

## ИНФОРМАЦИОННАЯ СИСТЕМА ДЛЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ И ОПТИМИЗАЦИИ СХЕМ ВСКРЫТИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ БЛОКОВ

© 2021 г. М. В. Гуцул<sup>1,\*</sup>, А. Д. Истомин<sup>1</sup>, М. Д. Носков<sup>1</sup>, А. А. Чеглоков<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Северский технологический институт НИЯУ “МИФИ”, Северск, 636000, Россия

\*e-mail: vistum@rambler.ru

Поступила в редакцию 05.04.2021 г.

После доработки 12.04.2021 г.

Принята к публикации 13.04.2021 г.

Эффективность добычи урана методом скважинного подземного выщелачивания зависит от выбора схемы вскрытия на этапе проектирования эксплуатационного блока. Представлена информационная система, предназначенная для проектирования и оптимизации схем вскрытия технологических блоков полигонов подземного выщелачивания. Схемы вскрытия строятся на основе геолого-математических моделей залежей, включающих распределения эффективной мощности и продуктивности. Система позволяет осуществлять построение рядных, ячеистых и адаптивных схем вскрытия, в соответствии с заданными пользователем параметрами. Построение может выполняться в ручном или автоматическом режимах. Для созданных схем вскрытия производится расчет геотехнологических параметров эксплуатационных блоков, прогнозных геотехнологических и финансово-экономических показателей отработки для заданной степени извлечения урана. Определение параметров блоков осуществляется на основе пространственных распределений физических величин. Для расчета прогнозных геотехнологических и финансово-экономических показателей используются адекватные математические модели. После построения схемы вскрытия могут быть оптимизированы в ручном или автоматическом режиме, основанном на применении метода градиентного спуска. Оптимизация осуществляется путем поворота, перемещения или изменения размеров блока. При оптимизации могут использоваться различные целевые функции, а также их линейная комбинация. Так же система позволяет осуществлять настройку и формирование отчетной документации. Система состоит из пяти модулей, осуществляющих взаимодействие с базой проектов, базами геологических и технологических данных. Взаимодействие с базами данных осуществляется посредством SQL-запросов. Применение системы позволит автоматизировать процесс выбора наиболее эффективных схем вскрытия, повысить качество отчетной документации, увеличить точность прогнозирования.

Ключевые слова: информационные системы, подземное выщелачивание, добыча урана, оптимизация, схемы вскрытия

DOI: 10.1134/S2304487X21020036

Эффективность добычи на месторождениях урана разрабатываемых методом скважинного подземного выщелачивания (СПВ) определяется качеством проектирования схем вскрытия на начальном этапе отработки [1, 2]. Наиболее эффективная отработка обеспечивается правильно выбранным типом сети скважин. Кроме этого технологические скважины могут располагаться на разном расстоянии друг от друга. При выборе оптимальных схем вскрытия необходимо иметь возможность оперативно сравнивать параметры различных проектов эксплуатационных блоков и оценивать прогнозные показатели их отработки. Это возможно, если проектирование вскрытия залежи осуществляется с использованием специализированной информационной системы. Однако, существующие горно-геологические ин-

формационные системы (Micromine, Datamine, Gemcom, GEOVIA Surpac, Whittle, Carlson, Mineframe и др.) предназначены для традиционных подземного и открытого способов добычи полезных ископаемых и не могут быть применены при разработке месторождений урана методом СПВ [3–11].

Для решения задачи проектирования и оптимизации схем расположения скважин полигонов СПВ была разработана специализированная информационная система. Она предназначена для работы в составе интегрированного программного комплекса, осуществляющего поддержку принятия решений при добыче урана методом СПВ [12, 13]. С помощью данной системы можно создавать проекты эксплуатационных блоков на этапе подготовки отработки. В результате ее при-

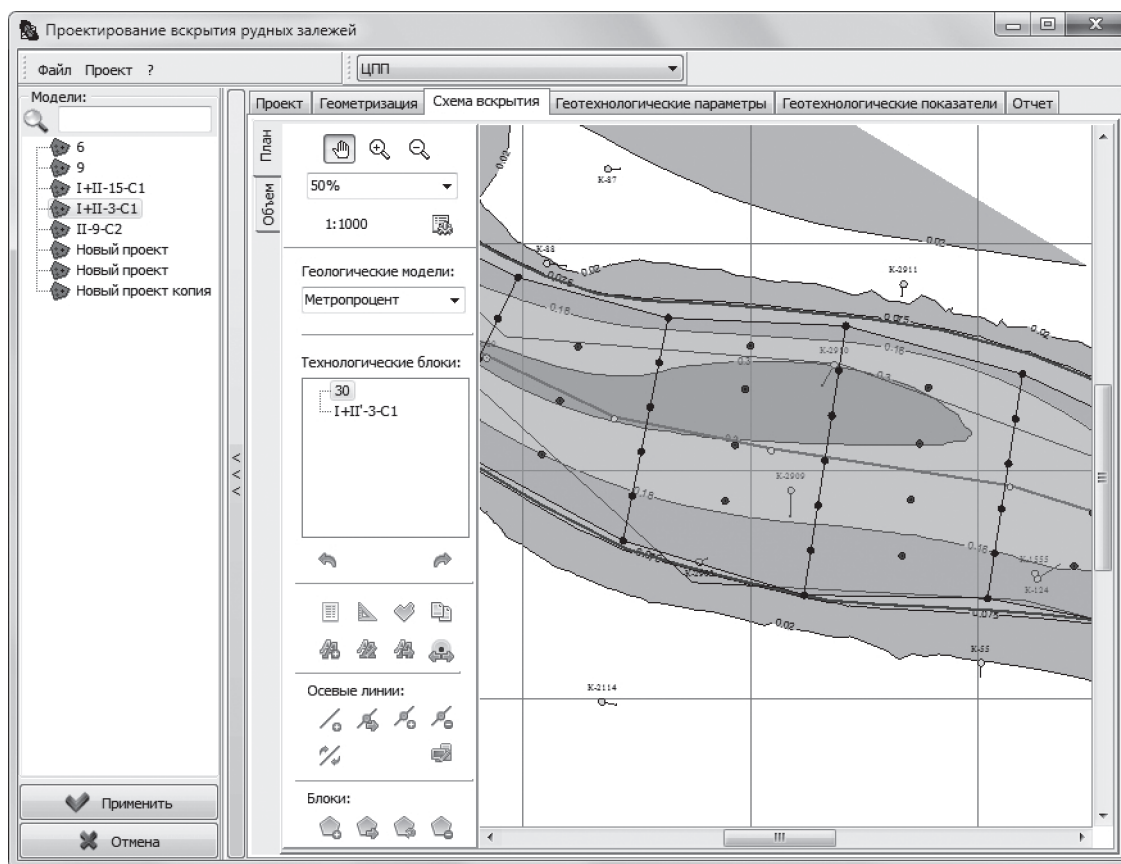


Рис. 1. Интерфейс главного окна системы.

менения можно получать данные, необходимые для сооружения скважин (координаты, объем бурения и т.д.), геотехнологические параметры эксплуатационных блоков (количество урана, мощность, горно-рудная масса и т.д.) и прогнозные показатели технологической и экономической эффективности отработки блока. Исходными данными для работы системы являются: геолого-математическая модель залежи; контура геологических подсчетных блоков; параметры технологических ячеек (расстояние между рядами, расстояние между скважинами в рядах для рядной схемы; расстояния между скважинами для ячеистой схемы); финансово-экономические параметры (стоимость сооружения технологических скважин, реагентов, электроэнергии, погружных насосов и др.); технологические параметры (концентрация кислоты в зачисляющих растворах, время службы погружных двигателей и насосов и др.); физико-химические параметры взаимодействия выщелачивающих растворов с рудовмещающей породой и минералами.

При разработке данной системы использовалась среда программирования Embarcadero RAD X3. Программный код системы написан на языке программирования C++, при этом использовал-

ся объектно-ориентированный подход. Разработанная система предназначена для применения на персональных компьютерах, с установленными операционными системами семейства Microsoft Windows 7, 8, 10. Информация необходимая для работы системы (геолого-математическая модель, настройки, параметры), а также результаты работы системы (рассчитанные параметры, показатели и т.д.) хранятся в централизованном хранилище данных интегрированного программного комплекса [12, 13]. Чтение и запись информации в хранилище осуществляется с помощью SQL-запросов на основе клиент-серверной технологии. Интерфейс главного окна системы представлен на рисунке 1.

Информационная система состоит из нескольких модулей, которые отвечают за построение геотехнологических планов, подготовку исходных данных, расчет параметров и показателей, оптимизацию схем вскрытия, подготовку информационных отчетов. Структура информационной системы представлена на рисунке 2.

Модуль подготовки исходных данных предназначен для загрузки в проект геолого-математических моделей и контуров блоков, координат устьев и забоев разведывательных скважин и уже



Рис. 2. Структурная схема системы.

имеющихся технологических скважин. Геолого-математические модели включают в себя плановые распределения физических величин, характеризующих свойства продуктивного горизонта [14]. Помимо этого модуль позволяет ввести финансово-экономические, технологические и физико-химические параметры.

Модуль построения схем вскрытия залежи позволяет генерировать схему вскрытия (координаты забоев откачных и закачных скважин). Реализовано два режима работы модуля: автоматический и ручной. В автоматическом режиме построение схем вскрытия выполняется модулем на основе разработанных алгоритмов с учетом заданных пользователем параметров. В ручном режиме построение осуществляется пользователем с помощью интерактивных инструментов.

В расчетном модуле определяются значения геотехнологических параметров, а также геотехнологических и финансово-экономических показателей отработки блока. Геотехнологические параметры блока рассчитываются на основе данных геолого-математической модели. При расчете прогнозных геотехнологических показателей используется многофакторная модель, которая позволяет прогнозировать показатели отработки блока на основе его параметров [15]. Экономические показатели отработки рассчитываются на основе экономической модели, которая описывает капитальные затраты, совершенные при со-

оружении блока, и расходы, возникающие на этапе его отработки. Рассчитанные параметры и показатели представляются в табличном и графическом виде.

Поиск оптимального расположения скважин технологического блока производится в модуле оптимизации. При этом проводится изменение схемы вскрытия, с целью получения наиболее привлекательных параметров и показателей отработки, которые автоматически пересчитываются после выполненных действий. Анализ результатов оптимизации можно осуществлять на основе графиков, таблиц, карт. При этом, для сравнения, приводятся параметры и показатели для исходной схемы и для измененной. Результаты выделяются разными цветами или линиями. Пользователь может изменять схему вскрытия с помощью инструментов редактирования, либо запустить автоматический алгоритм оптимизации. Ручной режим позволяет изменять количество скважин и их местоположение, изменять технологические ряды. В автоматическом режиме для поиска оптимальных схем вскрытия используются различные целевые функции или их линейная комбинация. Алгоритм поиска оптимума основан на методе градиентного спуска. Автоматический алгоритм может изменять расположение блока и его размеры.

Модуль подготовки отчетов позволяет производить настройку и формирование отчетной до-

кументации в виде файлов формата Microsoft Word. В зависимости от настроек отчет может включать, таблицы параметров и показателей, временные зависимости показателей отработки, карты распределения физических величин и диаграммы.

В базе технологических данных хранится вся информация о работе системы: цифровые модели проектируемых блоков, геолого-математические модели залежи, рассчитанные параметры и показатели блока, координаты технологических скважин.

Рассмотрим применение разработанной системы для построения оптимальных проектов эксплуатационных блоков. Для начала необходимо создать рабочий проект. Для каждого проекта указываются исходные данные, необходимые для расчетов параметров и показателей. Так же в проект необходимо загрузить геолого-математическую модель и координаты контура геологического блока.

На следующем этапе осуществляется построение сети вскрытия. Для этого необходимо определить область, которая планируется к вскрытию. Контур такой области может быть загружен из базы геологических данных. Так же область вскрытия может быть задана произвольно (по точкам) или может быть выделена автоматически на основе распределения метропроцента содержания урана. После этого производится расстановка технологических скважин. Пользователь может создавать произвольные схемы вскрытия, путем расстановки отдельных скважин, а также рядные или ячеистые схемы. Автоматические алгоритмы позволяют создавать рядные и ячеистые схемы вскрытия, адаптированные под контур планируемой к отработке области. Так же в информационной системе присутствуют алгоритмы позволяющие создавать схемы вскрытия адаптированные по распределению физических величин (продуктивность и эффективная мощность) в пределах разрабатываемой залежи. Эти алгоритмы обеспечивают более равномерную отработку технологического блока, сгущая скважины в области с большей продуктивностью или эффективной мощностью.

После расположения технологических скважин можно оценить эффективность построенной схемы вскрытия на основе рассчитанных прогнозных показателей отработки блока. Средние значения показателей определяются на момент достижения блоком заданной степени извлечения.

На следующем шаге производится оптимизация в ручном или автоматическом режиме построенной схемы вскрытия залежи. По завершении процедуры оптимизации проводится сравнительный анализ исходной и полученной схем

вскрытия. Если итог оптимизации не удовлетворителен, то можно запустить процесс заново, предварительно изменив параметры схемы вскрытия (тип схемы; межскважинные или межрядные расстояния) или целевую функцию, по которой проводится оптимизация и т.д.

На последнем этапе производится выбор оптимальной схемы вскрытия, который можно осуществить на основе сформированной отчетной документации, содержащей необходимую информацию по проекту. Для подготовки отчетной документации необходимо выбрать список информации, которая будет включена в итоговый документ. Это могут быть параметры, показатели блока, информация о расположении скважин, графическая и табличная информация, двухмерные распределения физических величин или топологическая информация. Отчет представляется в виде документа в формате Microsoft Word.

Использование разработанной системы на геотехнологических предприятиях по добыче урана способом СПВ позволит повысить эффективность отработки рудного тела за счет выбора наиболее эффективных схем вскрытия и повышения качества отчетной документации; автоматизировать процесс передачи данных и исключить выполняемые вручную рутинные операции; увеличить точность прогнозирования показателей отработки блоков за счет применения адекватных математических моделей.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Акимов И.Д., Бабкин А.С., Воронцова О.М. и др.* Геотехнология урана (российский опыт): монография. М.: КДУ, Университетская книга, 2017. 576 с.
2. International Atomic Energy Agency, Manual of acid in situ leach uranium mining technology // IAEA, 2001. 283 p.
3. Micromine – Exploration and 3D Mine Design Solution [Электронный ресурс]. URL: <https://www.micromine.com/micromine-mining-software> (дата обращения: 01.04.2021).
4. Underground Design and Planing – Studio UG [Электронный ресурс]. URL: <https://www.data-minesoftware.com/solutions/studio-ug-underground-design> (дата обращения: 01.04.2021).
5. *Mariko I., Mireku-Gyimah D.* Open Pit Optimisation and Design of Tabakoto Pit at AngloGold Ashanti Sadiola Mine Using Surpac and Whittle Software // Ghana Mining Journal. 2018. № 2. P. 37–47.
6. *Sahoo M.M., Pal B.K.* Geological modelling of a deposit and application using Surpac. // Journal of Mines, Metals and Fuels. 2017. № 65 (7). P. 417–422.
7. *Hernandez I.F., Ordóñez J.I., Robles P.A., Galvez E.D., Cisternas L.A.* A Methodology for Design and Operation of Heap Leaching Systems // A Methodology for Design and Operation of Heap Leaching Systems, Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review. 2017. № 38 (3). P. 180–192.

8. Васильев И.Д., Мельникова О.А. Решение прикладных горно-геологических задач с использованием программного обеспечения Gemcom // Журн. Горная промышленность. 2011. № 5 (99). С. 90–92.
9. Беляев Е.Н. Применение систем автоматизации проектирования горных работ Carlson на примере участка “Воскресенский” Иркутского месторождения песчано-гравийного сырья // Горный информационно аналитический бюллетень (Научно-технический журнал). 2018. № 527. С. 5–12.
10. Лукичев С.В., Наговицин О.В., Семенова И.Э., Белогородцев О.В. Mineframe – подходы к решению задач проектирования и планирования горных работ // Инновационные направления в проектировании горнодобывающих предприятий. Сборник научных трудов. 2017. С. 50–59.
11. Седых Г.Ю. Информационные технологии в проектировании горно-добывающих предприятий // Записки горного института. 2012. С. 70–74.
12. Истомин А.Д., Носков М.Д., Кеслер А.Г., Носкова С.Н., Чеглоков А.А. Программный комплекс для управления разработкой месторождения полезных ископаемых методом скважинного подземного выщелачивания // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2011. № 8. С. 376–381.
13. Носков М.Д., Гуцул М.В., Истомин А.Д., Кеслер А.Г., Носкова С.Н., Чеглоков А.А. Программные средства управления добычей урана методом скважинного подземного выщелачивания // Вестник национального исследовательского ядерного университета МИФИ. 2013. Т. 2. № 1. С. 95–100.
14. Истомин А.Д., Ладейщиков А.В., Носков М.Д., Чеглоков А.А. Применение геологической геоинформационной системы при проведении ГРП на инфильтрационном месторождении урана // Разведка и охрана недр. 2011. № 8. С. 6–11.
15. Сакирко Г.К., Истомин А.Д., Носков М.Д., Чеглоков А.А. Система прогнозирования геотехнологических показателей отработки эксплуатационного блока предприятия по добыче урана методом скважинного подземного выщелачивания // Известия высших учебных заведений. Физика: Изд. Национальный исследовательский Томский государственный университет. 2017. Т. 60. № 9-2. С. 98–101.

---

**Vestnik Nacional'nogo Issledovatel'skogo Yadernogo Universiteta “MIFI”, 2021, vol. 10, no. 2, pp. 162–167**

---

## Information System for Design and Optimization of Operational Block Well Patterns

M. V. Gutsul<sup>a,\*</sup>, A. D. Istomin<sup>a</sup>, M. D. Noskov<sup>a</sup>, and A. A. Cheglov<sup>a</sup>

<sup>a</sup> *Seversk Technological Institute, National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Seversk, Tomskaya oblast, 636036 Russia*

<sup>\*</sup>*e-mail: vistum@rambler.ru*

Received April 5, 2021; revised April 12, 2021; accepted April 13, 2021

**Abstract**—The efficiency of uranium mining by the in-situ leaching method depends on the opening scheme choice at the design stage of a production unit. An information system for the design and optimization of opening schemes for technological units of an underground leaching field is presented. Opening schemes are built on the basis of geological and mathematical models of deposits, including the distribution of effective capacity and productivity. The system allows the construction of in-line, cellular, and adaptive opening schemes, in accordance with the specified parameters. The construction can be performed in manual or automatic modes. For the created opening schemes, the geotechnological parameters of the operational units, the predicted geotechnological and financial and economic indicators of mining for a given degree of uranium extraction are calculated. The unit parameters are calculated on the basis of the spatial distributions of physical quantities. Adequate mathematical models are used to calculate predictive geotechnological and financial and economic indicators. The constructed opening schemes can be optimized in the manual or automatic mode based on the use of the gradient descent method. During optimization, the block can be rotated, moved, or resized. During optimization, various objective functions, as well as their linear combination, can be used. The system also allows customizing and generating the report documentation. The system consists of five modules that interact with the project base, geological, and technological databases. Interaction with the databases is carried out through SQL queries. The use of the system will allow automating the process of selecting the most effective opening schemes, improving the quality of report documents, and increasing the accuracy of forecasting.

**Keywords:** information systems, uranium mining, in situ leaching, optimization, well patterns

DOI: 10.1134/S23044487X21020036

## REFERENCES

1. Akimova I.D., Babkin A.S., Voroncova O.M. i dr., *Geotekhnologiya urana (rossijskij opyt): monografiya* [Uranium geotechnology (Russian experience): monograph], Moscow, KDU, Universitetskaya kniga, 2017, 576 p. (in Russian)
2. International Atomic Energy Agency, Manual of acid in situ leach uranium mining technology, *IAEA*, 2001, 283 p.
3. *Micromine – Exploration and 3D Mine Design Solution*, Available at: <https://www.micromine.com/micromine-mining-software/> (accessed 01.04.2021).
4. *Underground Design and Planing – Studio UG*. Available at: <https://www.dataminesoftware.com/solutions/studio-ug-underground-design/> (accessed 01.04.2021).
5. Mariko I., Mireku-Gyimah D., Open Pit Optimisation and Design of Tabakoto Pit at AngloGold Ashanti Sadiola Mine Using Surpac and Whittle Software, *Ghana Mining Journal*, 2018, no. 2, pp. 37–47.
6. Sahoo M.M., Pal B.K., Geological modelling of a deposit and application using Surpac, *Journal of Mines, Metals and Fuels*, 2017, no. 65 (7), pp. 417–422.
7. Hernandez I.F., Ordonez J.I., Robles P.A., Galvez E.D., Cisternas L.A., A Methodology for Design and Operation of Heap Leaching Systems, *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*, 2017, no. 38 (3), pp. 180–192.
8. Vasil'ev I.D., Mel'nikova O.A., Reshenie prikladnyh gorno-geologicheskikh zadach s ispol'zovaniem programmnogo obespecheniya Gemcom [Solution of applied mining and geological problems using Gemcom software], *Journal Gornaya Promyshlennost*, 2011, no. 5 (99), pp. 90–92. (in Russian)
9. Belyaev E.N. Primenenie sistem av-tomatizatsii proektirovaniya gornyh rabot Carlson na primere uchastka "Voskresenskij" Irkutnogo mestorozhdeniya peschano-gravijnogo syr'ya [Application of Carlson mining design automation systems on the example of the Voskresenskiy site of the Irkutnoye sand and gravel deposit], *Gornyj informacionno analiticheskij byulleten' (Nauchno-tehnicheskij zhurnal)*, 2018, no. 527, pp. 5–12. (in Russian)
10. Lukichev S.V., Nagovicin O.V., Semenova I.E., Belogorodcev O.V., Mineframe – podhody k resheniyu zadach proektirovaniya i planirovaniya gornyh rabot [Mineframe – approaches to solving mine design and planning problems], *Innovacionnye napravleniya v proektirovanii gornodobyvayushchih predpriyatij, Sbornik nauchnyh trudov* [Innovative directions in the design of mining enterprises. Collection of scientific papers], 2017, pp. 50–59. (in Russian)
11. Sedyh G.Yu., Informacionnye tekhnologii v proektirovanii gorno-dobyvayushchih predpriyatij [Information technology at the design of mining enterprises], *Zapiski gornogo instituta*, 2012, pp. 70–74. (in Russian)
12. Istomin A.D., Noskov M.D., Kesler A.G., Noskova S.N., Cheglov A.A., Programmnyj kompleks dlya upravleniya razrabotkoj mestorozhdeniya poleznyh iskopaemyh metodom skvazhinno podzemnogo vyshchelachivaniya [Software package for managing the development of a mineral deposit by the in-situ leaching method], *Gornyj informacionno-analiticheskij byulleten' (nauchno-tehnicheskij zhurnal)*, 2011, no. 8, pp. 376–381. (in Russian)
13. Noskov M.D., Gucul M.V., Istomin A.D., Kesler A.G., Noskova S.N., Cheglov A.A., Programmnye sredstva upravleniya dobychej urana metodom skvazhinno podzemnogo vyshchelachivaniya [Software for uranium mining management by in-situ leaching method], *Vestnik NIYaU MIFI*, 2013, vol. 2, no. 1, pp. 95–100. (in Russian)
14. Istomin A.D., Ladejshchikov A.V., Noskov M.D., Cheglov A.A., Primenenie geologicheskoy geoinformacionnoj sistemy pri provedenii GRR na infil'tracionnom mestorozhdenii urana [Application of a geological geoinformation system during geological exploration at an infiltration uranium deposit], *Razvedka i ohrananedr*, 2011, no. 8, pp. 6–11. (in Russian)
15. Sakirko G.K., Istomin A.D., Noskov M.D., Cheglov A.A., Sistema prognozirovaniya geotekhnologicheskikh pokazatelej otrabotki ekspluatacionnogo bloka predpriyatiya po dobyche urana metodom skvazhinno podzemnogo vyshchelachivaniya [System for geotechnological indicators forecasting of the operational block development of a uranium mining enterprise by the in-situ leaching method], *Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij, Fizika: Izd. NITGU*, 2017, vol. 60, no. 9-2, pp. 98–101. (in Russian)