

УДК 004.896

DOI 10.17513/snt.40319

## ПОСТРОЕНИЕ МОДЕЛЕЙ ПОДСИСТЕМЫ ПРЕДИКТИВНОЙ АНАЛИТИКИ ПРИ АВТОМАТИЗИРОВАННОМ УПРАВЛЕНИИ ОБОГАТИТЕЛЬНОЙ ФАБРИКОЙ ГОРНО-ОБРАБАТЫВАЮЩЕГО КОМБИНАТА

**Ивашук О.А., Гзогян С.Р., Гончаров Д.В., Маматов А.В.**

*ФГАОУ «Белгородский государственный национальный исследовательский университет»,  
Белгород, e-mail: goncharov\_dv@bsuedu.ru*

До сих пор неполно освещены вопросы прогнозирования эффективности работы оборудования обогатительных фабрик как одного из основных подразделений по переработке добытого полезного ископаемого на горно-обогатительном комбинате при реализации технологических процессов измельчения руды; приведенные оценки являются в основном приближенными и характеризуются низким уровнем достоверности. Целью данной работы является разработка моделей для построения прототипов подсистемы, которая поспособствует повышению эффективности работы измельчительного оборудования и фабрики в целом за счет гибкого и оперативного планирования производственных затрат. Проведенный анализ указывает на актуальность в данном аспекте методов предиктивной аналитики, обеспечивающих установление научно обоснованных обратных связей, актуализацию выработки управляющих решений в сфере планирования производства на основе высокоточных модельных оценок и прогнозирования результатов производственных операций и процессов с учетом изменений широкого спектра технологических параметров. Представлены концептуальная теоретико-множественная и схематичные функциональные модели исследуемой подсистемы, которые позволили выявить, детализировать и изучить ее функции и реализующие их компоненты, параметры состояния этих компонентов, механизмы их взаимодействия между собой, внешней средой и другими подсистемами, вовлеченными в процесс автоматизации производственного процесса. Разработка и внедрение подсистемы предиктивной аналитики позволят реализовать высокоточные модельные оценки показателей работы оборудования в режиме онлайн и, что крайне важно, их прогнозирование при переходе к сырью с другими характеристиками, а также при изменении технологических параметров. В данной работе были представлены результаты разработки и исследования моделей подсистемы предиктивной аналитики в составе интегрирующего уровня при автоматизированном управлении обогатительной фабрикой горно-обработывающего комбината.

**Ключевые слова:** автоматизация, подсистема предиктивной аналитики, моделирование, оценка и прогнозирование, обогатительная фабрика

## CREATING MODELS OF PREDICTIVE ANALYTICS SUBSYSTEM AT AUTOMATED CONTROL OF THE ENRICHMENT FACTORY OF A MINING AND PROCESSING COMPLEX

**Ivashchuk O.A., Gzogyan S.R., Goncharov D.V., Mamatov A.V.**

*Belgorod State National Research University, Belgorod,  
e-mail: goncharov\_dv@bsu.edu.ru*

The issues of forecasting the efficiency of the equipment of processing plants, as one of the main divisions for processing extracted minerals at a mining and processing plant during the implementation of technological processes for crushing ore, have not yet been fully covered; the estimates given are mostly approximate and are characterized by a low level of reliability. The purpose of this work is to develop models for prototyping a subsystem that will contribute to improving the efficiency of the shredding equipment and the factory as a whole through flexible and operational planning of production costs. The conducted analysis indicates the relevance in this aspect of predictive analytics methods that ensure the establishment of scientifically sound feedback, the actualization of management decisions in the field of production planning based on high-precision model estimates and forecasting the results of production operations and processes, taking into account changes in a wide range of technological parameters. The conceptual set-theoretical and schematic functional models of the subsystem under study are presented, which made it possible to identify, detail and study its functions and their components, the state parameters of these components, the mechanisms of their interaction with each other, the external environment and other subsystems involved in the automation of the production process. The development and implementation of the predictive analytics subsystem will make it possible to implement high-precision model estimates of equipment performance online, and, most importantly, their prediction during the transition to raw materials with different characteristics, as well as when technological parameters change. In this paper, the results of the development and research of models of the predictive analytics subsystem as part of the integration layer in the automated control of the processing plant of the mining and processing plant were presented.

**Keywords:** automatization, predictive analytics subsystem, modelling, assessment and forecasting, enrichment factory

### Введение

Современная обогатительная фабрика (ОФ) как одно из основных подразделений по переработке добытого полезного ископаемого на горно-обогатительном комбинате (ГОК) представляет собой сложную организационно-технологическую систему, в которой реализуется множество процессов и потоков разнородных данных. При этом краугольным камнем обработки рудных ископаемых на ОФ являются технологические процессы измельчения руды, которые определяют результат отделения рудных зерен от пустой породы, позволяют значительно облегчить процесс обогащения и повысить его коэффициент полезного действия, а также качество выпускаемого концентрата в целом [1–3]. Это не только наиболее важный, но и наиболее дорогостоящий технологический процесс: на него приходится около 50% от всех производственных затрат.

Таким образом, повышение эффективности функционирования ОФ в значительной мере связано с оптимизацией технологических режимов работы измельчительно-оборудования при подготовке производства. При этом задача их настройки является сложной и многокритериальной: сырье, поступающее на ОФ, имеет широкий диапазон параметров качества, а на выходе получаемый концентрат должен иметь строго заданные параметры. Параметры технологического процесса нелинейно изменяются в постоянной взаимосвязи, являются трудно контролируемыми [4–6]. Оператор далеко не всегда может оперативно реагировать на изменения всех переменных целевой функции, что негативно влияет на результат управления как отдельными технологическими операциями, так и производством в целом [7]. Поэтому именно процессу измельчения посвящено много разработок в сфере поиска эффективных методов автоматизации и управления.

Внедрение технологий автоматизированного управления сложными технологическими процессами и операциями, реализуемыми в рамках функционирования различных промышленно-территориальных кластеров, в том числе и горнодобывающих, связано и происходило одновременно с развитием методов компьютерной обработки данных, в отечественной практике началось с 1970–1980-х гг. [8]. Данное направление постоянно совершенствуется и является движущей силой для модернизации самих подходов к сбору и обработке данных, а также к созданию новых технологий для решения задач предиктивной аналитики в сфе-

ре горно-обогатительного производства, как показано, например, в работах [9–11]. Различными производителями эффективно используются технологические разработки зарубежных и отечественных производителей цифровых решений: Siemens – продукт PCS7 APL, Германия; Rockwell – продукты Pavilion8PlantPAx MPC, США; Emerson – продукт DeltaV PredictPro, США; Honeywell – продукт Profit Suite, США; Yokogawa/Shell – продукт PACE, Япония; ABB – Ability Expert Optimizer, Швейцария; Mintek – StarCS, Китай; ГК «Цифра», «Про-софт-системы», «Атомик софт», «ИнфТех», «Лаборатория Касперского», «Объединение Агрегейт», «Диатех», РФ, и иные продукты [12–14].

Однако следует отметить, что при широком спектре научных и практических разработок до сих пор неполно освещены вопросы прогнозирования эффективности работы оборудования ОФ при реализации технологических процессов измельчения руды; приведенные оценки являются в основном приближенными и характеризуются низким уровнем достоверности. В связи с вышесказанным сегодня крайне актуальны создание и внедрение на ОФ современных ГОКов новых методологических инструментов для построения и организации взаимодействия автоматизированных систем управления технологическими процессами (АСУТП) и производством (АСУП) с актуализацией оценки и прогнозирования эффективности работы технологического оборудования ОФ для оперативной корректировки его технологических режимов, что может существенно приблизить процессы обогащения к устойчивой производительности качественного продукта на выходе с минимизацией влияния человеческого фактора.

**Цель исследования** – разработка моделей для построения прототипа подсистемы предиктивной аналитики при автоматизированном управлении ОФ ГОК.

### Материалы и методы исследования

Проведенный анализ развития методов и моделей, используемых при обеспечении функционала АСУТП и АСУП на ОФ, показывает необходимость их дальнейшего развития в целях модернизации и расширения спектра интеллектуальных функций указанных автоматизированных систем, которые позволят проводить ситуационные оценки как текущей, так и прогнозной производственно-технологической ситуации на ОФ, оперативно и адекватно регулировать параметры измельчения руды, влияющие на результирующую производительность как отдельных технических секций, так и ОФ в це-

лом. Это подтверждено и количественными оценками. Например, метод автоматизированного управления измельчением, предложенный фирмой «Xstrata Nickel» для профильного завода «Strathcona», позволил повысить энергетическую эффективность используемых мельниц на 5,5–7,1% [15], а в работе [16] рассмотрено решение задачи повышения маржинальной прибыли ОФ на основе применения оптимизационной модели управления.

Процессы автоматизированного управления на предприятиях ГОК России, в частности в сфере обогащения железной руды и формирования концентрата, на протяже-

нии нескольких десятилетий структурируются согласно трехуровневому принципу управления технологическими секциями (ТС) (рис. 1), согласно которому для АСУТП выделяют следующие основные уровни автоматизированного управления: нижний (полевой) уровень (приборы, датчики, различные устройства и др.); средний (программируемые логические контроллеры (ПЛК), устройства связи с объектом (УСО), сетевые коммуникации между ПЛК и УСО); верхний (операторская/диспетчерская), который представляет собой систему визуализации (серверные и рабочие станции) и ее сетевые коммуникации.

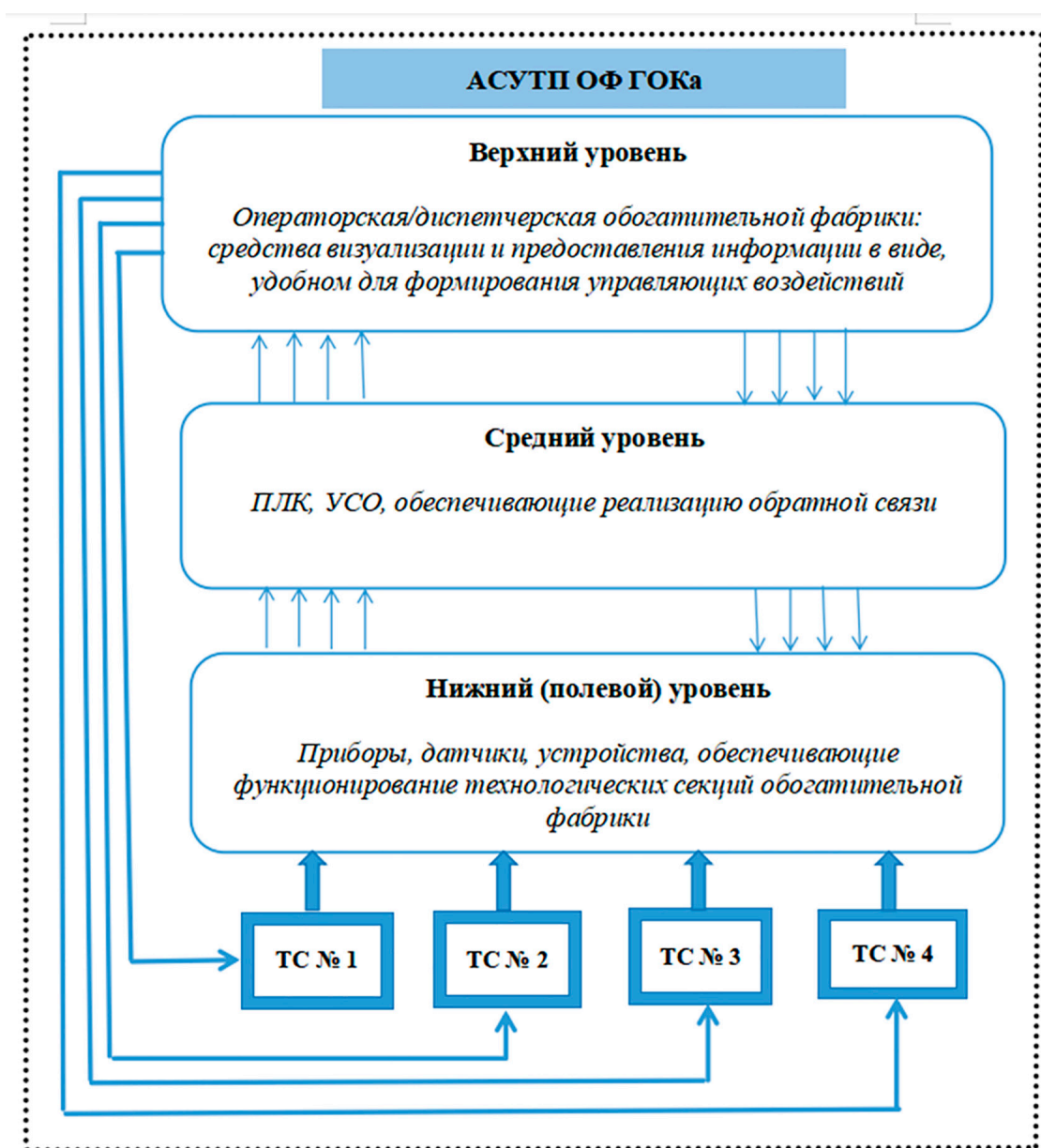


Рис. 1. Трехуровневая структура автоматизации управления технологическими секциями ОФ на ГОК  
Источник: составлено авторами на основе [2]

Информация от приборного оснащения, функционирующего на нижнем уровне, поступает на ПЛК. Здесь реализуется процесс обратной связи, при котором происходят трансформация информации в управляющие воздействия и возвращение на исполнительные устройства. Таким способом замыкаются контуры автоматического управления, при этом информация о параметрах данного технологического процесса поступает на верхний уровень АСУТП. Предполагается обеспечение движения информационных потоков как в нисходящем, так и в восходящем направлениях.

Следует отметить, что АСУТП, в свою очередь, представляет собой нижний уровень в общей системе АСУП, где верхний уровень включает подсистемы ОФ, обеспечивающие во взаимодействии ее процессы планирования, финансового регулирования, учета производства, регулирования энергетического, материально-технического, ремонтного видов обеспечения, а также процессы заказов и сбыта готовой продукции, управления кадровыми ресурсами и т.п. В результате функционирования всех указанных подсистем вырабатываются управляющие воздействия на нижний уровень – уровень АСУТП – в форме определенных планов, заданий, регламентов. Результативность подобных управляющих воздействий определяется уровнем их научной обоснованности и непосредственно связана с той информацией, которая передавалась от всех уровней АСУТП. Выделим основные проблемы, которые возникают в данном аспекте: уровень достоверности информации (часто это связано с человеческим фактором и отсутствием уровней прогнозирования производственной ситуации); наличие и использование инструментария трансформации первичной оперативной информации в стратегические управленческие решения.

Современные специалисты в различных областях экономики сходятся во мнении о необходимости разработок и внедрении промежуточного интегрирующего уровня и создании интегрированных автоматизированных систем управления производством для интеграции различных подсистем АСУТП и АСУП, создания единого информационного пространства в целях объективной и оперативной оценки текущей и прогнозной ситуации при реализации производственных процессов, принятия оптимальных управленческих решений и реализации результативных управляющих воздействий [17]. В научных работах отмечается, что подобный уровень служит связующим мостом для разнородных потоков

информации в АСУТП и АСУП. Основными функциями исследуемого интегрирующего уровня являются: сбор и унификация технологической информации от различных АСУТП предприятия и других источников, ее анализ и хранение; обеспечение оперативного доступа; представление информации в едином формате; поддержка каналов обмена информацией. Далее именно эта информация используется верхним уровнем АСУП при осуществлении финансово-хозяйственных операций, планировании и оптимизации производственных ресурсов [16].

Развитие современных цифровых технологий, прежде всего искусственного интеллекта, позволяет актуализировать данный интегрирующий уровень путем изменения его структуры и введения специализированных подсистем, решающих задачи оценки и прогнозирования эффективности производственных процессов и работы оборудования, предприятия в целом. В целях определения структуры подсистемы предиктивной аналитики (ППА) и организации ее эффективного функционирования авторами проведено моделирование данной подсистемы, а именно построение концептуальной и функциональной моделей системы. Для построения концептуальной модели выбрано теоретико-множественное описание, что позволит указать все компоненты ППА и параметры их состояния, внешние параметры, а также выявить и детализировать необходимые причинно-следственные связи в целях разработки моделей, решающих задачи трансформации информации, получаемой от АСУТП, в управляющие воздействия, реализуемые верхним уровнем АСУП.

Для построения проектов функциональных моделей выбрано использование методологии функционального моделирования IDEF0 (инструментарий BPWIN), что позволяет описать и детализировать функции системы, обосновать механизмы их взаимодействия, реализации и управления ими.

#### **Результаты исследования и их обсуждение**

На рисунке 2 представлена обобщенная схема предлагаемой авторами структуры взаимодействия АСУТП и АСУП при исследовании процессов управления производством на ОФ современных ГОК с включением в интегрирующий уровень специализированной подсистемы – ППА, реализующей трансформацию реальной или планируемой производственной информации для выработки результативных мероприятий по планированию ресурсов на принципах ресурсосбережения и энергоэффективности.

Выявление особого значения влияния на эффективность ОФ ТС измельчения и, соответственно, производительности измельчительного оборудования (валковых мельниц) позволяет определить приоритетной подзадачу обеспечения лиц, принимающих решения по стратегическому планированию и управлению все-

ми ресурсами предприятия, информацией по объективной оценке производственной ситуации в аспекте измельчения железной руды, адекватному прогнозированию изменения ситуации при переходе к другим пластам руды или при изменении технологических требований, экологических норм и т.п.



Рис. 2. Обобщенная схема интегрированной системы управления ОФ ГОК (взаимодействие АСУТП и АСУП) с включенной ППА  
Источник: составлено авторами на основе [4]

Проведенный анализ дает возможность выделить следующее множество функций ППА,  $F = \{F_1, F_2, F_3, F_4, F_5, F_6, F_7, F_8\}$ : автоматизированный сбор производственной информации в режиме реального времени (значений параметров технологических процессов измельчения) посредством интерфейсов к функционирующей АСУТП ( $F_1$ ); первичный перевод производственных данных в форму, пригодную для проведения анализа ( $F_2$ ); хранение данных на носителях электронной информации ( $F_3$ ); обеспечение доступа к данным (пользователям – посредством клиентских приложений; другим автоматизированным подсистемам – посредством интерфейса прикладного программирования), ( $F_4$ ); анализ данных на основе как традиционных, так и специально разработанных методов для обеспечения возможности формирования объективных обучающих и тестовых выборок в целях разработки адекватных моделей оценивания и прогнозирования производительности измельчительного оборудования, ( $F_5$ ); разработка новых, а также корректировка используемых моделей предиктивной аналитики, ( $F_6$ ); проведение модельной оценки эффективности работы измельчительного оборудования ОФ в режиме реального времени, влияющей на производительность фабрики в целом (модельная оценка текущей производительности валковых мельниц), ( $F_7$ ); анализ прогнозной производительности валковых мельниц при переходе на пласт руды, который имеет существенные различия по гранулометрическому и химическому составу, а также при изменении технологических, экологических требований, и др. ( $F_8$ ). Каждая из функций  $F$  может быть детализирована в зависимости от конкретных задач и особенностей технологических процессов и секций.

В качестве концептуальной модели исследуемой ППА интегрирующего уровня автоматизированного управления ОФ введем кортеж:

$$IDSS = S, TP, Y, \Omega, Met, Mod, Q, \quad (1)$$

где  $S$  – множество выделенных подсистем и элементов в структуре исследуемой ППА (общей численностью  $N$ ) в составе интегрирующего уровня автоматизированного управления ОФ ГОК, реализующих основные выявленные функции  $F$  системы в рамках приоритетного влияния технологических процессов измельчения на результирующую производительность ОФ в целом:  $S = \{S_1, \dots, S_n\}$ , где  $n = \overline{1, N}$ ;  $TP$  – информация о технологических параметрах производ-

ственных секций измельчения железной руды, определяющих качество помола и результирующего концентрата:  $TP = \{TP_1, \dots, TP_j, \dots, TP_J\}$ , где  $j = \overline{1, J}$  (планируемые технологические параметры будем обозначать  $\widetilde{TP}$ );  $Y$  – исследуемые выходные производственные параметры, определенные как критерии качества концентрата и/или работы измельчительного оборудования, эффективности работы ОФ в целом. Обеспечение возможности объективной оценки влияния различных параметров множества  $TP$  на результат  $Y$ ; возможности прогнозирования значений (областей значений)  $Y$  при изменении отдельных/(некоторой группы)/всех технологических параметров процесса измельчения (например, при переходе к другому пласту руды, или при изменениях требований заказчика, или замене оборудования и т.п.); возможности определения значений для корректировки параметров и регулирования самого технологического процесса для получения требуемых значений  $Y$  связаны с необходимостью построения и внедрения специализированных математических моделей. Определим в данной работе  $Y = \langle \text{Произв.} \rangle$  – производительность головных мельниц в режиме реального времени, т/ч, а  $\check{Y}$  – прогнозная производительность при изменении качественных и количественных характеристик сырья и/или других  $TP$ , а также при изменении требований, нормативно-правовых характеристик и т.п.

Далее отметим для модели (1):  $\Omega$  – множество внешних регулирующих технологический процесс параметров: заказы, регламенты, нормативные документы, ограничения, требования и иное:  $\Omega = \{\Omega_1, \dots, \Omega_k, \dots, \Omega_K\}$ ,  $k = \overline{1, K}$ , где  $K$  – общая размерность вектора внешних воздействий.

Следует отметить, что достаточно широкий спектр параметров и различный формат получения и первичной обработки данных свидетельствуют о необходимости проведения их комплексного анализа на основе синтезированного применения различных методов обработки данных, в том числе интеллектуальных, которые позволяют работать с любым множеством данных, включая неполные и слабоформализуемые. В связи с этим особое внимание заострим на  $Met$  – множестве методов, которые обеспечивают реализацию функций подсистем, связанных с обработкой информации. Выделим его основные подмножества:  $Met = \{Met_1, \dots, Met_i, \dots, Met_I\}$ ,  $i = \overline{1, I}$ , где  $I$  – общая размерность используемых в  $S_n$  методов для решения поставленных задач: – методы проведения первичной обработки производственных данных  $Met: \widetilde{Met}, \subset Met;$

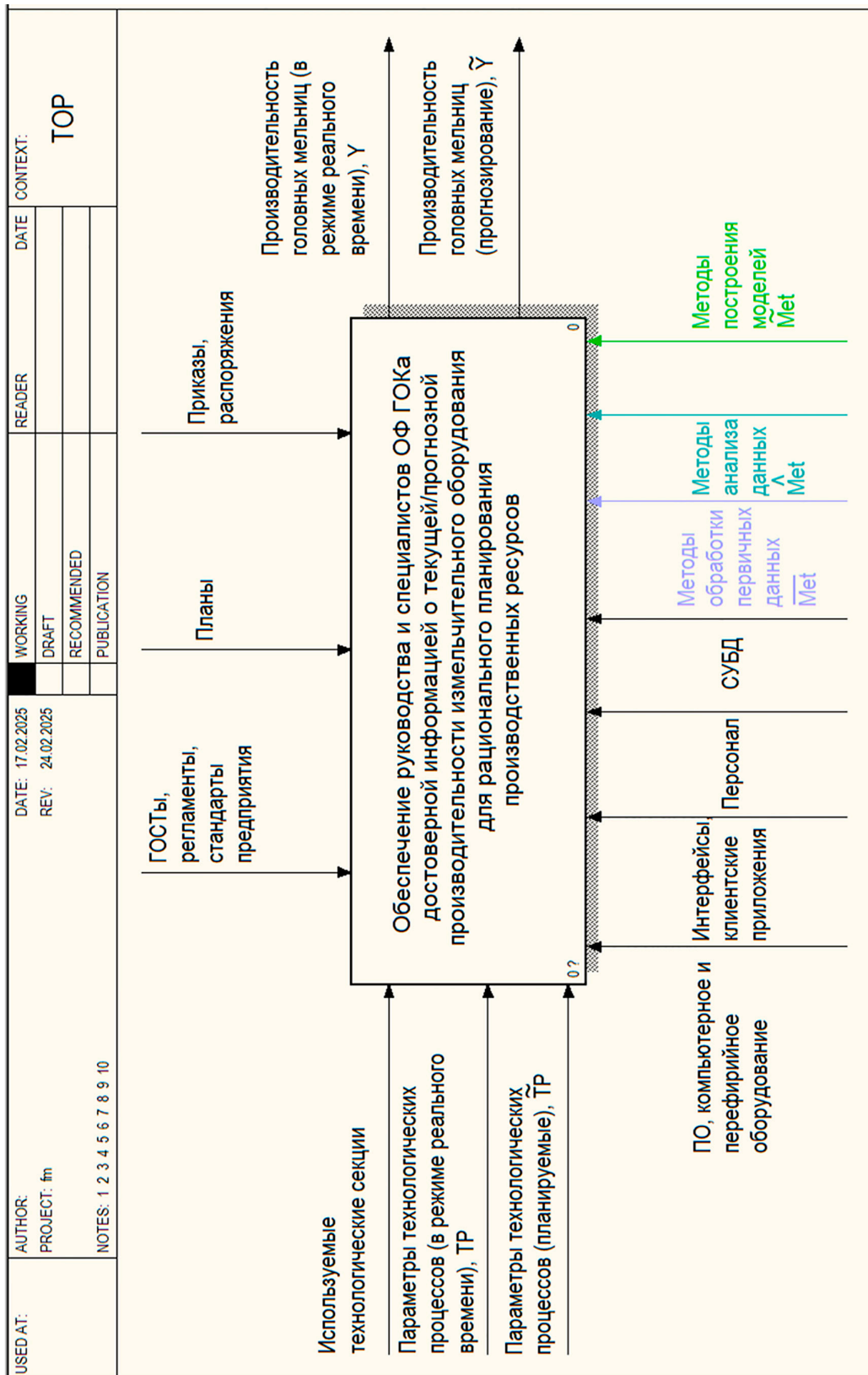


Рис. 3. Контекстная диаграмма функциональной модели ППА  
Источник: составлено авторами на основе [17]

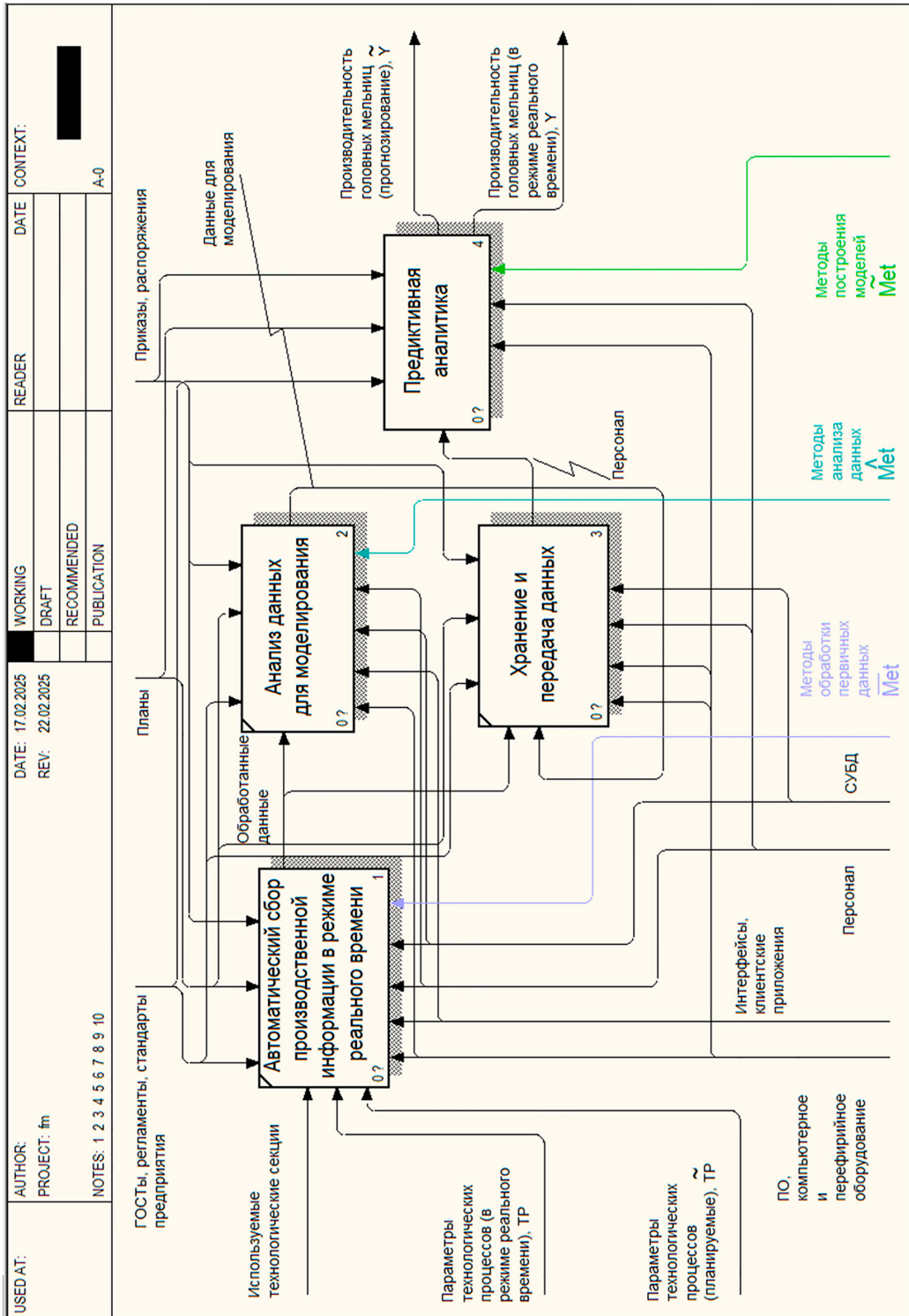


Рис. 4. Детализация функциональной модели ППА  
 Источник: составлено авторами на основе [17]



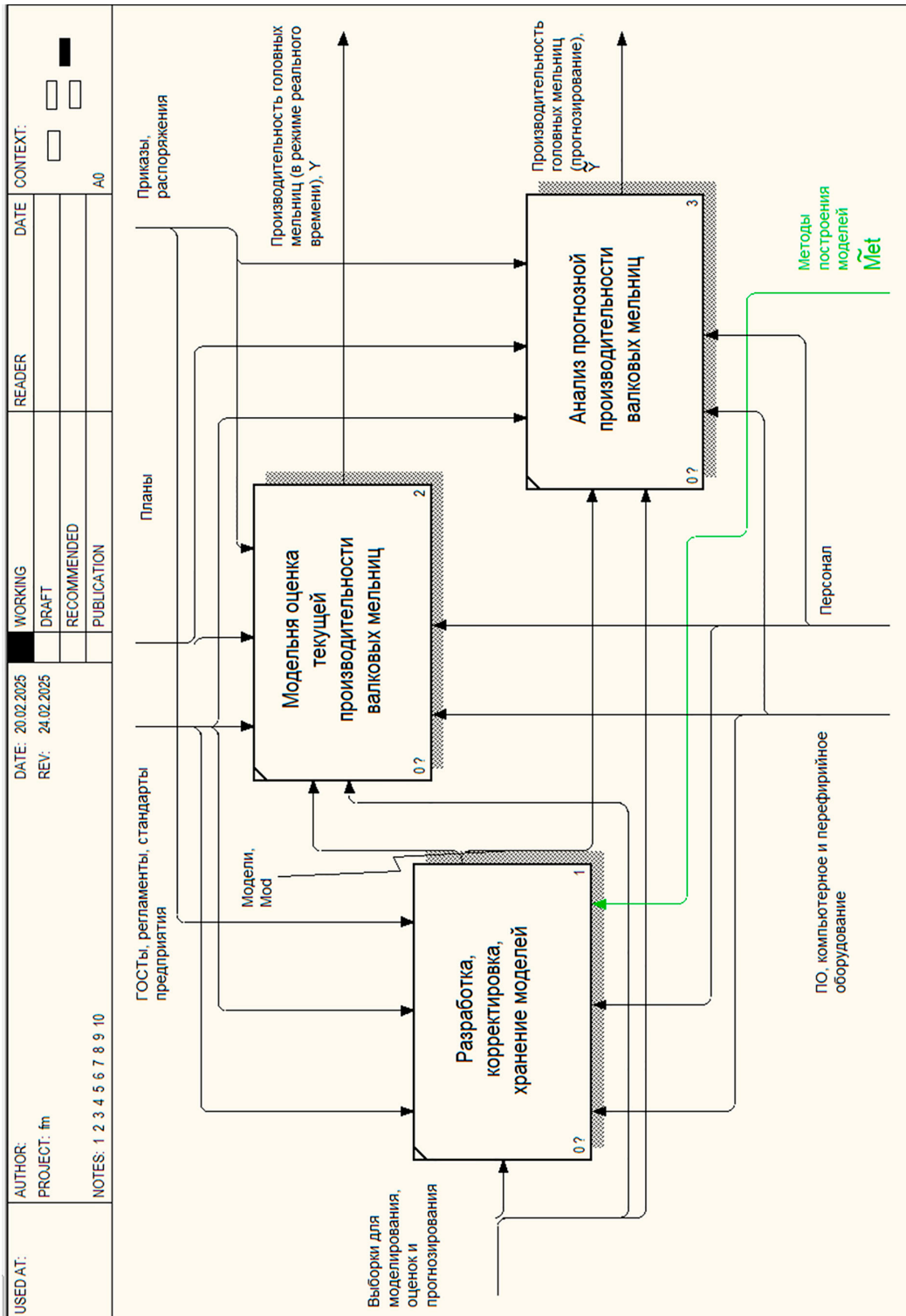


Рис. 5. Детализация функции «Предиктивная аналитика» в ППА  
 Источник: составлено авторами на основе [17]

– методы анализа данных  $\widehat{Met}$  для построения адекватных моделей оценки и прогнозирования производительности измельчительного оборудования, эффективности работы ОФ, при этом они включают как традиционные –  $\widehat{Met}'$ , так и специально разработанные –  $\widehat{Met}''$ :  $\widehat{Met} Met; \subset \widehat{Met}' \subset \widehat{Met}$ ,  $\widehat{Met}'' \subset \widehat{Met}$ ;

– методы построения математических и ситуационных моделей,  $\widehat{Met} \subset Met$ .

Также отметим  $Mod$  – множество моделей и алгоритмов, используемых  $S_n$ , отражающее необходимые причинно-следственные связи, в том числе на основе использования традиционных и предложенных методов из множества  $Met$ :  $Mod = \{Mod_1, \dots, Mod_m, \dots, Mod_M\}$ ,  $m = \overline{1, M}$ , где  $M$  – общее число моделей.  $Mod_m$  – суть отображения на введенных множествах концептуальной модели ППА (2).

$$\begin{aligned} Mod_m : TP^m \times \Omega^m \times Met^m &\rightarrow Y, \\ \widetilde{TP}^m \times \Omega^m \times Met^m &\rightarrow \widetilde{Y}, \\ TP^m, \widetilde{TP}^m &\subset TP; \\ \Omega^m &\subset \Omega; \\ Met^m &\subset Met, \\ Met^m = \overline{Met}^m \cup \widehat{Met}^m \cup \widetilde{Met}^m; \\ \widehat{Met}^m &= \widehat{Met}'^m \cup \widehat{Met}''^m. \end{aligned} \quad (2)$$

где  $Q$  – множество отношений подсистем и элементов ППА, реализующих процесс их взаимодействия и определяющих внутреннюю структуру исследуемой системы и ее компонентов. Часть подобных отношений уже представлена выше при описании множеств из концептуальной модели (1) и при описании процесса моделирования в (2).

Согласно представленной в (1) концептуальной модели, проведем построение функциональной модели ППА с детализацией, что позволит продемонстрировать функции, подфункции и задачи во взаимосвязи, выявить основные информационные потоки, определить научно обоснованные методы актуализации функций, выявить комплекс необходимых для разработки моделей (2).

На рисунках 3–5 схематично представлены функциональные модели ППА, отражающие параметры состояния системы и ее основные функции во взаимодействии, а также механизмы воздействия.

Как демонстрируют функциональные модели ППА, для организации эффективного функционирования подобной подсистемы интегрирующего уровня автома-

тизированного управления ОФ ГОК необходимы разработка комплекса методов анализа производственных данных и создание специального математического обеспечения для оценки и прогнозирования производительности валковых мельниц с целью повышения эффективности работы ОФ в целом. Это связано с рациональным оперативным планированием производственных ресурсов, в том числе с планированием работ по устранению причин возникновения ошибок измерений параметров, выдачей рекомендаций по ведению производственных процессов в соответствии с принятыми решениями, правильным формированием плановых финансово-экономических показателей фабрики на предстоящий период.

### Заключение

Проведенный анализ существующих уровней автоматизации на ОФ ГОК выявил необходимость введения в состав интегрирующего уровня между АСУТП и АСУП, обеспечивающего трансформацию производственных данных в своевременные результативные решения по регулированию эффективности производства, специализированной ППА, которая наделяется функциями оценки и прогнозирования производительности измельчительного оборудования в различных режимах, в том числе при изменении качественных характеристик сырья и производственных условий / требований.

ППА впервые будет осуществлять оперативную модельную оценку производительности ОФ ГОК как в режиме онлайн, так и в прогнозируемом режиме.

Разработанные концептуальная теоретико-множественная и функциональные модели ППА позволили не только выявить и детализировать ее основные функции и предполагаемую структуру, но и определить, какие механизмы требуется разработать для организации ее эффективного функционирования при практическом внедрении в процессах автоматизированного управления производством на современных ОФ ГОК. Подобным механизмом является комплекс методов  $Met$  для обработки широкого спектра технологических параметров во множестве  $TP$  и для создания специальных математических моделей  $Mod$ , реализующих необходимые причинно-следственные связи для оценок и прогнозирования. Такой подход может существенно приблизить процессы обогащения к устойчивой производительности качественного продукта на выходе с минимизацией влияния человеческого фактора.

### Список литературы

1. Lukichev S.V. Mining Institute KSC RAS, Apatity, Russian Federation // Russian Mining Industry. 2021. Vol. 4. P. 73-79. DOI: 10.30686/1609-9192-2021-4-73-79.
2. Эндерев В.А. Состояние и перспективы развития системы управления горно-обогатительным производством в черной металлургии // Современные научные исследования и инновации. 2012. № 8. URL: <https://web.snauka.ru/issues/2012/08/16352> (дата обращения: 06.02.2025).
3. Грачев В.В., Циряпкина А.В., Мышляев Л.П., Иванов Д.В., Цветков А.Б., Прокофьев С.В., Шипунов М.В. Модернизация верхнего уровня автоматизированной системы управления технологическими процессами обогатительной фабрики «Антоновская» с использованием пакета WONDERWARE SYSTEM PLATFORM 2017 // Вестник Сибирского государственного индустриального университета. 2018. № 4 (26). С. 46-51. URL: <https://vestnik.sibsiu.ru/index.php/vestnik/article/view/383> (дата обращения: 06.02.2025).
4. Швабауэр А.Я. Управление ГОКом для соблюдения решений проекта // Цифровые технологии в горном деле: тезисы докладов Всероссийской научно-технической конференции (г. Апатиты, 13-16 июня 2023). Апатиты: Издательство Колышайского научного центра Российской академии наук, 2023. С. 72-73.
5. Закамалдин А.А. Оптимальное управление процессом измельчения в шаровой мельнице с применением прогнозирующей модели. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. Томск: Национальный исследовательский Томский политехнический университет. 2022. 179 с.
6. Zakamaldin A.A., Plastunova S.N., Shilin A.A. Problems of automated control and avoiding of overloading drum mills with ore // Безопасность: Информация, Техника, Управление: сборник изданных статей по материалам Международной научной конференции (г. Санкт-Петербург, 30 декабря 2019). Санкт-Петербург: Издательство: Частное научно-образовательное учреждение дополнительного профессионального образования Гуманитарный национальный исследовательский институт «НАЦРАЗВИТИЕ», 2020. С. 49-52.
7. Гвишиани А.Д., Никитина И.М., Алёшин И.М. Большие данные как продукт обогатительной фабрики: реальность и перспективы на примере угля // Russian Journal of Earth Sciences. 2023. № 23. DOI: 10.2205/2023es000862.
8. Коровин Д.Е., Грачев В.В., Мышляев Л.П., Раскин М.В., Пургина М.В. Особенности внедрения SCADA-СИСТЕМЫ GENESIS64 в условиях ОФ ООО СП «Барзасское товарищество» // Системы автоматизации (в образовании, науке и производстве): труды XIII Всероссийской научно-практической конференции (с международным участием). (г. Новокузнецк, 02-03 декабря 2021). Новокузнецк: Издательство Сибирский государственный индустриальный университет, 2021. С. 197-201.
9. Башков Д.А., Веселов В.А., Исаев Е.А. Опыт создания АСУТП на Николаевской обогатительной фабрике // Горный журнал. 2016. № 11. С. 85-89. DOI: 10.17580/gzh.2016.11.16.
10. Курышев Е.В., Грачев В.В., Кулошин Г.А., Макаров Г.В., Мышляев Л.П., Халимов В.В. Применение аналитических инструментов masterscada 4D для повышения эффективности управления качеством производства обогатительной фабрики полиметаллов // Научные технологии разработки и использования минеральных ресурсов. 2024. №10. С. 179-183. URL: <https://library.sibsiu.ru/LibrPublicationsSectionsPublicationsFiles.asp?lngSection=94&lngPublication=443> (дата обращения: 06.02.2025).
11. Изюмцев А.А., Клебанов Д.А. Открытое ПО – залог повышения эффективности цифровой трансформации горной промышленности // Рациональное освоение недр. 2022. № 5 (67). С. 68-71. URL: <https://www.roninfo.ru/about/archiv-pomerov/2022/racziionalnoe-osvoenie-ne-dr-%E2%84%96-5/2022> (дата обращения: 06.02.2025).
12. Заернюк В.М., Курбанов Н.Х., Седова Е.И., Шийко В.Г. Актуальные вопросы цифровизации учетно-аналитического обеспечения горногеологической отрасли // <https://elibrary.ru/item.asp?id=50093401> Экономика и управление: проблемы, решения. 2022. № 11 (131). С. 127-134. DOI: 10.36871/ek.up.p.r.2022.11.02.020.
13. Topalov A.V., Kaynak O. Neural network modeling and control of cement mills using a variable structure systems theory based on-line learning mechanism // Journal of Process Control. 2004. Vol. 14. № 5. P. 581-589. DOI: 10.1016/j.jprocont.2003.10.005.
14. Павлюк Н.А. Математические и алгоритмические модели реконфигурации модульной робототехнической системы // Вестник КРАУНЦ. Секция: Физ.-мат. науки. 2020. Т. 33, № 4. С. 122-131. DOI: 10.26117/2079-6641-2020-33-4-122-131.
15. Савельев М.Ю. Построение интегрированных автоматизированных систем управления НПЗ/ХХК // Автоматизация в промышленности. 2024. № 6. С. 13-24. DOI: 10.25728/avtprom.2024.06.02.
16. Ташенова Л.В., Мамраева Д.Г., Кульжамбекова Б.Ш. Анализ бизнес-моделей промышленных предприятий Казахстана в условиях цифровой трансформации // Вестник Академии знаний. 2023. № 5. (58). С. 515-524. URL: <https://academiyadt.ru/online-zhurnal-vestnik-akademii-znaniy-vaz-58/> (дата обращения: 06.02.2025).
17. Гасанов Э.Р., Смирнова Д.А., Шура И.А. Комплексный подход в решении задач цифрового производства // Автоматизация в промышленности. 2024. № 2. С. 48-53. DOI: 10.25728/avtprom.2024.02.13.