



**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ УГЛЕДОБЫВАЮЩЕГО ПРЕДПРИЯТИЯ
НА ОСНОВЕ КОНЦЕПЦИИ “ЦИФРОВОЕ МЕСТОРОЖДЕНИЕ”**

В. Л. Гаврилов^{1,2}, Н. А. Немова¹, Е. А. Хоютанов²

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,
просп. Ленина 43, г. Якутск 677980, Республика Саха (Якутия), Россия*

Показан рост уровня неопределенности, сложности и изменчивости в работе горнопромышленного комплекса, ведущий к необходимости комплексного использования расширяющихся возможностей цифровых технологий для совершенствования бизнеса. Отмечено, что предприятия, связанные с добычей угля, находятся на более низком уровне их применения по сравнению с нефтегазовой отраслью. Рассмотрена возможность заимствования накопленного опыта для развития концепции “цифровое месторождение” и программ “индустрия 4.0”, как базиса устойчивого тактического и стратегического функционирования разрезов и шахт. Указано, что цифровизация георесурса, геотехнологий и методов управления при освоении месторождений поможет оперативному получению более полной картины производственно-сбытовых процессов, росту эффективности работы при разведке, добыче, обогащения и потреблении угля. Определена целесообразность применения результатов 3D-моделирования, оценки запасов с учетом их качества и условий залегания для более точной настройки работы предприятий под различные конкурентоспособные сценарии освоения сложных по структуре месторождений.

Уголь, “цифровое месторождение”, предприятие, освоение, управление, моделирование, эффективность

**INCREASING THE OPERATING EFFICIENCY OF A COAL MINING ENTERPRISE
BASED ON THE DIGITAL DEPOSIT CONCEPT**

V. L. Gavrilov^{1,2}, N. A. Nemova¹, and E. A. Khoutanov²

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. Lenin 43, Yakutsk 677980, Russia*

An increase in the level of uncertainty, complexity and variability in the operation of the mining industry is shown, leading to the need for an integrated use of the expanding capabilities of digital technologies to improve business. It is noted that enterprises related to coal mining are at a lower level of digital technology use compared to the oil and gas industry. The possibility of borrowing the experience accumulated here for the development of the “digital deposit” concept and the “industry 4.0” programs in relation to the coal industry, as the basis for the stable tactical and strategic functioning of mines, is considered. It is indicated that the digitalization of geo-resource, geotechnology and management methods in the development of deposits contributes to the prompt receipt of a more complete and accurate picture of production and sales processes, an increase in the efficiency of work in exploration, production, processing and consumption of coal. The expediency of using the results of 3D-modeling, assessing reserves, taking into account their refined quality and bedding conditions, for more accurate adjustment of the operation of enterprises for various competitive scenarios for the development of fields with complex structures, has been determined.

Coal, digital deposit, company, development, management, modeling, efficiency

Объективной реальностью для мирового и российского горнопромышленного комплекса становится необходимость функционирования в условиях повышающегося уровня неопределенности, изменчивости, сложности и неоднозначности [1, 2]. В такой ситуации одним из эффективных способов повышения конкурентоспособности предприятий и выпускаемой ими продукции становится комплексная цифровизация своей деятельности, начиная от стратегических целей и заканчивая текущей операционной работой. Под цифровизацией предприятия нередко продолжают понимать старые, слабо реализуемые подходы к автоматизации технологических процессов или офисных процессов посредством новых аппаратно-программных комплексов. В то же время, выполненный анализ проектов в области информационных (ИТ) и цифровых (ЦТ) технологий показывает, что достаточно широкий круг крупных и средних компаний в мире, включая горнодобывающие, разрабатывает и реализует концепции, ориентированные на максимально полное использование постоянно возрастающих возможностей современной вычислительной техники и методов обработки разнообразных данных.

Об успешности применения ИТ и ЦТ в добывающих отраслях экономики свидетельствуют следующие данные по нефтегазовому сектору, активно и повсеместно переходящему к комплексной цифровизации. Еще в 1990-х годах здесь за счет создания и использования компьютерных 3D-сейсмомоделей при освоении месторождений снижены затраты на поиск новых месторождений в среднем на 40 % с ростом объема доказанных запасов в 2.5 раза. Коэффициент извлечения нефти на “умных” месторождениях, согласно Cambridge Energy Research Associates (CERA), на 2–10 % выше, чем на традиционных, а добыча дает снижение операционных затрат на 10 %, а капитальных — до 50 %. По данным ВР (Technology Outlook, 2018) за счет технологического развития к 2050 г. снизится себестоимость добычи на 30 %, при этом до 30 % от этого сокращения расходов будет достигнуто за счет цифровизации [3].

В силу меньшей экономической значимости и возможностей отраслей, связанных с добычей твердых полезных ископаемых, эффекты от автоматизации, информатизации и роботизации здесь также ниже. Однако, для масштаба конкретных предприятий и их объединений они являются значимыми. Цифровая трансформация процессов ведения открытых горных работ, активно проводимая с начала 2000-х годов, позволила поэтапно повышать их эффективность. Например, система контроля загрузки и топлива карьерных самосвалов грузоподъемностью 55 т и выше, разработанная “ВИСТ Групп”, привела к увеличению производительности грузоперевозок на ряде карьеров на 6–8 %. Использование системы мониторинга и управления дало возможность увеличить производительность парка горных машин на 5–20 %, коэффициент технической готовности на 7–10 %, снизить издержки на эксплуатацию на 7–10 %, а нецелевое использование топлива на 15–100 %. Система высокоточной навигации привела к росту производительности буровых станков на 11–25 %, оптимизации буровзрывных работ, частичному решению многокритериальных задач управления и стабилизации качества добываемого минерального сырья и оптимизации грузоперевозок с увеличением их производительности еще на 5–10 % [4].

Более 90 % российских компаний в процессе цифровой трансформации сталкиваются с проблемами, которые не являются новыми или уникальными, но которые в изменившихся условиях приобретают новое звучание: отсутствие необходимых ресурсов и бюджета (50 % опрошенных), нехватка необходимых знаний и навыков у персонала (29 %), незрелая в целом цифровая культура (27 %) [5]. Оптимизация производственных процессов с помощью внедрения цифровых инструментов, обычно приводит к увеличению эффективности бизнеса и улучшению финансовых показателей предприятия. Следствием этого является то, что при нормальной постановке задач и технико-экономической аргументации ресурсы можно найти быстро. Два других препятствия требуют особого внимания к их преодолению, так как могут быть связаны с непо-

ниманием глубины проблемы высшим руководством компании и ее собственников, высокой трудоемкостью подготовки квалифицированных кадров и формирование из них специализированных команд, ориентированных на инновации различного характера.

В последнее время достаточно много говорят о четвертой промышленной революции (Индустрия 4.0), в рамках которой происходит объединение в едином информационном пространстве промышленного оборудования, технологий, организации, ИТ и ЦТ, позволяющее в реальном времени взаимодействовать этим элементам между собой и внешней средой с минимальным участием принимающих решения лиц.

Реализация программы “Индустрия 4.0” в угольной отрасли предполагает к реализации ряд перспективных направлений и технологий по процессам горного производства [6]. Для разведки запасов и планирования это: технологии виртуализации поисковых и разведочных работ, дистанционного зондирования земли и ее поверхности, совершенствование геоинформационных систем на основе 3D-моделирования геологической среды, соединение модельных представлений и фактической реальности, интернет интеграция пространственно-временных данных, цифровое проектирование, адаптированные пространственно-планировочные решения. Для добычи угля и подготовки запасов: эффективные физико-химические геотехнологии, безлюдная роботизированная выемка, цифровое моделирование геомеханических процессов, геодинамический и аэрологический мониторинг, интеграция ИТ систем, аналитика, системы автоматического управления, скважинная добыча, инновационные технологии разрушения горных пород, “интеллектуальное предприятие (разрез, шахта)”. Функциональная интеграция этих и других потенциальных блоков предполагается на базе систем управления для повышения точности прогнозирования и планирования основных показателей горного производства.

Важное место в обозначенном комплексе проблем и задач занимает цифровое моделирование, проектирование, планирование и текущее управление. При этом в числе базовых объектов для более тщательного изучения в интересах ресурсосберегающего, экологически сбалансированного и экономически приемлемого освоения должны стать сами месторождения во всей их возрастающей сложности, неопределенности, пространственной изменчивости и неоднозначности. А основой для подготовки и принятия последующих технологических и организационных решений выступать максимально достоверные 3D и 4D модели этих месторождений, учитывающие их природный, предельный, достижимый и инвестиционный потенциал [7].

“Цифровое месторождение” — базовый актив угледобывающего предприятия. Развитие предприятий угольной отрасли, учитывающее ориентацию на комплексную цифровизацию посредством ИТ и ЦТ, связано, с одной стороны, с самим месторождением, как объектом освоения, с другой — с формируемым на базе этого объекта технологическим пространством. Данное пространство может размещаться на разных территориях, включая удаленные друг от друга, и должно обеспечивать реализацию поставленных целей, в которых отражается влияние всех производственных звеньев, входящих в цепочки поставок угля потребителям и создающих итоговую стоимость готовой продукции. Вопросы, относящиеся к различным аспектам понятия “интеллектуальный карьер (разрез, шахта)”, внедрения здесь информационно-коммуникационных технологий, исследованы достаточно подробно [4, 6, 8] и далее будут рассматриваться только в контексте взаимоотношений с “цифровым» месторождением”.

Проводимый на протяжении многих лет анализ показывает, что более полному и достоверному изучению угольных месторождений, являющихся объектами освоения, уделяется недостаточно внимания, несмотря на существующие объективные реалии вовлечения в отработку все более сложных по строению, структуре и качеству запасов залежей. Традиционно упрощенное

понимание природы угольного месторождения ведет к различным, в первую очередь негативным последствиям при их разработке, необходимости корректировки проектной и эксплуатационной документации для более точной адаптации ранее принятых технологических решений под уточненные горно-геологические и экономические условия [7, 9–11].

В силу данного обстоятельства остановимся подробнее на опыте нефтегазовой отрасли, которая объективно и постоянно имеет дело с более сложной и неопределенной геологической средой в процессе освоения глубокозалегающих углеводородных месторождений. С начала 2000-х годов ведущие нефтегазовые компании и связанные с ними исследовательские центры активно включились в разработку широкого спектра методов информационного управления месторождениями. В настоящее время при отсутствии единого подхода на международном или внутри отдельных стран уровне технологии цифрового месторождения внедряются на стадии проектирования предприятий и далее широко используются [3, 12, 13]. Охватываются практически все процессы от поддержки принятия решений при разведке и разработке, оптимизации производства до управления бизнесом и обеспечения безопасности труда.

Технологии нового поколения управления производственными процессами предприятий, получили различные названия. “Цифровым месторождением” (Shell — Smart Field, Chevron — I-Field, BP — Field of the Future, Schlumberger — Smart Wells, Газпромнефть — Цифровое, Лукойл — Интеллектуальное и др.) называют активы, оснащенные набором систем мониторинга, удаленного контроля и программным обеспечением для ряда бизнес-процессов [12]. Определением, достаточно точно отвечающим поставленным в статье целям может быть следующее: “цифровое месторождение – эволюция и объединение технологий бурения, разведки, цифрового управления процессами и производствами добычи в сочетании с современными коммуникационными технологиями” [14], сбором и учетом геологических, геофизических, технологических, статистических, экономических и других данных, которые затем обрабатываются, анализируются и хранятся в доступном для работы виде. В условиях неоднозначности толкования рассматриваемого понятия и существующих различий в подходах к реализации подобных технологий у разных авторов сформулировано еще одно интересное определение для “цифрового месторождения” [15]: “интеллектуальное промышленное решение как подход к управлению, при котором объекты и инфраструктура создаются, рабочие процессы организуются, а операции планируются и проводятся с четко поставленными целями, при этом реализуется функция контроля для само координации компонентов системы (подразделений, объектов, оборудования, людей), что способствует достижению стоящих целей на протяжении всего жизненного цикла решения, обеспечивая тем самым устойчивость и автономность системы”.

Внедрение в теорию и практику освоения угольных месторождений подходов, формируемых и развиваемых концепцией “цифрового месторождения”, позволяет структурировать и оптимизировать работу геологоразведочных, добывающих и связанных с ними предприятий за счет создания максимально достоверных геологических, геомеханических и технологических моделей месторождений, их участков и пластов, включая различные информационные оболочки (распределение пород и полезного ископаемого разных типов в пространстве горного массива; контуры тектонических разломов, зон выветривания, окисления, различного напряженно-деформированного состояния и устойчивости горных массивов; 3D-сетки систем трещин и др.); объединения и интеграции операций (буровые и взрывные работы, экскавация и транспортирование, управление качеством и потерями сырья; управления и контроля различными сценариями разработки месторождений на всех этапах жизненного цикла проектов с целью повышения эффективности технологических и организационных процессов.

Управление в рамках “цифрового месторождения” позволяет достичь такого состояния всей системы освоения месторождений, когда факт по добыче минерального сырья в задаваемых объемах с требуемым рынком уровнем качества становится максимально близким к плану, а издержки близки к минимально допустимым. План, в свою очередь, может динамично изменяться во времени в соответствии со складывающейся конъюнктурой и условиями.

Геоинформационный анализ строения угольных месторождений предполагает широкое использование горно-геологических информационных систем. Изучение основных зарубежных и российских программных продуктов, выполненное с использованием различных источников информации, показало, что идеология построения и функционирования таких систем во многом схожа. Выбор конкретного программного обеспечения часто зависит от субъективных факторов. Имеющиеся сведения об эффективности использования того или иного продукта часто носят локальный характер и не могут быть автоматически перенесены на другое месторождение или предприятие без учета их специфики.

Авторы используют системы Mineframe и Micromine, позволяющие осуществлять с той или иной степенью детализации подготовку решений с 3D-моделированием месторождений, вариантной оценкой их запасов, планированием и оптимизацией горных работ. Собранные и изученные данные об угольных месторождениях Сибири и Дальнего Востока и связанных с ними действующих или создаваемых цепочек добычи – обогащения – потребления, выполненная оцифровка ряда месторождений способствовали постановке и решению задач, связанных с корректировкой процессов добычи угля, в том числе с неоднородными технологическими и потребительскими природными свойствами из пластов сложной структуры, управлению запасами и качеством добываемого сырья, разработке организационных и экономических мер.

Построение цифровых моделей и их последующее изучение позволили сформировать более полное представление о природном потенциале угольных пластов. На этой основе были уточнены возможности совершенствования производственно-сбытовой цепи от горнодобывающего предприятия до потребителей. Используемые подходы, полученные результаты и предложенные решения [10, 16, 17] хорошо встраиваются в концепцию “цифрового месторождения”, способствуют повышению эффективности добычи и реализации угля, дополнительно дифференцированного по потребительским свойствам. Это достигается, в том числе, путем забойной и между забойной селективной выемки, отдельного обогащения на основе уточненного марочного состава угля, уменьшения его потерь в цепочках добычи и поставок, применения рациональных организационно-экономических мер по сокращению издержек.

Принципы, заложенные в “цифровом месторождении” позволяют сделать процесс управления более прозрачным и понятным на всех уровнях. У каждого объекта недропользования имеется граница (горный отвод), определяющая область познания возможностей месторождения и их перевода в действительность. Эта граница имеет порог, характеризующий изменяющийся во времени предельный минерально-сырьевой потенциал, более точная оценка и оперативная переоценка которого в значительной степени зависит от уровня использования на предприятии ИТ и ЦТ. После ввода месторождения в эксплуатацию на фундаменте предельного выстраивается достижимый потенциал месторождения углей, зависящий от используемых технологий их добычи и обогащения, условий реализации получаемой продукции, модели управления компанией. Эта составляющая потенциала может увеличиваться или уменьшаться на основе новых знаний о месторождении и/или инноваций различного вида, использование которых более эффективно в рамках развития концепции “цифрового угольного месторождения”.

ВЫВОДЫ

Рост уровня неопределенности, сложности, неоднозначности и изменчивости внутренней и внешней среды, в которой функционируют предприятия угольного комплекса, ведет к необходимости увеличения значимости комплексного использования расширяющихся возможностей информационных и цифровых технологий для совершенствования различных бизнес-процессов. Накопленный в более передовой нефтегазовой отрасли опыт применения концепции “цифрового месторождения” целесообразно более широко использовать на предприятиях, входящих в цепочки разведки, добычи, обогащения и потреблении угля.

Постоянно возрастающее вовлечение в обработку более сложных объектов в экстремальных регионах приводит к негативным последствиям при их освоении в результате традиционно более упрощенного по сравнению с нефтегазовыми и рудными месторождениями понимания природы угольных залежей. Это выражается в нерациональном использовании минерально-сырьевого потенциала, высоких суммарных потерях по количеству добываемого и реализуемого угля и, что более важно, по качеству в цепочках его добычи и поставок.

Непрерывное изменение в процессе работы разрезов, шахт и связанных с ними обогатительных фабрик природно-климатических, горно-геологических, технологических и экономических условий требует оперативного реагирования на различные сценарии развития событий для принятия конкурентоспособных управленческих решений. Более точная и оперативная адаптация угольных предприятий достигается путем максимально широкого и, что важнее, корректного применения рассмотренных базовых положений “цифрового месторождения”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. **Islamov S. R.** The future of coal: in search of a new paradigm, *Coal*, 2018, no. 9, pp. 26–32. [**Исламов С. Р.** Будущее угля: в поисках новой парадигмы // Уголь. — 2018. — № 9. — С. 26–32.]
2. **Gavrilov V. L. and Tkach S. M.** About digital technologies of mining enterprises in the conditions of instability, uncertainty, complexity and ambiguity, *Mining informational and analytical Bulletin*, 2019, no. 11 (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 (37). — С. 112–121.]
3. **Orlov S.** Digital technologies in the oil industry [**Орлов С.** Цифровые технологии в нефтяной отрасли. <https://www.gazprom-neft.ru/press-center/sibneft-online/archive/2019-july-august/3406688>.]
4. **Klebanov A. F.** Automation and robotization of open mining: experience in digital transformation, *Russian Mining Industry Journal*, 2020, no. 1, pp. 8–11. [**Клебанов А. Ф.** Автоматизация и роботизация открытых горных работ: опыт цифровой трансформации // Горная промышленность. — 2020. — № 1. — С. 8–11.]
5. **Timofeev K.** Digital transformation in Russian conditions, *Control Engineering Russia*, 2019, no. 3, pp. 61–63. [**Тимофеев К.** Цифровая трансформация в российских условиях // *Control Engineering Russia*. — 2019. — № 3. — С. 61–63.]
6. **Plakitkin Yu. A. and Plakitkina L. S.** Digitalization of the economy of the coal industry of Russia from Industry-4.0 to Society 5.0, *Russian Mining Industry Journal*, 2018, no.4, pp. 22–30. [**Плаkitкин Ю. А., Плаkitкина Л. С.** Цифровизация экономики угольной промышленности России — от “Индустрия-4.0” до “Общества 5.0” // Горная промышленность. — 2018. — № 4. — С. 22–30.]
7. **Freidina E. V., Botvinnik A. A., and Dvornikova A. N.** Systematic management of coal quality in open-pit mining in Siberia, *Novosibirsk: Science*, 2019, 264 pp. (in Russian) [**Фрейдина Е. В., Ботвинник А. А., Дворникова А. Н.** Системное управление качеством углей при открытой разработке месторождений Сибири. — Новосибирск: Наука, 2019. — 264 с.]

8. **Lisenkov A. A., Kuandykov A. A., Bukeikhanova S. S., and Lysenko S. B.** Intellectualization of design systems, management and functioning of mining production, *Russian Mining Industry Journal*, 2017, no. 6, pp. 88–91. [Лисенков А. А., Куандыков А. А., Букейханова С. С., Лысенко С. Б. Интеллектуализация систем проектирования, управления и функционирования горного производства // Горная промышленность. — 2017. — № 6. — С. 88–91.]
9. **Sidorova G. P. and Ovseichuk V. A.** Determination of specific effective activity in coals, *Mining informational and analytical Bulletin*, 2016, no. 8, pp. 369–378 [Сидорова Г. П., Овсейчук В. А. Определение удельной эффективной активности в углях // ГИАБ. — 2016. — № 8. — С. 69–378.]
10. **Batugin S. A., Gavrilov V. L., and Khoyutanov E. A.** Geotechnical approaches to coal ash content control in mining of complex structure deposits, *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2017, 53(1), 012015.
11. **Shaklein S. V. and Pisarenko M. V.** Development of recommendations for a comprehensive assessment of the readiness of coal deposits for rational industrial development, *Fundamental and Applied Mining Science*, 2018, vol. 5, no.1, pp. 160–163. [Шаклеин С. В., Писаренко М. В. Разработка рекомендаций по комплексной оценке подготовленности угольных месторождений к рациональному промышленному освоению // Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. — 2018. — Т. 5. — № 1. — С. 160–163.]
12. **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., Можчиль А. Ф. Обзор технологий: от цифрового к интеллектуальному месторождению // PROneft. Профессионально о нефти. — 2018 — № 3(9). — С. 68–74.]
13. **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.
14. **Digital field: Toro's intelligent control system. PSS platform** [Цифровое месторождение: интеллектуальная система управления Торо. Платформа ПСС // <http://itpss.ru/docs/pos-materials/201710-Digital-Oilfield-Design-and-Implementation.pdf>.
15. **Redutskiy Yu.** Conceptualization of smart solutions in oil and gas industry, *Procedia Computer Science*. 2017, vol. 109, pp. 745–753.
16. **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. 62–72.]
17. **Fedorov V. I., Khoyutanov E. A., Gavrilov V. L., and Batugina N. S.** Geoinformation support for exploitation of coal deposits in north Yakutia, *International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM*, 2018, 18 (2.2), pp. 195–202.