\text{уср}}$ и глубиной залегания H

Fig. 4. The dependence between the content of weak and clay layers of the seam roof and the strength of the rocks and depth: *a* – correlation between the clay content of the layers η_{Γ} and strength of rocks under uniaxial compression $\sigma_{сж}$; *b* – correlation between clay content $\eta_{\Gamma \text{ уср}}$ and depth H ; *c* – dependence between the content $\eta_{\text{уср}}$ of weak and clay layers and depth H

растет содержание слабых и глинистых прослоек. Соответственно и средняя прочность пород кровли Третьего калийного пласта с глубиной несколько снижается, при этом решающее влияние на это оказывает именно фактор роста содержания слабых и глинистых прослоек.

По результатам исследования разработаны Рекомендации по применению новых данных о прочностных и деформационных свойствах пород Третьего калийного пласта для расчетов крепления горных выработок на шахтном поле рудоуправления № 4, которые внесены в качестве дополнения в нормативные документы ОАО «Беларуськалий».

Заключение. Выполнено исследование геологического строения и физико-механических свойств пород, слагающих и перекрывающих Третий калийный пласт на участках шахтного поля рудоуправления № 4 ОАО «Беларуськалий», планируемых к отработке.

Построены геологические разрезы кровли пласта, измерены мощности сильвинитовых и галитовых слоев, дана оценка обрушаемости пород кровли пласта на высоту до 20 м и определен ее тип по составу и строению. Установлено, что непосредственная кровля пласта изменяется от легкообрушаемой на западном направлении до труднообрушаемой на восточных «А» и «Б» направлениях, основная кровля пласта во всех местах проведения исследований является труднообрушаемой. При этом на интервале 0–2 м во всех местах проведения исследований непосредственная кровля относится к I типу по своему составу и строению согласно классификации ОАО «Белгорхимпром».

Прочность при одноосном сжатии как сильвинитовых, так и галитовых слоев для рассматриваемых участков отличается незначительно. Поэтому для решения инженерных задач по обеспечению устойчивости горных выработок и расчета параметров крепления могут быть использованы усредненные значения прочности по группам слоев, которые хорошо коррелируют с процентным содержанием в слоях слабых и глинистых прослоек. Из деформационных свойств пород слоев пласта отличие по их литологическому составу наблюдается для модуля деформации и модуля упругости, в то время как коэффициент поперечных деформаций для разных слоев продуктивного пласта отличается незначительно и может приниматься путем усреднения.

Основным фактором, влияющим на прочность пород, залегающих в кровле Третьего калийного пласта, является содержание слабых и глинистых прослоек. Увеличение содержания глинистых прослоек способствует снижению агрегатной прочности пород при коэффициенте корреляции связи 0,59 %. Учет влияния помимо глинистых еще и слабых прослоек несколько снижает тесноту связи между факторами (коэффициент корреляции 0,42) по сравнению с учетом влияния только глинистых прослоек. Установлено, что с увеличением глубины залегания пласта на исследуемых участках шахтного поля растет содержание слабых и глинистых прослоек, что приводит к некоторому снижению средней прочности пород кровли Третьего калийного пласта с коэффициентом корреляции связи около 0,3 %.

Внедрение полученных результатов позволило повысить достоверность расчетов параметров крепления горных выработок, снизить затраты на их поддержание и повысить безопасность горных работ при отработке Третьего калийного пласта в сложных горно-геологических и горнотехнических условиях.

Список использованных источников

1. Ливенский, В. С. Результаты экспериментальных исследований прочности и расслаиваемости соляных пород кровли на Солигорских калийных рудниках / В. С. Ливенский, Н. М. Проскураков // Новые исследования в горном деле. – Л., 1973. – Вып. 6. – С. 27–32.
2. Лисицын, А. И. Прочностные характеристики соляных пород Старобинского месторождения / А. И. Лисицын // Калийная промышленность. – 1980. – № 5. – С. 9–13.
3. Поляков, А. Л. Анализ геологического строения кровли Третьего калийного пласта на Старобинском месторождении калийных солей / А. Л. Поляков // Горная механика. – 2002. – № 2. – С. 30–36.
4. Ерохин, К. А. Исследование влияния глинистых прослоек на деформирование и устойчивость выработок, расположенных на больших глубинах, в условиях Старобинского месторождения калийных солей / К. А. Ерохин, Е. А. Лутувич // Горная механика и машиностроение. – 2020. – № 3. – С. 16–26.
5. Земсков, А. Н. Природные газы калийных месторождений и меры борьбы с ними / А. Н. Земсков, П. И. Кондрашев, Л. Г. Травникова. – Пермь, 2008. – 414 с.

6. Константинова, С. А. Некоторые задачи механики деформирования и разрушения соляных пород / С. А. Константинова, В. Н. Аптуков. – Новосибирск, 2013. – 192 с.
7. Дубровская, Л. И. Компьютерная обработка естественнонаучных данных методами многомерной прикладной статистики / Л. И. Дубровская, Г. Б. Князев. – Томск, 2011. – 120 с.
8. Вуколов, Э. А. Основы статистического анализа. Практикум по статистическим методам и исследованию операций с использованием пакетов Statistica и Excel / Э. А. Вуколов. – М., 2004. – 464 с.

References

1. Livenskij V. S., Proskuryakov N. M. Results of experimental studies of the strength and delamination of salt roof rocks at the Soligorsk potash mines. *Novye issledovaniya v gornom dele* [New research in mining]. Leningrad. 1973, vol. 6, pp. 27–32 (in Russian).
2. Lisicyn A. I. Strength characteristics of salt rocks of the Starobinsky deposit. *Kalijnaya promyshlennost'* [Potash industry], 1980, no. 5, pp. 9–13 (in Russian).
3. Polyakov A. L. Analysis of the geological structure of the roof of the Third potash layer at the Starobin potassium salt deposit. *Gornaya mekhanika* [Mining mechanical engineering], 2002, no. 2, pp. 30–36 (in Russian).
4. Erokhin K. A., Lutovich Ya. A. Study of influence of clay interbeds of deformation and stability of workings, located at large depths, in the conditions of Starobin deposit of potassium salts. *Gornaya mekhanika i mashinostroenie* [Mining mechanics and mechanical engineering], 2020, no 3, pp. 16–26 (in Russian).
5. Zemskov A. N., Kondrashev P. I., Travnikova L. G. *Natural gases from potash deposits and measures to control them*. Perm, 2008. 414 p. (in Russian).
6. Konstantinova S. A., Aptukov V. N. *Some problems of mechanics of deformation and destruction of salt rocks*. Novosibirsk, 2013. 192 p. (in Russian).
7. Dubrovskaya L. I., Knyazev G. B. *Computer processing of natural science data by methods of multidimensional applied statistics*. Tomsk, 2011. 120 p. (in Russian).
8. Vukolov E. A. *Fundamentals of statistical analysis. Workshop on statistical methods and operations research using Statistica and Excel packages*. Moscow, 2004. 464 p. (in Russian).

Информация об авторах

Петровский Андрей Борисович – заместитель главного инженера по горным работам. ОАО «Беларуськалий» (ул. Коржа, 5, 223710, Солигорск, Минская область, Республика Беларусь). E-mail: belaruskali.office@kali.by.

Прушак Виктор Яковлевич – член-корреспондент, д-р техн. наук, профессор, технический директор. Солигорский институт проблем ресурсосбережения с Опытным производством (ул. Козлова, 69, 223710, Солигорск, Минская область, Республика Беларусь). E-mail: ipr@sipr.by.

Лутович Евгений Анатольевич – магистр технических наук, заведующий отделом. Институт горного дела (ул. Козлова, 69, 223710, Солигорск, Минская область, Республика Беларусь). E-mail: sigd@list.ru.

Information about the authors

Petrovskiy Andrey B. – Deputy Chief Engineer for mining. JSC “Belaruskali” (5, Korzh Str., 223710, Soligorsk, Minsk region, Republic of Belarus). E-mail: belaruskali.office@kali.by.

Prushak Victor Ya. – Corresponding Member, D. Sc. (Engineering), Professor, Technical Director. Soligorsk Institute of Resources Saving Problems with Pilot Production (69, Kozlov Str., 223710, Soligorsk, Minsk Region, Republic of Belarus). E-mail: ipr@sipr.by.

Lutovich Evgeniy A. – Master (Engineering), Head of the Department. Institute of Mining (5, Korzh Str., 223710, Soligorsk, Minsk region, Republic of Belarus). E-mail: sigd@list.ru.