



УДК 622.276+553.632:550.8.013

Статья / Article

© ПНИПУ / PNRPU, 2019

## АНАЛИЗ ДАННЫХ ДЛЯ ГЕОЛОГИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ТОЛЩИ ВЕРХНЕКАМСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ КАЛИЙНО-МАГНИЕВЫХ СОЛЕЙ

**А.В. Катаев, С.Н. Кутовой, Д.А. Мейстер, Е.М. Ефимов, А.П. Рачкова**

Пермский национальный исследовательский политехнический университет (614990, Россия, г. Пермь, Комсомольский проспект, 29)

## ANALYSIS OF DATA FOR THE GEOLOGICAL MODELING STRATA OF THE VKDPS

**A.V. Kataev, S.N. Kutovoy, D.A. Meyster, E.M. Efimov, A.P. Rachkova**

Perm National Research Polytechnic University (29 Komsomolskiy av., Perm, 614990, Russian Federation)

Получена / Received: 27.06.2019. Принята / Accepted: 01.11.2019. Опубликовано / Published: 27.12.2019

### Ключевые слова:

месторождение калийных солей, горно-геологическая информационная система, обработка полевых зарисовок, программный модуль, цифровые профили, система управления базами данными.

Приводятся результаты анализа данных для построения геологической модели Верхнекамского месторождения калийно-магниевого солей на рудниках Соликамской площадки. Предполагается, что разработка модели позволит рассчитывать ожидаемый объем вмещающих пород при планировании горных работ, задавать в вертикальной плоскости положение комбайна относительно кровли пласта при пересечении складок. Прочностные характеристики пластов, полученные с помощью модели, должны являться входными данными для расчетов параметров разработки при планировании горных работ. Результаты моделирования привлекаются для оценки ожидаемых рисков в процессе разработки рудников и при решении многих других задач.

Первичной информации по глубоким скважинам и скважинам, пробуренным из горных выработок, недостаточно для построения достоверной модели, способствующей решению ранее перечисленных и многих других задач. Авторами разработаны программные модули для геологической службы, позволяющие пополнять базу данных векторным изображением границ пластов и слоев по подготовительным и очистным выработкам. Модули основаны на обработке полевых геологических зарисовок как по сканерной, так и по дигитайзерной технологии. В разработанных программах «защиты» унифицированные справочники пород и принятое стратиграфическое расчленение толщи. Использование такой информации значительно уточнит и детализирует модель в толщах залегания промышленных пластов.

Установлено, что изменчивость гипсометрии промышленных пластов на порядок больше изменчивости их мощности. Существенное различие в колебаниях мощности и высотной отметки повлияет на методику построения модели.

Разработанные для геологов программные модули интегрированы в корпоративную горно-геологическую информационную систему ПАО «Уралкалий», которая создается по инициативе и при непосредственном участии авторов.

### Key words:

potash salt deposit, mining and geological information system, field sketching processing, program module, digital profiles, database management system.

The article presents the results of data analysis for the construction of a geological model of the Verkhnekamskoye Deposit of potassium - magnesium salts in the mines of the Solikamsk site. It is assumed that the development of the model will calculate the expected volume of host rocks in the planning of mining, set in the vertical plane of the position of the combine relative to the roof of the formation at the intersection of folds. The strength characteristics of the layers obtained from the model should be the input data for the calculation of the development parameters in the planning of mining operations. The simulation results are used to assess the expected risks in the process of mine development, and in solving many other problems.

Primary information on deep wells and wells drilled from mine workings is not enough to build a reliable model to help solve the previously listed and many other problems. The authors have developed software modules for the geological service, allowing to replenish the database with a vector image of the boundaries of the layers and layers of the preparatory and cleaning workings. The modules are based on processing field geological sketches for both scanner and digitizer technology. In the developed programs, standardized reference books of breeds and accepted stratigraphic division of the stratum are sewn up. The use of such information will significantly clarify and detail the model in the strata of industrial formations.

It has been established that the variability of hypsometry of industrial seams is an order of magnitude greater than the variability of their thickness. A significant difference in power and altitude fluctuations will affect the model construction technique.

The program modules developed for geologists are integrated into the corporate mountain-geological information system of PJSC Uralkali. This system is created on the initiative and with the direct participation of the authors.

**Катаев Анатолий Вениаминович** – кандидат технических наук, доцент кафедры маркшейдерского дела, геодезии и геоинформационных систем (тел.: +007 902 476 87 78, e-mail: [geotech@pstu.ac.ru](mailto:geotech@pstu.ac.ru)). Контактное лицо для переписки.

**Кутовой Сергей Николаевич** – кандидат технических наук, доцент кафедры маркшейдерского дела, геодезии и геоинформационных систем (тел.: +007 950 450 60 09, e-mail: [geotech@pstu.ac.ru](mailto:geotech@pstu.ac.ru)).

**Мейстер Дмитрий Александрович** – инженер кафедры маркшейдерского дела, геодезии и геоинформационных систем (тел.: +007 982 475 01 38, e-mail: [geotech@pstu.ac.ru](mailto:geotech@pstu.ac.ru)).

**Ефимов Евгений Михайлович** – инженер кафедры маркшейдерского дела, геодезии и геоинформационных систем (тел.: +007 902 473 53 87, e-mail: [geotech@pstu.ac.ru](mailto:geotech@pstu.ac.ru)).

**Рачкова Анастасия Павловна** – инженер кафедры маркшейдерского дела, геодезии и геоинформационных систем (тел.: +007 982 475 45 31, e-mail: [geotech@pstu.ac.ru](mailto:geotech@pstu.ac.ru)).

**Anatoliy V. Kataev** (Author ID in Scopus: 7003774612) – PhD in Engineering, Associate Professor of the Department of Surveying, Geodesy and Geoinformation Systems (tel.: +007 902 476 87 78, e-mail: [geotech@pstu.ac.ru](mailto:geotech@pstu.ac.ru)). The contact person for correspondence.

**Sergey N. Kutovoy** – PhD in Engineering, Associate Professor of the Department of Surveying, Geodesy and Geoinformation Systems (tel.: +007 950 450 60 09, e-mail: [geotech@pstu.ac.ru](mailto:geotech@pstu.ac.ru)).

**Dmitry A. Meyster** – Engineer of the Department of Surveying, Geodesy and Geoinformation Systems (tel.: +007 982 475 01 38, e-mail: [geotech@pstu.ac.ru](mailto:geotech@pstu.ac.ru)).

**Evgeniy M. Efimov** – Engineer of the Department of Surveying, Geodesy and Geoinformation Systems (tel.: +007 902 473 53 87, e-mail: [geotech@pstu.ac.ru](mailto:geotech@pstu.ac.ru)).

**Anastasiya P. Rachkova** – Engineer of the Department of Surveying, Geodesy and Geoinformation Systems (tel.: +007 982 475 45 31, e-mail: [geotech@pstu.ac.ru](mailto:geotech@pstu.ac.ru)).

## Введение

Организационно структура ПАО «Уралкалий» представляет собой предприятие, состоящее из нескольких удаленных друг от друга рудников с централизованными органами управления, учета и контроля. Компания разрабатывает Верхнекамское месторождение калийно-магниевого солей, значительное по площади [1–3]. В таких условиях осуществление оперативного обмена горной графической информацией и документооборота становится актуальной задачей. Детальное знание такой информации и накопленный опыт ее использования помогает специалисту корректно оценивать происходящие в недрах процессы [4, 5, 6], выбрать наиболее адекватный вариант ведения горных работ [4], в сложной горной ситуации на основе анализа данных позволяет принять правильное решение [7–13].

## Сведения об объекте

Месторождение находится в центральной части Соликамской синклинали Предуральяского прогиба. Калийно-магниевого соли расположены между толщами покровной и подстилающей каменной соли, залежь имеет пластовую форму. В соляной толще выделяют подстилающую соль, сильвинитовую и сильвинито-карналлитовую зоны, выше которой залегает покровная соль. Пласты сматы сложной системой складок, от мелких внутрисластовых, до крупных, охватывающих серию пластов [1–3]. Промышленными являются пласты Кр-II, АБ и В. Внутрисластовая складчатость изменяет первичную мощность слоев, увеличивает объем вмещающих пород в отбитой горной массе и влияет на ее качество. Межпластовые складки увеличивают вертикальные мощности пластов и также ухудшают качество руды. На рудниках принята камерная система разработки с жесткими ленточными междуканальными целиками, предусматривающая комбайновый способ разработки промышленных пластов [4]. Комбайны имеют ограничение по углу наклона выработки до 8–12 градусов. В связи с этим ограничением на участках с развитой складчатостью повышаются потери полезного ископаемого и увеличиваются объемы разубоживания в рудной массе. Вместе с тем на этапе планирования очистных работ информация о гипсометрии пласта на всю ширину панели с необходимой детальностью отсутствует. Ее, а также другую необходимую информацию предполагается получать из геологической модели [9–13].

Верхнекамское месторождение разведано редкой сетью глубоких скважин, пробуренных с поверхности. В процессе эксплуатации бурятся скважины детальной разведки в выработках на толщину промышленных пластов и отбираются бороздовые пробы по стенкам выработок. План расположения глубоких скважин и пробуренных в выработках рудников Соликамской площади представлен на рис. 1.

В странах с развитой горнодобывающей промышленностью предприятиями используются горно-геологические информационные системы, предназначенные для решения широкого круга геологических, маркшейдерских и технологических задач (DATAMINE, MICROMINE, GEOVIA Surpac™, VULCAN и др.) [11, 14–19]. Но редкие из них имеют возможность полноценно работать с промышленными системами управления базами данных, сохраняя в них маркшейдерскую графику, привязанные к объектам цифровых слоев данные и результаты геологического моделирования. Авторы статьи разрабатывают для компании систему, охватывающую информационные потребности инженерных отделов всего предприятия [20–26]. Уже разработаны и используются программные приложения, которые позволили автоматизировать решение основных производственных задач разных уровней – оперативного для служб нижнего звена, функционального для руководителей среднего уровня и стратегического для служб главных специалистов.

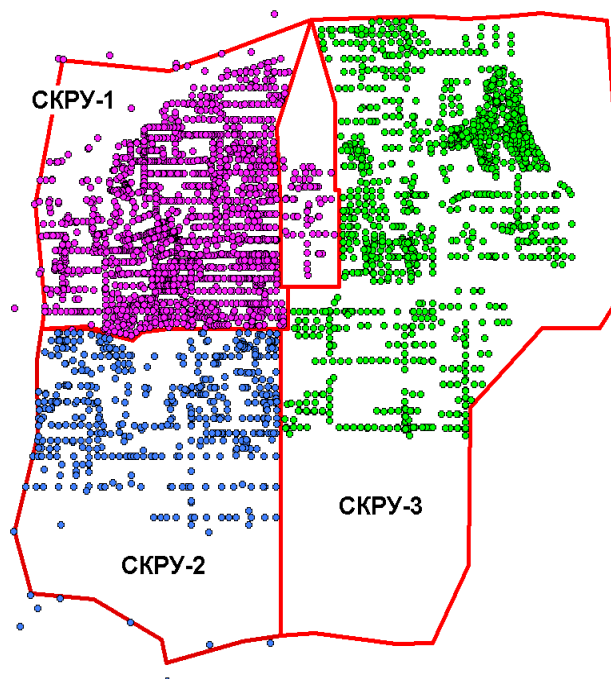


Рис. 1. Расположение скважин в границах горных отводов рудников (без Полововодского участка)

Разрабатываются и программные средства для текущей обработки полевых замеров инженерных служб, включая маркшейдеров [27–31], геомехаников [6, 26], геологов [20, 23], горняков [7], создана программа для моделирования геологической среды [24].

#### Анализ существующих данных, их дополнение

Достоверность создаваемой цифровой геологической модели зависит в первую очередь от качества исходной информации и от ее полноты. На руднике площадью 7×14 км скважин глубокого бурения не более сотни. Согласно требованиям инструкции [32] по геологическому обеспечению рудников специалисты геологической службы формируют первичную геологическую документацию по горным выработкам. По стенкам подготовительных выработок в полевых журналах зарисовываются геологические профили. На профили наносятся видимые положения кровли и почвы пластов, положение поперечных сечений в выработке, снятых маркшейдерами, и маркшейдерские пункты. Бумажные зарисовки применяются потому, что рудники относятся к опасным по газодинамическим явлениям, ноутбуки в выработках использовать запрещено. Скважины подземного бурения размещают в подготовительных выработках на расстоянии 50–150 м друг от друга, осуществляется и отбор бороздовых проб. Вся информация по ним введена в базу данных ПАО «Уралкалий» [22–24, 33].

Полевые материалы по подготовительным выработкам обрабатываются в реализованных авторами программных средствах. Профиль сканируется и привязывается к маркшейдерским пунктам, после чего все видимые пластопере-

сечения (рис. 2) цифруются в модуле «Геология по продольному профилю» и заносятся в базу данных. Такая работа нами сделана по старым подготовительным выработкам и выполняется геологами по текущим объектам. В очистных камерах геологические зарисовки составляются на поперечных сечениях выработок, снятых, сформированных и введенных в базу данных маркшейдерской службой. Полевую книгу с сечениями можно также сканировать с последующей привязкой изображений. В программе имеется и более удобный механизм привязки изображения поперечного сечения с использованием графического планшета. После привязки сечения геологическая информация на планшете цифруется пером (стилусом), затем также вводится в базу данных. В разработанных модулях защиты унифицированные справочники пород и принятое стратиграфическое расчленение толщи [4]. На рис. 3 показан пример обработанной зарисовки в программном модуле «Геология по сечениям».

Таким образом, геологическая информация с поперечных сечений каждой новой камеры поступает в базу данных. В старых выработках эта информация присутствует редко.

В программах по обработке и вводу в базу зарисовок в подготовительных и очистных выработках геологическая служба вычисляет объемы вмещающих пород. Привязка зарисовок в системе координат рудника и последующее цифровое описание границ пласта позволяет ввести в базу данных большой объем дополнительной информации по пластопересечениям. Разработанные для геологов программные модули интегрированы в корпоративную горно-геологическую информационную систему ПАО «Уралкалий» (ГИС ПАО «Уралкалий»).

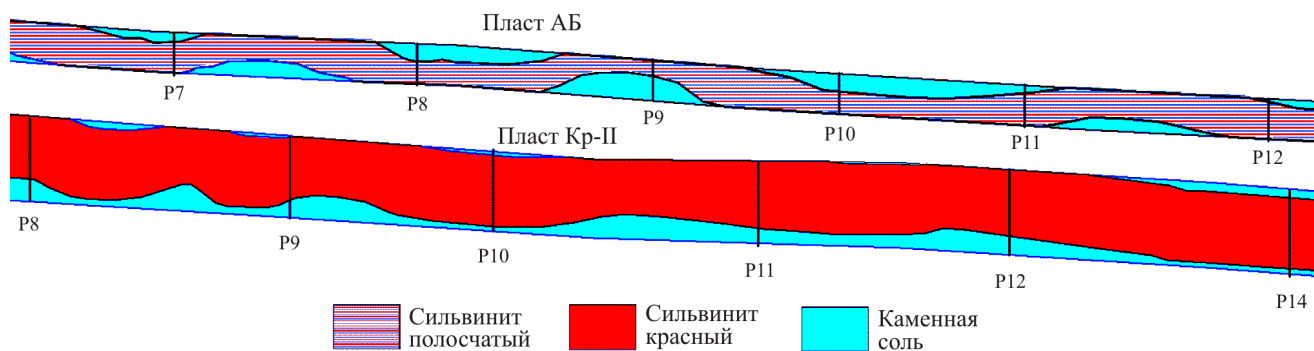


Рис. 2. Фрагмент оцифрованного профиля по стенке камеры 104 (пласт АБ, Кр-II, панель 4 СВ)

На рис. 4 показаны три панели по первому Соликамскому руднику, примерный размер области 1080×1360 м. На границах этого участка пробурены всего три глубоких скважины. Расстояние между соседними скважинами 1000 м. Подземных скважин из подготовительных выработок на этом участке 191 единица. По этим скважинам геологом в полевых материалах фиксируются все пластопересечения. Профили имеются по подготовительным выработкам, которые на этих панелях пройдены через 150–180 м.

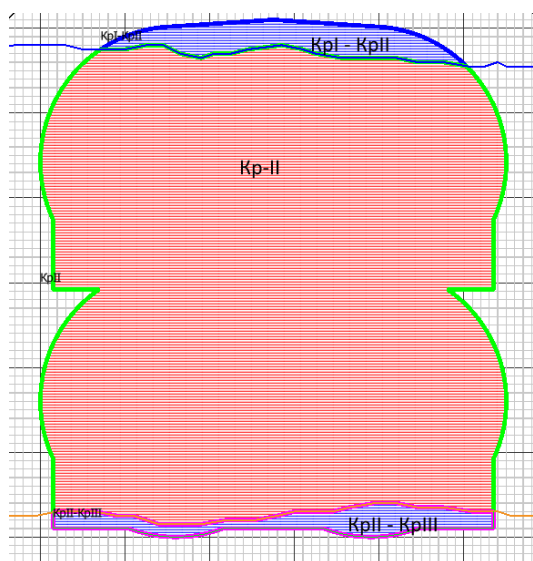
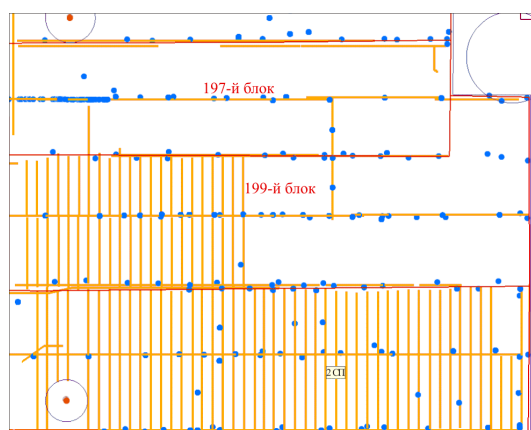


Рис. 3. Границы кровли и почвы пласта Кр-2 на оцифрованном поперечном сечении камеры 118 (12-я западная панель СКРУ-1, расстояние от горловины 70, 60 м)



● Скважины глубокого бурения ● Скважины подземные  
— Геологические профили и подземные скважины

Рис. 4. Расположение скважин и профилей на трех юго-восточных панелях СКРУ-1

Подготовительные выработки по пластам проводятся соосно, поэтому на профиле геолог

может отобразить границы всех разрабатываемых пластов. Для детализации на сложных участках отображаются и слои, входящие в пласт. Результаты интерпретации геологического строения вскрытой подземным скважинам толщи также накладываются на профили. Они дополняют недостающие сведения о геологических границах слоев между промышленными пластами. В ряде случаев (крайне редко) профили составляются и в камерах. На приведенном рисунке эти профили размещены через 28 м.

Бороздовые пробы отбираются также по подготовительным выработкам с интервалом в среднем 50 м. Они дают информацию о качественном составе. Большой объем имеющейся информации по промышленным пластам на разработанных участках дает хорошее представление об их геометрии и качестве. Информацию о строении покрывающей толщи можно получить только по скважинам глубокого бурения. Особенности строения покрывающей толщи на отдельных участках исследуются в основном геофизическими методами.

#### Анализ изменчивости промышленных пластов

В хорошо изученной толще промышленных пластов визуально замечены неравномерности гипсометрии пластов от Кр-II до В. В литературе по геологическому строению месторождения [1, 2] также были высказаны предположения, что изменчивость гипсометрии промышленных пластов увеличивается от пласта Кр-II до пласта В. Но сравнительного анализа в числовой форме выполнено не было. Для построения модели в толще промышленных пластов необходимо ее сначала исследовать, выявить изменчивость гипсометрии и мощности пластов.

Для исследований были обработаны скважины по трем рудникам СКРУ-1, СКРУ-2 и СКРУ-3, использовались только скважины подземные и глубокого бурения. Пробы не исследовали по следующим причинам.

Опробование проводится геологом по стенкам горных выработок. На отдельных участках выработкой может быть вскрыто положение кровли и (или) почвы пласта. При опробовании геолог выбирает наиболее представительный участок выработки, где мощность пласта не будет иметь сильно отличающееся от среднего значения. Скважины вскрывают границы пласта случайным образом, повышается вероятность ее пересечения пласта

в любых флексурах, при этом может наблюдаться повышенный разброс значений мощности.

В таблице приведены результаты статистической обработки скважин по промышленным пластам трех рудников. В процессе обработки учитывались только данные с ненулевыми значениями. Обработывались мощность пласта, высотная отметка почвы, содержание полезного компонента КСІ. По ряду скважин мощность

пласта отображена неполностью или содержание не было указано, такие данные исключались. Некоторые пласты сильвинитового состава могут быть замещены карналлитом (например, пласт В) или каменной солью. В процессе обработки учитывались только данные с кондиционными значениями по содержанию и мощности. В расчетах использовались мощность пласта, высотная отметка почвы, содержание полезного компонента КСІ.

#### Статистическая информация по промышленным пластам

Параметр	Количество скважин	Среднее значение м	Минимум, м	Максимум, м	Стандарт, м
<b>СКРУ-1</b>					
<i>Скважины Кр-II</i>					
m	1438	5,97	2,05	28,4	1,76
H Кр-II	1439	-150,35	-306,64	18,71	46,15
КСІ	429	24,79	16,08	37,95	3,08
<i>Скважины АБ</i>					
m	1565	4,81	1,70	30,45	2,56
АБ	1706	-134,05	-296,34	35,00	48,81
КСІ	652	30,08	16,28	46,66	5,34
<i>Скважины В</i>					
m	1144	9,58	1,70	33,52	4,21
H В	1153	-125,53	-292,15	41,81	52,65
КСІ	596	22,2	16,26	44,53	5,82
<b>СКРУ-2</b>					
<i>Скважины Кр-II</i>					
m	472	6,48	3,43	17,8	1,6
H Кр-II	472	-147,426	-302,655	-17,66	58,64
KCL	214	23,93	16,68	34,08	3,03
<i>Скважины АБ</i>					
m	485	4,86	1,8	14,74	1,48
H АБ	483	-134,067	-293,281	-4,06	60,704
KCL	293	32,19	16,45	40,76	4,02
<i>Скважины В</i>					
m	463	8,00	3,62	18,99	2,85
H В	463	-126,387	-286,133	-6,56	62,06
KCL	162	28,21	16,2	47,02	7,71
<b>СКРУ-3</b>					
<i>Скважины Кр-II</i>					
m	1084	4,46	2,1	10,5	0,97
H Кр-II	1087	-158,69	-228,122	-54,26	39,25
KCL	145	24,80	17,39	37,4	3,48
<i>Скважины АБ</i>					
m	1162	3,37	1,80	13	1,06
H АБ	1189	-148,671	-220,05	-40,84	40,49
KCL	461	30,74	17,6	42,37	5,35
<i>Скважины В</i>					
m	1073	6,98	1,8	16,2	2,49
H В	1077	-138,072	-216,74	-34,378	41,022
KCL	191	30,27	16,70	40,46	6,43

В геометрии недр изменчивость признака определяется многими способами [34], в том числе и величиной стандартного отклонения. Эта статистика и была использована для анализа вариабельности признаков.

По объему данных выборки по каждому пласту представительны, результаты расчетов на рудниках Соликамской площади статистически значимы. Расчеты свидетельствуют об увеличении стандартного отклонения мощности нижнего пласта (Кр-II) к вышележащему пласту (рис. 5). При этом если от Кр-II до АБ изменение небольшое или отсутствует (СКРУ-2, СКРУ-3), то от АБ к пласту В разброс мощности увеличивается вдвое.

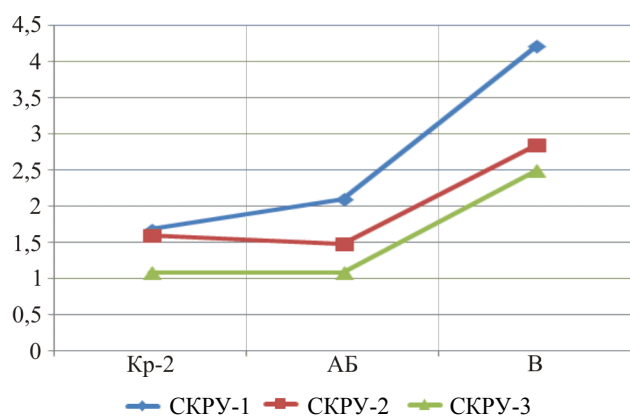


Рис. 5. Графики изменения стандартного отклонения мощности пластов на рудниках

Минимальное значение стандартного отклонения составляет 0,97 м на пласте Кр-II СКРУ-3 и повышается до 2,56 м на пласте АБ по СКРУ-1 (см. рис. 5). Пласт АБ находится выше пласта Кр-II в среднем на 10–16 м. На пласте В колебания мощности прослеживаются уже значительно. Стандартное отклонение мощности для этого пласта увеличивается до 4,21 м при меньшей высоте междупластья (пласт В выше пласта АБ от 7,5 до 10,5 м).

Расчеты свидетельствуют, что величина стандартных отклонений гипсометрии любого пласта во много раз выше аналогичного отклонения по мощности. Если средний разброс мощности пластов составляет 2,4 м (пласт АБ), то стандартное отклонение почвы этого же пласта равно 48,81 м. Величина разброса высотной отметки почвы на разных пластах колеблется в пределах от 39,25 для пласта Кр-II СКРУ-3 до 62,06 м (пласт АБ, СКРУ-2).

Содержание полезного компонента также стабильнее на нижнем пласте, его разброс

повышается почти в два раза на пласте В. В анализ включен пласт В только сильвинитового состава. Визуальный анализ геологических зарисовок по стенкам выработок приводит к аналогичным выводам.

### Рекомендации к моделированию геологической толщи

Традиционно процесс моделирования геологической среды начинают от земной поверхности, и с учетом имеющейся информации по скважинам толща моделируется до промышленных пластов [35–43]. В условиях, когда строение промышленных пластов в горных выработках хорошо исследовано и документировано, имеет смысл начинать моделирование пластов от самого изученного и стабильного пласта. Для рудников Соликамской площадки наиболее выдержанным является пласт Кр-II. Гипсометрия его почвы также меняется в меньшей степени, чем у вышележащих пластов. Именно по нему строится базовая поверхность (или тело пласта), от которой в дальнейшем производятся построения до следующего маркирующего горизонта или до земной поверхности.

В соответствии с современным представлением о геологическом строении Верхнекамского месторождения калийно-магниевого солей вся толща делится на согласные (конформные) последовательности. Они состоят из стратиграфических элементов (набор пластов или толщ), обладающих сходными стратиграфическими и структурными характеристиками. Последовательности включают смежные по мощности участки толщи с примерно одинаковыми условиями возникновения.

Как правило, все пласты и слои в одной последовательности залегают согласно, в одной модели допускается несколько выдержанных таких наборов толщ. Пласты не должны пересекать границы последовательностей, но могут выклиниваться на их границах [44, 45]. Азимуты и углы падения пластов в разных последовательностях могут существенно отличаться.

С учетом строения толщи и наличия имеющейся информации в базе данных авторами при построении геологической модели рекомендован следующий порядок формирования последовательностей в толще:

- 1) сильвинитовая толща;
- 2) вниз – подстилающая каменная соль.

Выше сильвинитовой толщи:

3) сильвинито-карналлитовая толща;

4) покровная каменная соль;

5) соляно-мергельная толща;

6) пестроцветная толща;

7) четвертичные отложения  $Q$  (до земной поверхности).

По результатам выполненных исследований можно сделать следующие выводы:

– мощность пласта Кр-II имеет наименьшее отклонение от его среднего значения в сравнении с пластом АБ и особенно В;

– граница разброса кондиционного содержания полезного компонента увеличена на 30–40 % по сравнению с изменением мощности;

– положение почвы пластов по высоте обладает на порядок большей изменчивостью в сравнении с мощностью;

– скважины глубокого бурения дают незначительно завышенные результаты отклонений в сравнении с общими данными.

### Заключение

Результаты исследований повлияют на технологию построения модели геологической среды. За базовую поверхность должна приниматься кровля (или почва) пласта Кр-II сильвинитовой толщи. Поскольку снизу вверх рельеф кровли пластов усложняется, а мощность изменяется в меньшей степени, чем высотная отметка пласта, дальнейшее построение модели производится наложением на базовую поверхность вышележащих пластов и междупластий в пределах каждой конформной последовательности. С учетом стратиграфических и структурных особенностей формирования в каждой последовательности пласты откладываются по мощности до почвы сильвинито-карналлитовой толщи, а впоследствии и до земной поверхности. Аналогично модель достраивается и в подстилающую каменную соль, до глубины ниже почвы подготовительных выработок по каменной соли.

### Библиографический список

1. Голубев Б.М. Строение соляной толщи Верхнекамского месторождения: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Пермь, 1972.

2. Соликамская впадина [Электронный ресурс] / И.И. Чайковский, С.Г. Горбунов, О.Ф. Корочкина, Л.В. Андрейко. – URL: <http://geoperm.books-place.ru/pam007-1.htm> (дата обращения: 04.04.2019).

3. Чернопазов Д.С., Секунцов А.И. Технологические и геомеханические аспекты вовлечения сильвинитового пласта АБ на рудниках ВКМКС // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Геология. Нефтегазовое и горное дело. – 2013. – № 7. – С. 47–56. DOI: 10.15593/2224-9923/2013.7.5

4. Методическое руководство по ведению горных работ на рудниках Верхнекамского калийного месторождения / УФ ВНИИГ. – М.: Недра, 1992. – 468 с.

5. Катаев А.В., Кутовой С.Н. Решение задач горной геомеханики на базе геологической модели массива // Современные геомеханические методы в горной промышленности и подземном гражданском и туннельном строительстве: материалы междунар. геомеханич. конф. – Несебыр, 2003. – С. 19–22.

6. Кутовой С.Н., Катаев А.В., Мейстер В.А. Вычисление прогнозных оседаний земной поверхности над границами горных работ с использованием цифровых планов и интеграционных сеток // Известия вузов. Горный журнал. – 2014. – № 8. – С. 71–77.

7. Кутовой С.Н., Круглов Ю.В. Автоматизация планирования горных работ на базе цифровых маркшейдерских планов // Наука производству. – 2002. – № 4. – С. 5–7.

8. Кубрин С.С. Автоматизированная система управления горным производством как платформа комплексирования технологических стадий и операций в единый технологический процесс // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2016. – № 11. – С. 96–107.

9. Звонарев А.Ю., Горцуев А.М. Современные информационные технологии в проектировании и планировании горных работ // Записки горного института. – СПб., 2012. – Т. 198. – С. 91–94.

10. Капутин Ю.Е. Информационные технологии планирования горных работ. – СПб.: Недра, 2004. – 334 с.

11. Наговицын О.В., Лукичев С.В. Горно-геологические информационные системы, область применения и особенности построения // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2016. – № 7. – С. 71–83.

12. Аленичев В.М., Суханов В.И. Перспективы внедрения горно-геологических информационных систем на отечественных горных предприятиях // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2016. – № 8. – С. 5–15.

13. Об утверждении Правил подготовки, рассмотрения и согласования планов и схем развития горных работ по видам полезных ископаемых: Постановление Правительства РФ от 6 августа 2015 г. № 814 [Электронный ресурс]. – URL: <https://base.garant.ru/71158594/> (дата обращения: 17.05.2019).
14. Digital solutions for the mining industry [Электронный ресурс]. – URL: <https://new.siemens.com/global/en/markets/mining-industry/digitalization.html> (дата обращения: 23.04.2019).
15. Dassault Systèmes aids coal mining reporting with release of GEOVIA Minex 6.5 [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.mining.com/web/dassault-systemes-aids-coal-mining-reporting-with-release-of-geovia-minex-6-5/> (дата обращения: 23.04.2019).
16. Некрасова О.И. Обзор компьютерных систем геолого-маркшейдерского профиля [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.docme.ru/doc/1535886/obzor-kompyuternyh-sistem-geologo-markshejderskogo-profilya> (дата обращения: 09.02.2019).
17. Geotechnical & geoenvironmental software directory // Bedrock. – 2014. – URL: <http://www.ggsd.com/index.cfm> (дата обращения: 06.03.2019).
18. Earth science and GIS software [Электронный ресурс] // Rockware. – 2014. – URL: <http://www.ggsd.com/index.cfm> (дата обращения: 06.03.2019).
19. 3D Modelling geology and mining [Электронный ресурс]. – URL: [https://www.3d-geology.de/software/geology\\_and\\_mining/](https://www.3d-geology.de/software/geology_and_mining/) (дата обращения: 22.04.2019).
20. Внедрение ГИС-технологий на калийных рудниках Урала / А.В. Катаев, С.Н. Кутовой, А.О. Киселев, Ю.В. Круглов // Известия вузов. Горный журнал. – 2003. – № 2. – С. 111–116.
21. Катаев А.В., Кутовой С.Н. Разработка концепции информационной системы ОАО «Сильвинит» // Маркшейдерский вестник. – 2003. – № 2. – С. 21.
22. Создание горно-геологической информационной системы горных предприятий / А.В. Катаев, С.Н. Кутовой, Е.М. Ефимов, Д.А. Мейстер // Рудник будущего. – 2014. – № 3–4. – С. 38–49.
23. Создание горно-геологической информационной системы ПАО «Уралкалий» / А.В. Катаев, С.Н. Кутовой, Е.М. Ефимов, Д.А. Мейстер // Проблемы недропользования. – 2016. – № 2. – С. 26–31.
24. Катаев А.В., Кутовой С.Н. Разработка модели геологической среды для рудников Верхнекамского месторождения калийных солей // Маркшейдерский вестник. – 2003. – № 2. – С. 25–27.
25. Катаев А.В., Кутовой С.Н., Кутырев В.Ф. Опыт создания ГИС геолого-маркшейдерской службы // Геопрофи. – 2002. – № 6. – С. 5–7.
26. Кутовой С.Н. Расчет прогнозных оседаний земной поверхности с использованием интеграционных сеток на примере отработки Верхнекамского месторождения калийных солей // Известия вузов. Горный журнал. – 2012. – № 7. – С. 37–44.
27. Автоматизированное рабочее место маркшейдера на базе цифровых планов горных работ / А.В. Катаев, С.Н. Кутовой, А.В. Телицын, Е.В. Нестеров, М.В. Гилев // Маркшейдерский вестник. – 2003. – № 2. – С. 28–31.
28. Автоматизация маркшейдерских вычислений и их графического оформления на цифровых планах горных работ / А.В. Катаев, С.Н. Кутовой, А.В. Телицын, Е.В. Нестеров // Наука производству. – 2003. – № 10. – С. 24–31.
29. Методика создания цифровых маркшейдерских планов для рудников Верхнекамского месторождения калийных солей / А.В. Катаев, С.Н. Кутовой, А.О. Киселев, С.А. Кислухина, М.В. Гилев // Проблемы формирования и комплексного освоения месторождений солей: VI солевое совещание: материалы междунар. конф. – Соликамск, 2000. – С. 82–84.
30. Опыт работ по автоматизации обработки маркшейдерских замеров закладки выработанного пространства на рудниках ПАО «Уралкалий» / С.Н. Кутовой, А.В. Катаев, Д.А. Васенин, Е.М. Ефимов // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Геология. Нефтегазовое и горное дело. – 2017. – Т. 16, № 2. – С. 174–182. DOI: 10.15593/2224-9923/2017.2.8.
31. Эксплуатационные потери и разубоживание в информационной системе ОАО «Сильвинит» / А.В. Катаев, С.Н. Кутовой, Е.М. Ефимов, М.В. Гилев // Маркшейдерский вестник. – 2009. – № 3. – С. 36–40.
32. Инструкция по геологическому обслуживанию лицензионных участков Верхнекамского месторождения солей ПАО «Уралкалий». – 3-е изд. – Березники, 2015.
33. Катаев А.В., Кутовой С.Н. Создание элементов горно-геологической информационной системы горных предприятий // Tagungsband Energie und Rohstoffe 2013 – IFM & DMV: XV Int. ISM Congress 2013. – Clausthal – Zellerfeld: Verlag Grbh, 2013. – Vol. 1.



34. Букринский В.А. Геометрия недр: учеб. для вузов. – М.: Горная книга, 2012. – 550 с.

35. Remediation and monitoring of abandoned mines / Shen Baotang, Brett Poulsen, Luo Xun, Qin Johnny, Ramesh Thiruvengatchari, Duan Yi // *International Journal of Mining Science and Technology*. – 2017. – Vol. 27, iss. 5. – P. 803–811.

36. Coupled modeling between geological structure fields and property parameter fields in 3D engineering geological space / Liang-feng Zhu, Ming-jiang Li, Chang-ling Li, Jian-ga Shang, Bing Zhang, Xi-feng Wang // *Engineering Geology*. – 2013. – Vol. 167. – P. 105–116

37. Natural resource solutions (SRK Consulting UK) [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.srk.co.uk/en/our-services/mining-geology-resource-estimation/uk-2d-and-3d-geological-modelling> (дата обращения: 22.04.2019).

38. Панишев М.А. Интеграция информационных технологий в производственный процесс добычи полезных ископаемых // *Золото и технологии*. – 2013. – № 3 (21).

39. Griffin coal – geological modeling and resource estimation [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.srk.ru.com/en/newsletter/focus-coal/griffin-coal-geological-modeling-and-resource-estimation> (дата обращения: 12.04.2019).

40. Yunsel T., Ersoy A. Geological modeling of rock type domains in the Balya (Turkey) lead-zinc deposit using plurigaussian simulation [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.degruyter.com/view/j/geo.2013.5.issue-1/s13533-012-0113-z/s13533-012-0113-z.xml> (дата обращения: 12.03.2019).

41. Modeling of stress-strain state of rocks during coal deposits exploration [Электронный ресурс] / O.M. Ivanik, V.V. Shevchuk, M.V. Lavrenyuk, M.V. Saveliev. – URL: <http://www.earthdoc.org/publication/publicationdetails/publication=89501> (дата обращения: 12.03.2019).

42. Tolosana-Delgado R., Mueller U., Gerald van den Boogaar K. Geostatistics for compositional data: an overview [Электронный ресурс] // *Mathematical geosciences*. – 2019. – Vol. 51 – URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11004-018-9769-3> (дата обращения: 23.04.2019).

43. Haddow D.J., Cowan E.J. Practical implicit dyke modelling – newmont boddington gold, Western Australia // *AusIMM Monograph 30: in mineral resource and ore reserve estimation – The AusIMM guide to good practice*. – Second ed. – 2014. – P. 221–228.

44. MINEFRAME – подходы к решению задач проектирования и планирования горных работ /

С.В. Лукичев, О.В. Наговицын, И.Э. Семенова, О.В. Белгородцев // *Инновационные направления в проектировании горнодобывающих предприятий*: сб. науч. тр. – СПб., 2017. – С. 50–58.

45. ГИС ГЕОМИКС для горной промышленности России и Казахстана / Ю.И. Волков, С.С. Серый, В.А. Дунаев, А.В. Герасимов // *Горный журнал*. – 2015. – № 5. – С. 32–34.

## References

1. Golubev B.M. Stroenie solianoj tolshchi Verkhnekamskogo mestorozhdeniia [The structure of the salt stratum of the Verkhnekamsk field]. Ph. D. thesis. Perm, 1972

2. Chaikovskii I.I., Gorbunov S.G., Korochkina O.F., Andreiko L.V. Solikamskaia vpadina [Solikamsk Depression], available at: <http://geoperm.books-place.ru/pam007-1.htm> (accessed 04 April 2019).

3. Chernopazov D.S., Sekuntsov A.I. Technological and geomechanical aspects of involving in the development of substandard by thickness sylvinitic layers AB at the mines VKMKS. *Bulletin of PNRPU. Geology. Oil and Gas Engineering and Mining*, 2013, no.7, pp.47-56. DOI: 10.15593/2224-9923/2013.7.5

4. Metodicheskoe rukovodstvo po vedeniiu gornyx rabot na rudnikakh Verkhnekamskogo kaliinogo mestorozhdeniia [Guidelines for mining at the mines of the Verkhnekamsk potash field]. Moscow, Nedra, 1992, 468 p.

5. Kataev A.V., Kutovoi S.N. Reshenie zadach gornoj geomekhaniki na baze geologicheskoi modeli massiva [Solving the problems of mining geomechanics based on the geological model of the massif]. *Sovremennye geomekhanicheskie metody v gornoj promyshlennosti i podzemnom grazhdanskom i tunnelnom stroitelstve: materialy mezhdunarodnoi geomekhanicheskoi konferentsii*. Nesebyr, 2003, pp.19-22.

6. Kutovoi S.N., Kataev A.V., Meister V.A. Vychislenie prognoznnykh osedanii zemnoi poverkhnosti nad granitsami gornyx rabot s ispolzovaniem tsifrovnykh planov i integratsionnykh setok [Calculation of predicted subsidence of the earth's surface over the boundaries of mining using digital plans and integration grids]. *Izvestiia vuzov. Gornyi zhurnal*, 2014, no.8, pp.71-77.

7. Kutovoi S.N., Kruglov Iu.V. Avtomatizatsiia planirovaniia gornyx rabot na baze tsifrovnykh marksheiderskikh planov

[Automation of mining planning based on digital surveying plans]. *Nauka proizvodstvu*, 2002, no.4, pp.5-7.

8. Kubrin S.S. Avtomatizirovannaia sistema upravleniia gornym proizvodstvom kak platforma kompleksirovaniia tekhnologicheskikh stadii i operatsii v edinyi tekhnologicheskii protsess [Automated control system of mining, as a platform of integration of process steps and operations in a single technological process]. *Gornyi informatsionno-analiticheskii biulleten*, 2016, no.11, pp.96-107.

9. Zvonarev A.Iu., Gortsuev A.M. Sovremennye informatsionnye tekhnologii v proektirovanii i planirovanii gornykh rabot [Modern information technologies in designing and planning of mining operation]. *Zapiski gornogo instituta*. Saint Petersburg, 2012, vol.198, pp.91-94.

10. Kaputin Iu.E. Informatsionnye tekhnologii planirovaniia gornykh rabot [Information technology of mining planning]. Saint Petersburg, Nedra, 2004, 334 p.

11. Nagovitsyn O.V., Lukichev S.V. Gorno-geologicheskie informatsionnye sistemy, oblast primeneniia i osobennosti postroeniia [Mining and geological information systems, areas of application and features of building]. *Gornyi informatsionno-analiticheskii biulleten (nauchno-tekhnicheskii zhurnal)*, 2016, no.7, pp.71-83.

12. Alenichev V.M., Sukhanov V.I. Perspektivy vnedreniia gorno-geologicheskikh informatsionnykh sistem na otechestvennykh gornykh predpriatiiakh [Prospects for the introduction of geological information systems on the domestic mining enterprises]. *Gornyi informatsionno-analiticheskii biulleten (nauchno-tekhnicheskii zhurnal)*, 2016, no.8, pp.5-15.

13. Ob utverzhdenii Pravil podgotovki, rassmotreniia i soglasovaniia planov i skhem razvitiia gornykh rabot po vidam poleznykh iskopaemykh [On approval of the Rules for the preparation, review and approval of plans and development schemes for mining operations by type of minerals]: Postanovlenie pravitelstva Rossiiskoi Federatsii ot 6 avgusta 2015 goda no. 814, available at: <https://base.garant.ru/71158594/> (accessed 17 May 2019).

14. Digital solutions for the mining industry, available at: <https://new.siemens.com/global/en/markets/mining-industry/digitalization.html> (accessed 23 April 2019).

15. Dassault Systèmes aids coal mining reporting with release of GEOVIA Minex 6.5, available at: <http://www.mining.com/web/>

[das-sault-systemes-aids-coal-mining-reporting-with-release-of-geovia-minex-6-5/](http://www.mining.com/web/das-sault-systemes-aids-coal-mining-reporting-with-release-of-geovia-minex-6-5/) (accessed 23 April 2019).

16. Nekrasova O.I. Obzor kompiuternykh sistem geologo-marksheiderskogo profilia [Overview of computer systems of geological surveying profile], available at: <https://www.docme.ru/doc/1535886/obzor-kompyuternykh-sistem-geologo-marksheiderskogo-profiilya> (accessed 09 February 2019).

17. Geotechnical & geoenvironmental software directory. Bedrock, 2014, available at: <http://www.ggsd.com/index.cfm> (accessed 06 March 2019).

18. Earth science and GIS software. Rockware, 2014, available at: <http://www.ggsd.com/index.cfm> (accessed 06 March 2019).

19. 3D modelling geology and mining, available at: [https://www.3d-geology.de/software/geology\\_and\\_mining/](https://www.3d-geology.de/software/geology_and_mining/) (accessed 22 April 2019).

20. Kataev A.V., Kutovoi S.N., Kiselev A.O., Kruglov Iu.V. Vnedrenie GIS-tekhnologii na kaliinykh rudnikakh Urala [Implementation of GIS technology in the potash mines of the Urals]. *News of the Higher Institutions. Mining Journal*, 2003, no.2, pp.111-116.

21. Kataev A.V., Kutovoi S.N. Razrabotka kontseptsii informatsionnoi sistemy OAO "Silvinit" [Development of the concept of the information system of Silvinit OJSC]. *Marksheiderskii vestnik*, 2003, no.2, pp.21.

22. Kataev A.V., Kutovoi S.N., Efimov E.M., Meister D.A. Sozdanie gorno-geologicheskoi informatsionnoi sistemy gornykh predpriatii [Creation of a mining and geological information system for mining enterprises]. *Rudnik budushchego*, 2014, no.3-4, pp.38-49.

23. Kataev A.V., Kutovoi S.N., Efimov E.M., Meister D.A. Sozdanie gorno-geologicheskoi informatsionnoi sistemy PAO "Uralkalii" [Creation mining and geological informational system in the PJSC "Uralkaliy"]. *Problemy nedropolzovaniia*, 2016, no.2, pp.26-31. DOI: 10.18454/2313-1586.2016.02.026

24. Kataev A.V., Kutovoi S.N. Razrabotka modeli geologicheskoi sredy dlia rudnikov Verkhnekamskogo mestorozhdeniia kaliinykh solei [Development of a model of the geological environment for the mines of the Verkhnekamsk potash salt deposit]. *Marksheiderskii vestnik*, 2003, no.2, pp.25-27.

25. Kataev A.V., Kutovoi S.N., Kutyrev V.F. Opyt sozdaniia GIS geologo-marksheiderskoi sluzhby [The experience of creating a GIS

geological surveying service]. *Geoprofi*, 2002, no.6, pp.5-7.

26. Kutovoi S.N. Raschet prognoznykh osedanii zemnoi poverkhnosti s ispolzovaniem integratsionnykh setok na primere otrabotki verkhnekamskogo mestorozhdeniia kaliinykh solei [Calculation of predicted subsidence of the earth's surface using integration grids for the example of working off the Verkhnekamsk potassium salt deposit]. *Izvestiia vuzov. Gornyi zhurnal*, 2012, no.7, pp.37-44.

27. Kataev A.V., Kutovoi S.N., Telitsyn A.V., Nesterov E.V., Gilev M.V. Avtomatizirovannoe rabochee mesto marksheidera na baze tsifrovyykh planov gornyykh rabot [Surveyor workstation based on digital mining plans]. *Marksheiderskii vestnik*, 2003, no.2, pp.28-31.

28. Kataev A.V., Kutovoi S.N., Telitsyn A.V., Nesterov E.V. Avtomatizatsiia marksheiderskikh vychislenii i ikh graficheskogo oformleniia na tsifrovyykh planakh gornyykh rabot [Automation of surveying calculations and their graphic design on digital mining plans]. *Nauka proizvodstvu*, 2003, no.10, pp.24-31.

29. Kataev A.V., Kutovoi S.N., Kiselev A.O., Kisluhkina S.A., Gilev M.V. Metodika sozdaniia tsifrovyykh marksheiderskikh planov dlia rudnikov Verkhnekamskogo mestorozhdeniia kaliinykh solei [Methodology for creating digital surveying plans for mines of the Verkhnekamsk potash salt deposit]. *Problemy formirovaniia i kompleksnogo osvoeniia mestorozhdenii solei. VI Solevoe soveshchanie: materialy mezhdunarodnoi konferentsii*. Solikamsk, 2000, pp.82-84.

30. Kutovoi S.N., Kataev A.V., Vasenin D.A., Efimov E.M. Work experience on automation of processing of survey measurements of backfill of mines of Uralkali PJSC. *Perm Journal of Petroleum and Mining Engineering*, 2017, vol.16, no.2, pp.174-182. DOI: 10.15593/2224-9923/2017.2.8

31. Kataev A.V., Kutovoi S.N., Efimov E.M., Gilev M.V. Ekspluatatsionnye poteri i razubozhivanie v informatsionnoi sisteme OAO "Silvinit" [Operational losses and dilution in the information system of Silvinit OJSC]. *Marksheiderskii vestnik*, 2009, no.3, pp.36-40.

32. Instruktsiia po geologicheskomu obsluzhivaniuu litsenzionnykh uchastkov verkhnekamskogo mestorozhdeniia solei PAO "Uralkalii" [Instructions for the geological maintenance of licensed areas of the Verkhnekamsk salt deposit of PJSC Uralkali]. Berezniki, 2015.

33. Kataev A.V., Kutovoi S.N. Sozdanie elementov gorno-geologicheskoi informatsionnoi sistemy gornyykh predpriatii [Creation of elements of the mining and geological information system of mining enterprises]. *Tagungsband Energie und Rohstoffe 2013 – IFM & DMV: XV Int. ISM Congress 2013*. Clausthal, Zellerfeld, Verlag Grbh, 2013, vol.1.

34. Bukrinskii V.A. Geometriia nedr [Subsoil geometry]. Moscow, Gornaia kniga, 2012, 550 p.

35. Shen Baotang, Brett Poulsen, Luo Xun, Qin Johnny, Ramesh Thiruvengkatahari, Duan Yi. Remediation and monitoring of abandoned mines. International. *Journal of Mining Science and Technology*, 2017, vol.27, iss.5, pp.803-811. DOI: 10.1016/j.ijmst.2017.07.026

36. Liang-feng Zhu, Ming-jiang Li, Changling Li, Jian-ga Shang, Bing Zhang, Xi-feng Wang. Coupled modeling between geological structure fields and property parameter fields in 3D engineering geological space. *Engineering Geology*, 2013, vol.167, pp.105-116. DOI: 10.1016/j.enggeo.2013.10.016

37. Natural resource solutions (SRK Consulting UK) Ltd, available at: <https://www.srk.co.uk/en/our-services/mining-geology-resource-estimation/uk-2d-and-3d-geological-modelling> (accessed 22 April 2019).

38. Panishev M.A. Integratsiia informatsionnykh tekhnologii v proizvodstvennyi protsess dobychi poleznykh iskopaemykh [Integration of information technology in the production process of mining]. *Zoloto i tekhnologii*, 2013, no.3 (21).

39. Griffin coal – geological modeling and resource estimation, available at: <https://www.srk.ru.com/en/newsletter/focus-coal/griffin-coal-geological-modeling-and-resource-estimation> (accessed 12 April 2019).

40. Yunsel T., Ersoy A. Geological modeling of rock type domains in the Balya (Turkey) lead-zinc deposit using plurigaussian simulation. 2013, available at: <https://www.degruyter.com/view/j/geo.2013.5.issue-1/s13533-012-0113-z/s13533-012-0113-z.xml> (accessed 12 March 2019). DOI: 10.2478/s13533-012-0113-z

41. Ivanik O.M., Shevchuk V.V., Lavrenyuk M.V., Saveliev M.V. Modeling of stress-strain state of rocks during coal deposits exploration. 2017, available at: <http://www.earthdoc.org/publication/publicationdetails/?publication=89501> (accessed 12 March 2019). DOI: 10.3997/2214-4609.201701830

42. Tolosana-Delgado R., Mueller U., Gerald van den Boogaar K. Geostatistics for compositional data: an overview/mathematical geosciences, 2019, vol.51, available at: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11004-018-9769-3> (accessed 23 April 2019). DOI: 10.1007/s11004-018-9769-3

43. Haddow D.J., Cowan E.J. Practical implicit dyke modelling – newmont boddington gold, Western Australia. AusIMM Monograph 30: in Mineral Resource and Ore Reserve Estimation – The AusIMM Guide to Good Practice, 2 ed., 2014, p. 221-228.

44. Lukichev S.V., Nagovitsyn O.V., Semenova I.E., Belogrodtshev O.V. MINEFRAME – podkhody

k resheniiu zadach proektirovaniia i planirovaniia gornyx rabot [MINEFRAME – approaches to solving the problems of design and planning of mining operations]. *Innovatsionnye napravleniia v proektirovanii gornodobyvaiushchikh predpriiatii. Sbornik nauchnykh trudov*. Saint Petersburg, 2017, pp.50-58.

45. Volkov Iu.I., Seryi S.S., Dunaev V.A., Gerasimov A.V. GIS GEOMIKS dlia gornoj promyshlennosti Rossii i Kazakhstana [GIS GEOMIX for the mining industry of Russia and Kazakhstan]. *Gornyi zhurnal*, 2015, no.5, pp.32-34. DOI: 10.17580/gzh.2015.05.02

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом:

Анализ данных для геологического моделирования толщи Верхнекамского месторождения калийно-магниевых солей / А.В. Катаев, С.Н. Кутовой, Д.А. Мейстер, Е.М. Ефимов // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Геология. Нефтегазовое и горное дело. – 2019. – Т.19, №4. – С.344–355. DOI: 10.15593/2224-9923/2019.4.4

Please cite this article in English as:

Kataev A.V., Kutovoy S.N., Meyster D.A., Efimov E.M. Analysis of data for the geological modeling strata of the VKDPS. *Perm Journal of Petroleum and Mining Engineering*, 2019, vol.19, no.4, pp.344-355. DOI: 10.15593/2224-9923/2019.4.4