



**ФОРМИРОВАНИЕ И ИСПОЛЬЗОВАНИЕ В ГЕОМОДЕЛИРОВАНИИ БАЗЫ ДАННЫХ
ГОРНЫХ ПОРОД ЭЛЬГИНСКОГО УГОЛЬНОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ**

В. Л. Гаврилов¹, Е. А. Хоютанов², Н. А. Немова¹, Р. Т. Имранов³

¹*Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, E-mail: gvlugorsk@mail.ru, nemova-nataly@mail.ru,
Красный проспект 54, г. Новосибирск 630091, Россия*

²*Институт горного дела Севера им. Н. В. Черского СО РАН, E-mail: khoiutanov@igds.ysn.ru,
проспект Ленина 43, г. Якутск 677980, Россия*

³*Карагандинский технический университет, E-mail: imranov_rus@mail.ru,
просп. Н. Назарбаева 56, г. Караганда 100027, Казахстан*

Рассмотрены подходы к формированию баз данных, аккумулирующих различные сведения о месторождениях твердых полезных ископаемых. Предложена структура базы данных горных пород Эльгинского угольного месторождения и порядок наполнения информацией составляющих ее разделов. Показано, что использование базы повышает уровень информационно-аналитического обеспечения решаемых геотехнологических задач, ориентированных на безопасное ведение горных работ и полноту извлечения запасов из недр. С помощью специализированных программ на основе базы данных различными методами построен ряд моделей залежи. Выполнен анализ устойчивости вскрышного массива угольного разреза с оценкой геомеханического состояния бортов разреза.

База данных, структура, Эльгинское месторождение, информационно-аналитическое обеспечение, горные породы, геомеханика, моделирование

**CREATION OF THE DATABASE OF ROCKS
OCCURRING AT THE ELGINSKOE COAL DEPOSIT AND ITS USE IN GEOMODELING**

V. L. Gavrilov¹, E. A. Khoiutanov², N. A. Nemova¹, and R. T. Imranov³

¹*Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences,
E-mail: gvlugorsk@mail.ru, nemova-nataly@mail.ru, Krasny pr. 54, Novosibirsk 630091, Russia*

²*Chersky Institute of Mining of the North, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences,
E-mail: khoiutanov@igds.ysn.ru, pr. Lenina 43, Yakutsk 677980, Russia*

³*Karaganda technical university, E-mail: imranov_rus@mail.ru,
pr. Nursultan Nazarbayev 56, Karaganda 100027, Kazakhstan*

The approaches to the creation of databases that accumulate various information about the deposits of solid minerals are considered. The structure of the database of rocks of the Elginskoe coal deposit and the procedure for filling with information of its constituent sections are proposed. It is shown that the database use provides the highest level of information and analytical support of the geotechnological problems focused on the safe mining and completeness of reserves extraction from the subsoil. A number of coalfield models have been built using specialized software based on the database. The stability analysis of overburden massif of the coalfield has been carried out and geomechanical conditions of open-pit sides have been evaluated.

Database, structure, the Elginskoe deposit, information and analytical support, rocks, geomechanics, modeling

В основе любых современных исследований, которые связаны с обработкой большого количества информации, измеряемой в различных шкалах, включая числовую, лежат базы данных (БД), в которых формализуются, структурируются и хранятся сведения о различных

показателях, параметрах, характеристиках, необходимых для анализа, синтеза, планирования, оценки, обоснования и принятия решений. Подходы к разработке БД разнообразны, но все они, как правило, учитывают специфику объектов и области, в которых применяются. Имеются общие черты и направленность поэтапного формирования баз данных, связанные с разработкой структуры, сбором данных, их вводом, формализацией и верификацией, использованием стремительно развивающихся технологий типа Big Data, Cloud Data Engineering, баз знаний, искусственного интеллекта, машинного обучения, кластеризации [1 – 5].

В рамках существующих и набирающих популярность концепций “Цифровое месторождение”, “Цифровой двойник” объектов недропользования или предприятий [6–8] решаются различные задачи. В их числе: создание единого информационно-аналитического пространства, учитывающего данные различного типа и возможности их оперативного и максимально полного использования при подготовке и выработке эффективных геотехнологических и организационных решений освоения минерально-сырьевых ресурсов. Важная роль в этом процессе может и должна отводиться взаимосвязям и взаимному дополнению геологии, геотехнологии, геомеханики и геоинформатики применительно к конкретным объектам освоения.

Одним из них является крупное Эльгинское угольное месторождение в Южной Якутии, обрабатываемое в сложных природно-климатических и горно-геологических условиях, которые по совокупности воздействия на геотехнологическую систему характеризуются очень сильным влиянием. Учитывая высокую цену принятия нерациональных управленческих решений, вопросу максимально полного накопления, использования имеющихся и направленного получения новых, дополняющих существующие, сведений должно уделяться повышенное внимание, в том числе путем создания и последующего обращения к специализированным базам данных.

Порядок формирования базы данных. Под базой данных в рассматриваемом контексте понимается “используемая для удовлетворения информационно-аналитических потребностей пользователей организованная и систематизированная по определенным правилам совокупность представленных в объективной форме самостоятельных материалов, характеризующих актуальное состояние некоторой предметной области” [9].

Сформированная и пополняемая БД по вскрышным породам Эльгинского угольного месторождения входит отдельным самостоятельным блоком в состав зарегистрированной в Роспатенте ранее “Базы данных первичной информации по Эльгинскому угольному месторождению” [10]. База данных расширена, дополнена новой информацией и ориентирована на информационно-аналитическую поддержку решения задач, связанных с изучением массива горных пород и полезного ископаемого, рациональным ведением вскрышных работ на сложноструктурном и неоднородном по качеству запасов месторождении. Она состоит из восьми основных разделов (“Пробы по скважинам”, “Литотипы”, “Геологические разрезы”, “Разрезы, обработанные в САПР”, “Рисунки, графики, диаграммы”, “Сведения из отчетов”, “Цифровые модели, обработанные в горно-геологических информационных системах (ГИС)”, “Прочие материалы”). Основой при формировании баз данных явились материалы геологоразведочных работ, выполненных “Южякутгеологией”, дополненные сведениями из других источников.

В первом разделе отражены данные о результатах количественного определения различных физико-механических параметров пород месторождения, полученных, в том числе, в результате опробования инженерно-геологических скважин, пройденных на месторождении в разное время. Информация о литотипах вмещающих пород учитывает все их основные виды: делювиальные, ледниковые отложения; конгломерат; гравелит; крупнозернистый, среднезернистый, мелкозернистый песчаник, алевролит; туфопесчаники; аргиллит; уголь; переслаивание алевролитов и песчаников; углистая порода. Данные занесены с геологических разрезов и стратиграфических колонок по пробуренным разведочным скважинам (более 500), на которых интер-

валы, привязанные к координатам, были отмечены согласно принятым условным обозначениям. Для ведения записей в табличном виде литотипы прокодированы с присвоением специальных символьных обозначений.

Помимо непосредственно первичных данных БД включает вновь создаваемую информацию, полученную в результате обработки исходной. В частности, на начальном этапе проведены работы по формированию плоскостных слоев на разрезах. Для этого с помощью систем автоматического проектирования интервалы на скважинах были соединены друг с другом. Следующий этап связан с построением трехмерных моделей вскрышной толщи. В силу частого “переслаивания” (ситуация, при которой одни слои чередуются с другими, осложняется тем, что такое чередование слоев может не прослеживаться на соседних скважинах в разных направлениях, плоскостях) решение задачи не является тривиальным. Ее решение может включать укрупнение, объединение слоев пород, близких по физико-механическим свойствам, в зависимости от преследуемых целей. В настоящее время для раздела БД “Цифровые модели, обработанные в ГГИС” с помощью горно-геологических информационных систем Mineframe и Micromine построен ряд блочных моделей “междупластий” — вмещающих пород, ограниченных угольными пластами и границами выходов пластов под четвертичные отложения.

Созданная база данных является основой для проведения научных исследований, компьютерного моделирования и принятия проектных и производственных решений, направленных на: повышение эффективности ведения горных работ; рациональное районирование участков месторождения по нарушенности, трещиноватости с учетом физико-механических свойств и литотипов вмещающих пород; оптимизацию параметров выполнения буровзрывных работ, экскавации, образования отвалов.

Применение сформированной базы данных при моделировании Эльгинского месторождения и оценке устойчивости массива горных пород рабочего борта разреза. Рассмотрим два примера практического использования разработанной базы данных: 1) выделение, оценка и применение схем отработки части забалансовых запасов угля; 2) геомеханическое моделирование устойчивости бортов разреза на основе информации о физико-механических свойствах пород, тектонической нарушенности породного массива, данных инженерно-геологических скважин и построенных векторных и блочных моделей вскрышной толщи.

1. Проведенный анализ первичной геолого-маркшейдерской информации и разработанных на ее основе графических материалов показал, что во вскрышных породах помимо прочего отслеживаются слои угля и углистых пород, которые по ряду причин не попали в планы подсчета запасов и никак более не учитываются. При ведении горных работ такой уголь, в том числе из кондиционных по мощности участков некондиционных пластов вывозится в отвал совместно со вскрышными породами. Полезное ископаемое при этом начинает достаточно интенсивно окисляться и самовозгораться, что может приводить к различным негативным последствиям, включая экологические. В работе [11] показаны возможные технологические решения, направленные на повышение полноты извлечения ценного минерального сырья из недр.

2. Предварительный анализ горно-геологических условий Эльгинского месторождения, выполненный с использованием табличных и графических материалов “Южякутгеологии”, “Мечел_Инжиниринга”, ОАО “Эльгауголь” и построенных с применением ГГИС Mineframe и Micromine цифровых моделей месторождения, позволил изучить характер распределения в плане, разрезе и пространстве различных типов пород, расположение зон основных тектонических нарушений. Далее с применением полученной информации был выбран типичный разрез по одному из разведочных профилей (рис. 1).

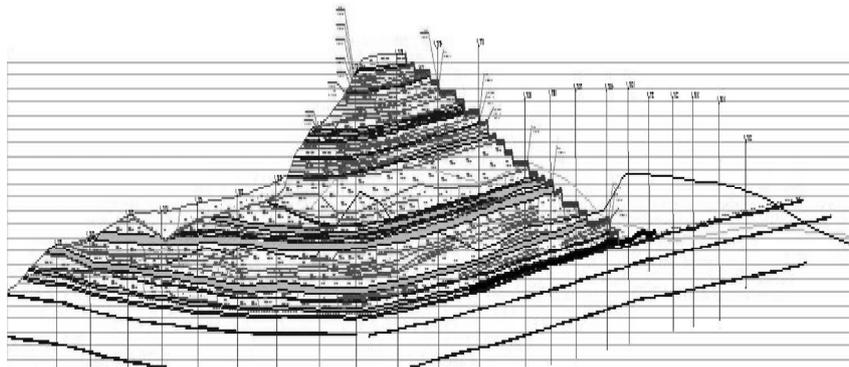


Рис 1. Разрез по разведочной линии IV-IV

На его примере с использованием созданной БД сформирован исходный массив для 2D расчета устойчивости откоса борта методом предельного равновесия (рис. 2). После определения границ массива были введены значения физико-механических свойств горных пород, составляющих массив. Для анализа оценки устойчивости массива использованы методы Бишопа и Янбу [12].

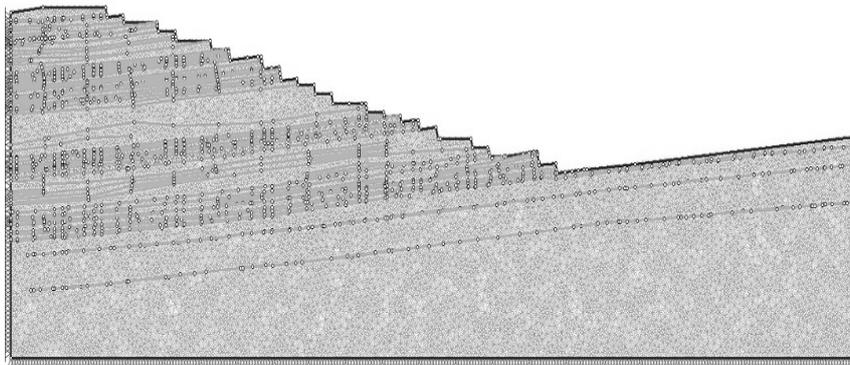


Рис. 2. Исходный массив для расчета устойчивости откоса борта разреза

Для оценки устойчивости бортов с проектными параметрами выполнены расчеты с помощью программы Slide 6.02, основанной на теории предельного равновесия по круглоцилиндрической поверхности скольжения. Текущее состояние устойчивости борта откоса определяется коэффициентом запаса устойчивости, значение которого должно быть не менее 1.30, в противном случае массив является неустойчивым. Проведен поиск критической поверхности скольжения. На рис. 3 показано пространственное расположение поверхности скольжения с наименьшим коэффициентом запаса устойчивости, равным 1.56.

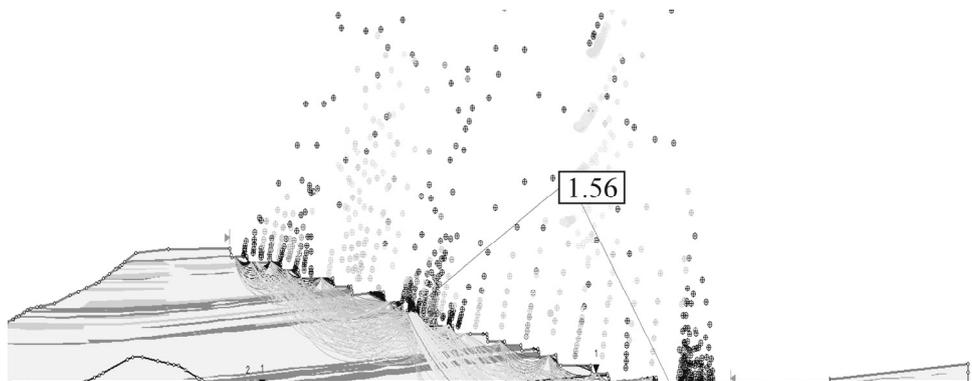


Рис. 3. Пространственное расположение поверхности скольжения с наименьшим коэффициентом запаса устойчивости, равным 1.56

Для численного моделирования методом конечных элементов напряженно-деформированного состояния массива при ведении горных работ в породах с различными механическими характеристиками использована программа Phase, в которой для моделирования массива горных пород и грунтовых слоев используются теории Мора – Кулона и Хука – Брауна (рис. 4).

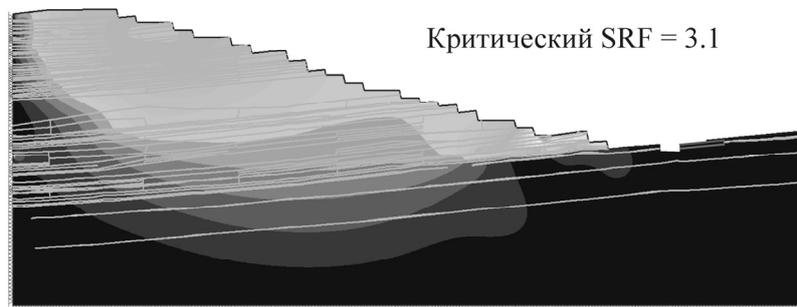


Рис 4. Напряженно-деформированное состояние массива без учета пригрузки уступов и сейсмики

Последовательность расчета напряженно-деформированного состояния массива следующая: коэффициенту устойчивости $K_{уст}$ присваивается значение $K_{уст} = 1$. В ходе расчета $K_{уст}$ увеличивается, при этом сопротивление сдвигу и деформация оцениваются на каждом этапе до наступления разрушения. Критерий разрушения модели определяется условием Кулона – Мора. Если в результате конечно-элементного расчета будет получено решение для последнего устойчивого состояния откоса, то коэффициент снижения прочности (SRF — параметр, связанный с напряженным состоянием горного массива, по мере его увеличения прочностные свойства массива уменьшаются) будет соответствовать коэффициенту устойчивости $K_{уст}$. Критический SRF эквивалентен “коэффициенту безопасности” склона. В условиях наличия вертикальных нагрузок и горизонтальных тектонических напряжений в упруго-пластичных массивах SRF может изменяться от 1 до 5 [12–17]. Поверхность скольжения при использовании метода конечных элементов формируется во время расчета. В данном случае ослабление массива произойдет, когда коэффициент снижения критической прочности достигнет показателя, равного $SRF = 3.1$ при деформации сдвига, равной 0.65 м. Расчет проводился без учета пригрузки уступов и воздействия сейсмических явлений.

Направление новых исследований — пополнение и актуализация базы данных, ввод геофизической информации о результатах изучения скважин, получение знаний для выявления закономерностей влияния исходных параметров на изменение коэффициента безопасности с учетом оценки изменений значения смещений и деформаций сдвига и смещений при учете коэффициента сейсмичности и пригрузки уступов.

ВЫВОДЫ

На основе рассмотрения и анализа современных подходов к информационно-аналитическому обеспечению горного производства и учете особенностей Эльгинского угольного месторождения предложена структура и сформирована пополняемая база данных, аккумулирующая в отдельных разделах разнообразные данные о его вскрышных породах и дополняющая зарегистрированную ранее базу данных по геологическому опробованию данного объекта недропользования. С использованием созданной базы данных и специализированного программного обеспечения построены цифровые модели ряда элементов месторождения, явившиеся наряду с первичной геолого-маркшейдерской информацией основой для выполнения анализа устойчивости уступов и рабочих бортов разреза вскрышного массива и определения его напряженно-деформированного состояния. Применение базы данных способствует повышению уровня оперативно решаемых геотехнологических задач, ориентированных на повышение безопасности ведения горных работ и рациональный уровень полноты извлечения запасов из недр.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. **Choporov O. N., Zolotukhin O. V., Manakin I. I., and Bolgov S. V.** Techniques of a knowledgebase formation for multilevel monitoring and classification-and-forecasting modeling, *Bulletin of Voronezh Institute of High Technologies*, 2015, no. 14, pp. 19–24. [**Чопоров О. Н., Золотухин О. В., Манакин И. И., Болгов С. В.** Методика формирования информационной базы данных для проведения многоуровневого мониторинга и классификационно-прогностического моделирования // *Вестник ВИВТ*. — 2015. — № 14. — С. 19–24.]
2. **Ageenko V. A. and Isakova Zh. B.** Logical-heuristic model of the database of physical properties of minerals, the state of the massif and technical and economic information, *Mining Information and Analytical Bulletin*, 2012, no. 5, pp. 360–361. [**Агеенко В. А., Исакова Ж. Б.** Логически-эвристическая модель базы данных физических свойств полезных ископаемых, состояния массива и технико-экономической информации // *ГИАБ*. — 2012. — № 5. — С. 360–361.]
3. **Gavrilov V. L. and Tkach S. M.** About digital technologies of mining enterprises in the conditions of instability, uncertainty, complexity and ambiguity, *Mining Information and Analytical Bulletin*, 2019, no. 11 (special issue 37), pp. 112–121. [**Гаврилов В. Л., Ткач С. М.** О цифровых технологиях горных предприятий в условиях нестабильности, неопределенности, сложности и неоднозначности // *ГИАБ*. — 2019. — № 11 (специальный выпуск 37). — С. 112–121.]
4. **Danilov M. V.** Creation of a corporate database of geological and geophysical information, *Proceedings of the International Symposium “Reliability and Quality”*, 2017, vol. 5, pp. 300–303. [**Данилов М. В.** Создание корпоративной базы данных геолого-геофизической информации // *Надежность и качество: труды Междунар. симпозиума*. — 2017. — Т. 1. — С. 300–303.]
5. **Shakhmatov K. L. and Gordeeva I. M.** Development of the electronic database structure for the geoinformation system of mires and peatlands in Tver region (review of literature), *Works of Instorf*, 2020, no. 21 (74), pp. 3–9. [**Шахматов К. Л., Гордеева И. М.** Разработка структуры электронной базы данных для геоинформационной системы торфяных болот и нарушенных торфяников Тверской области (обзор литературы) // *Труды Инсторфа*. — 2020. — № 21 (74). — С. 3–9.]
6. **Vlasov A. I. and Mozhchil A. F.** Technology review: from digital to intellectual field, *PROneft. Professionally about oil*, 2018, no. 3(9), pp. 68–74. [**Власов А. И., Можчи́ль А. Ф.** Обзор технологий: от цифрового к интеллектуальному месторождению // *PRОнефть. Профессионально о нефти*. — 2018 — № 3(9). — С. 68–74.]
7. **Shouping W, Xinling P., and Qinglin L.** Design and implementation of the overall architecture of the Puguang intelligent gas-field project, *Natural Gas Industry B*, 2019, vol. 6, issue 3, pp. 262–271.
8. **Redutskiy Yu.** Conceptualization of smart solutions in oil and gas industry, *Procedia Computer Science*. 2017, vol. 109, pp. 745–753.
9. **Gavrilov V. L., Khoyutanov E. A., and Petrov A. N.** Informational and analytical providing of decision support in the development of mineral resources of the north and east of Russia, *Bulletin of the Trans-Baikal State*, vol. 23, no. 4, pp. 4–12. [**Гаврилов В. Л., Хоютанов Е. А., Петров А. Н.** Информационно-аналитическое обеспечение поддержки принятия решений при освоении минеральных ресурсов Севера и Востока России // *Вестник ЗабГУ*. — 2018. — № 3(9). — С. 68–74.]
10. **Certificate.** 2014621418 RF. Database of geological sampling of the Elginskoe coal deposit, V. L. Gavrilov, A. Yu. Zakharova, E. A. Khoiutanov, *Vyull. Izobret.*, 2014, no. 11. [**Свидетельство 2014621418 РФ.** База данных по геологическому опробованию Эльгинского угольного месторождения / В. Л. Гаврилов, А. Ю. Захарова, Е. А. Хоютанов // *Опубл. в БИ*. — 2014. — № 11.]
11. **Khoyutanov E. A. and Gavrilov V. L.** Coal quality control in mining complex-structure deposits, *Journal of Mining Science*, 2019, vol. 55, no. 3, pp. 399–406. [**Хоютанов Е. А., Гаврилов В. Л.** Управление качеством добываемого угля при разработке сложноструктурных месторождений // *ФТПРПИ*. — 2019. — № 3. — С. 399–406.]

12. <https://www.roscience.com>
13. **Shpakov P. S., Dolgonosov V. N., Nagibin A. A., and Kaigorodova E. V.** Numerical modeling of the stress-strain state of an array in the vicinity of a cleaning space in the “Phase 2” program, *Mining Informational and Analytical Bulletin*, 2019, no 6, pp. 59–66. [**Шпаков П. С., Долгоносов В. Н., Нагибин А. А., Кайгородова Е. В.** Численное моделирование напряженно-деформированного состояния массива в окрестности очистного пространства в программе “Phase 2” // ГИАБ. — 2015. — № 9. — С. 59–66.]
14. **Ghannad M. A. and Jahankhah H.** Strength reduction factors considering soil-structure interaction, 13th World Conference on Earthquake Engineering, Vancouver, B. C., Canada August 1-6, 2004, Paper no. 2331.
15. **Seyed-Kolbadi S. M., Sadoghi-Yazdi J. and Hariri-Ardebili M. A.** An Improved Strength Reduction-Based Slope Stability Analysis, *Geosciences*, 2019, vol. 9, pp. 55.
16. **Hosseinitoudeshki V.** Comparison of Hock–Brown and Mohr–Coulomb criteria in the stability analysis of jointed rock slopes, *International Research Journal of Applied and Basic Sciences*, 2013, vol. 4, no. 9, pp. 2769–2774.
17. **Abolghasemzadeh M., Alizadeh Y., and Mohammadi H.** Fatigue strength reduction factors based on strain energy density applied to sharp and blunt notches under multiaxial loading // *Физическая мезомеханика*. — 2019. — № 221. — С. 92–104.