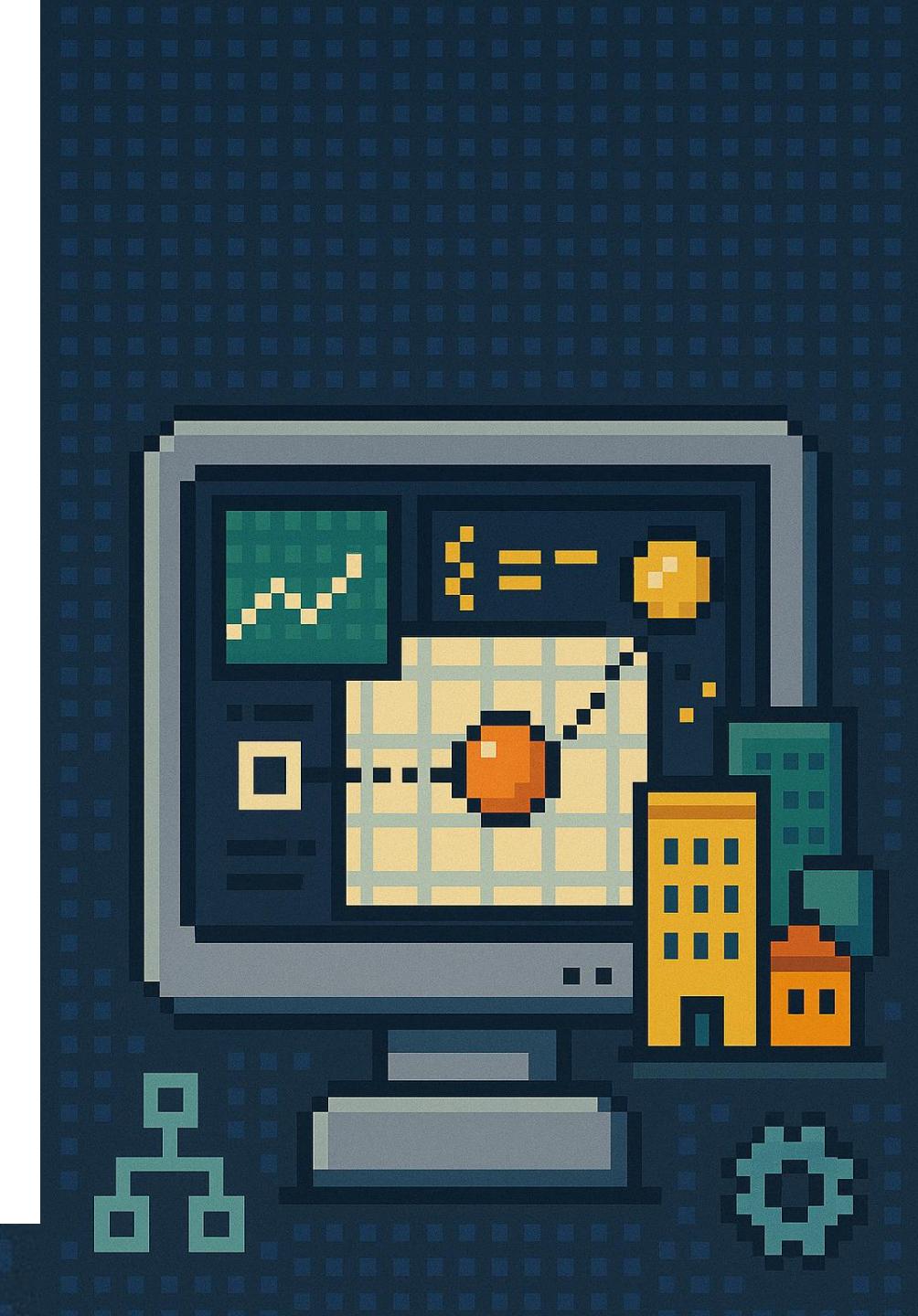


Имитационное моделирование: планирование и поддержка принятия решений на реальных примерах

Виталий Черненко,
Амальгама



Обо мне

Черненко Виталий

- Кандидат технических наук
(в области математического моделирования)
- Более 15 лет опыта в области имитационного моделирования и планирования
- Сооснователь и директор ООО «Амальгама»



Имитационное моделирование – метод исследования систем с помощью построения компьютерных моделей, воспроизводящих динамику исследуемых систем



- + Преимущество ИМ – возможность учесть детали, которые недоступны в оптимизационных и других формальных математических моделях
- Недостаток ИМ – отсутствие математически оптимального решения, его замена результатами сценарного анализа

Конференции:

- **Wintersim**, США и мир:
<https://informs-sim.org/>
- **ИММОД**, Россия:
<http://simulation.su/>
15-17 октября 2025 г. Санкт-Петербург

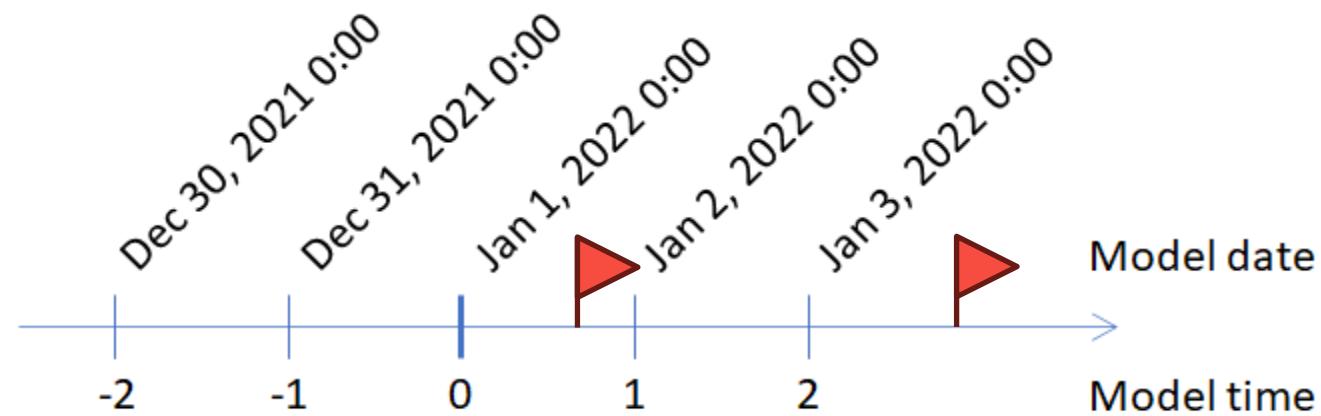
Основные концепции дискретно-событийной ИМ: временная ось, события, случайные величины

Ключевая идея: система представляется как последовательность **событий и состояний** во времени

В основе принципа дискретно-событийного моделирования лежит цикл:

- планирование событий на определенное время на **временной оси**
- мгновенный переход к времени ближайшего события и пересчет внутреннего состояния системы на это время

Событие — это момент, когда система меняет состояние (например, приход клиента, завершение обслуживания)

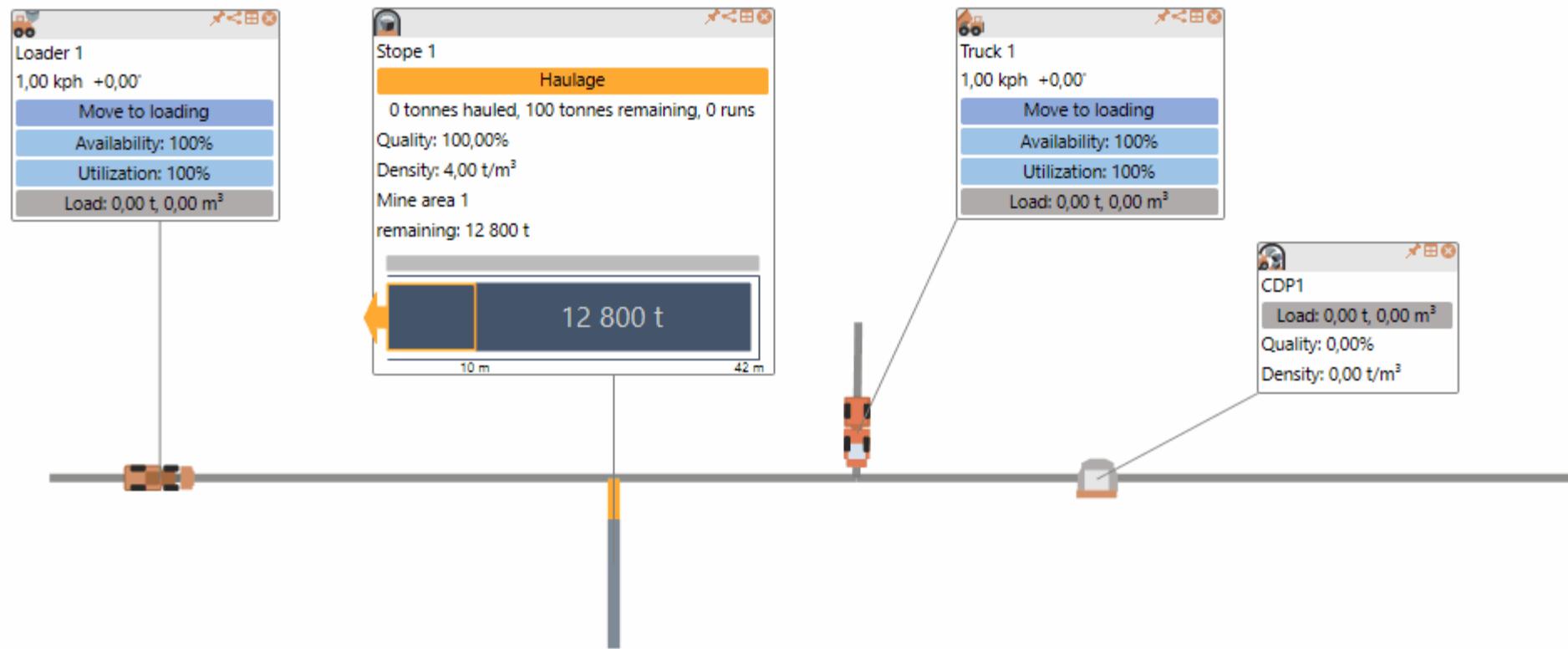


ИМ часто использует стохастические модели, где ключевые параметры (например, время обслуживания) задаются **распределениями случайных величин**: экспоненциальным, нормальным, треугольным, равномерным

Агентное моделирование = дискретно-событийное моделирование

Несмотря на то, что агентное моделирование иногда выделяют в отдельный класс, такое разделение условно и не применимо для современных ИМ. Чем агентная модель отличается от обычной дискретно-событийной:

- Состояние системы распределено по состояниям агентов
- Расчёт следующего состояния системы зависит от состояния всех агентов

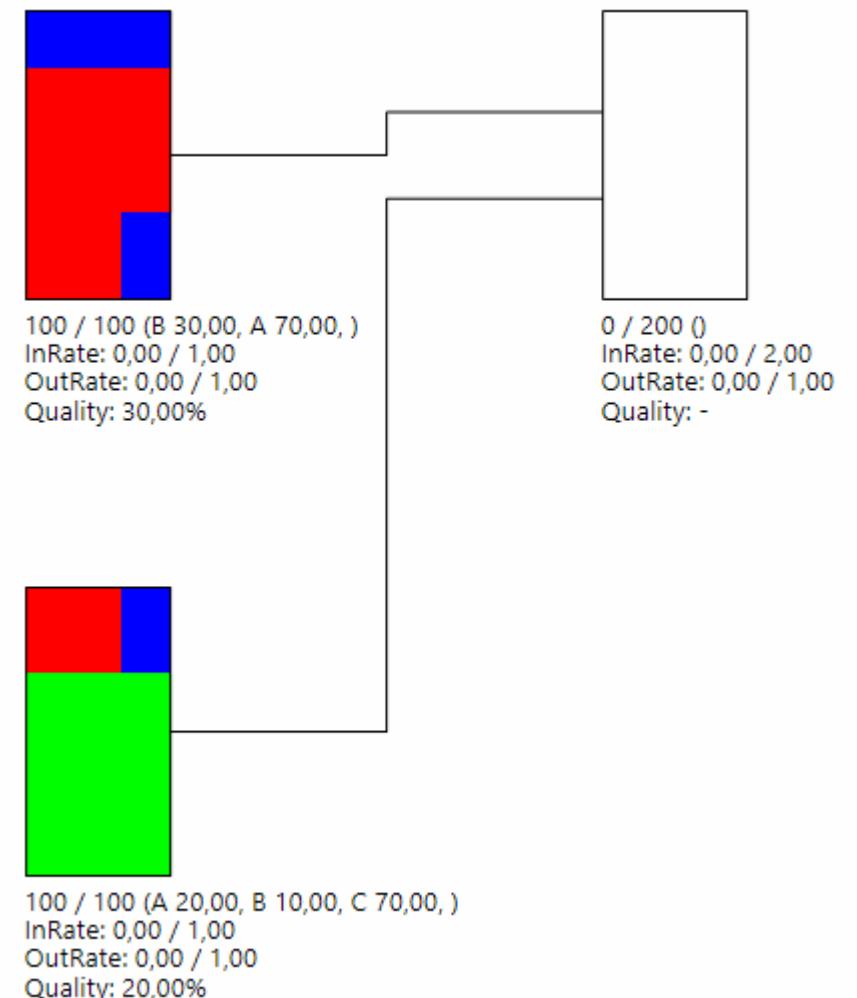


Моделирование непрерывных потоков тоже выполняется с помощью дискретно-событийного подхода (подход «discrete rates»)

Состояние системы – темпы перетоков вещества между элементами, вмещающими поток: баками, трубами, конвейерами и т.п.

Моменты изменения состояний системы:

- Наполнение бака
- Опустошение бака
- Смена состава веществ
- Момент мгновенного смещивания веществ в баке
- И т. п.



В программной статье Balchi (1995) виды проверок имитационных моделей разделяются на верификацию, валидацию и тестирование

Proceedings of the 1995 Winter Simulation Conference
ed. C. Alexopoulos, K. Kang, W. R. Lilegdon, and D. Goldsman

PRINCIPLES AND TECHNIQUES OF SIMULATION VALIDATION, VERIFICATION, AND TESTING

Osman Balci

Department of Computer Science
Virginia Polytechnic Institute and State University
Blacksburg, Virginia 24061-0106, U.S.A.

ABSTRACT

Sufficient experience has been gained over the last decade in simulation validation, verification, and testing (VV&T) to establish basic principles about its characteristics. This paper presents 15 principles of simulation VV&T. These principles help the researchers, practitioners and managers better understand what model VV&T is all about. They serve to provide the underpinnings for the VV&T techniques that can be used throughout the life cycle of a simulation study. This paper also surveys current software VV&T techniques and current simulation VV&T techniques. Understanding and applying these principles and employing proper testing techniques throughout the life cycle of a simulation study are key factors in increasing the probability of success in a simulation study.

serve to provide the underpinnings for the 45 VV&T techniques, described by Balci (1994), that can be used throughout the life cycle of a simulation study. Understanding and applying these principles is crucially important for the success of a simulation study.

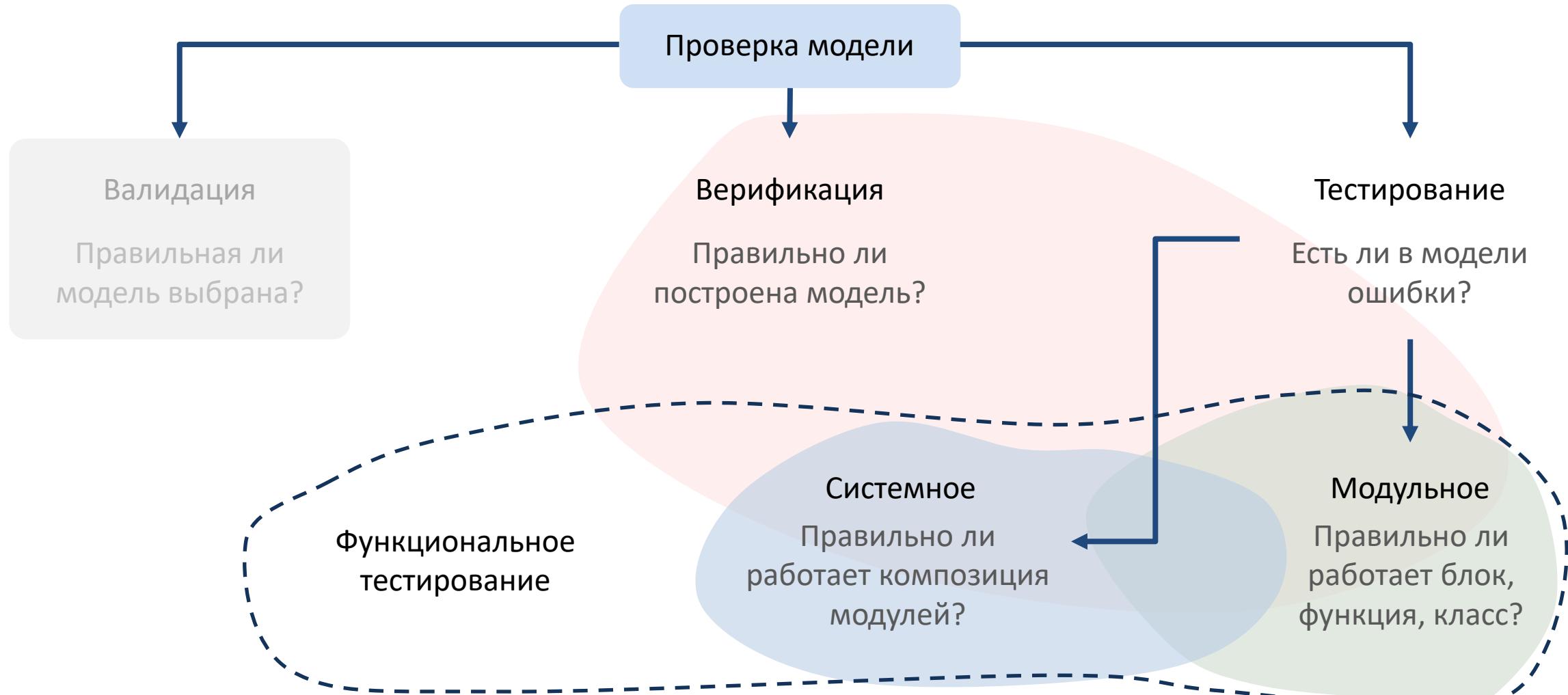
Simulation is the process of constructing a model of a system which contains a problem and conducting experiments with the model on a computer for a specific purpose of experimentation to solve the problem. Credibility of simulation results not only depends on model correctness, but also is significantly influenced by accurate formulation of the problem. Therefore, VV&T techniques must be employed throughout the life cycle of a simulation study.

Model Validation is substantiating that the model, within its domain of applicability, behaves with satisfactory accuracy consistent with the study objectives. In other words, in model validation, we substantiate that the

- **Валидация модели** (model validation) – это процесс подтверждения того, что построенная модель достаточно хорошо представляет объект исследования. Иными словами, валидация модели отвечает на вопрос – правильная ли модель используется в исследовании
- **Верификация модели** (model verification) – это процесс подтверждения того, что модель реализована в среде моделирования именно так, как спроектирована, без искажений. Верификация отвечает на вопрос – правильно ли разработана модель
- **Тестирование модели** (model testing) – это процесс нахождения неточностей и ошибок модели. При тестировании на вход модели подаются заранее подготовленные наборы входных данных, а на выходе проверяется соответствие выходных данных ожидаемым результатам

Источник: Osman Balci. Principles and techniques of simulation validation, verification, and testing // Proceedings of the 1995 Winter Simulation Conference, P. 147-154.

В реальной жизни нет четкой границы между модульным и системным тестированием, а понятия тестирования и верификации пересекаются



Источник: Osman Balchi. Principles and techniques of simulation validation, verification, and testing // Proceedings of the 1995 Winter Simulation Conference, P. 147-154.

Инструменты имитационного моделирования



AnyLogic – безусловный лидер на рынке коммерческих продуктов для разработки ИМ
<https://www.anylogic.com/>



Simio – один из самых популярных инструментов для имитационного моделирования, особенно в США
<https://www.simio.com/>



Python – фреймворк процессно-ориентированной дискретно-событийной системы моделирования
<https://simpy.readthedocs.io/en/latest/>

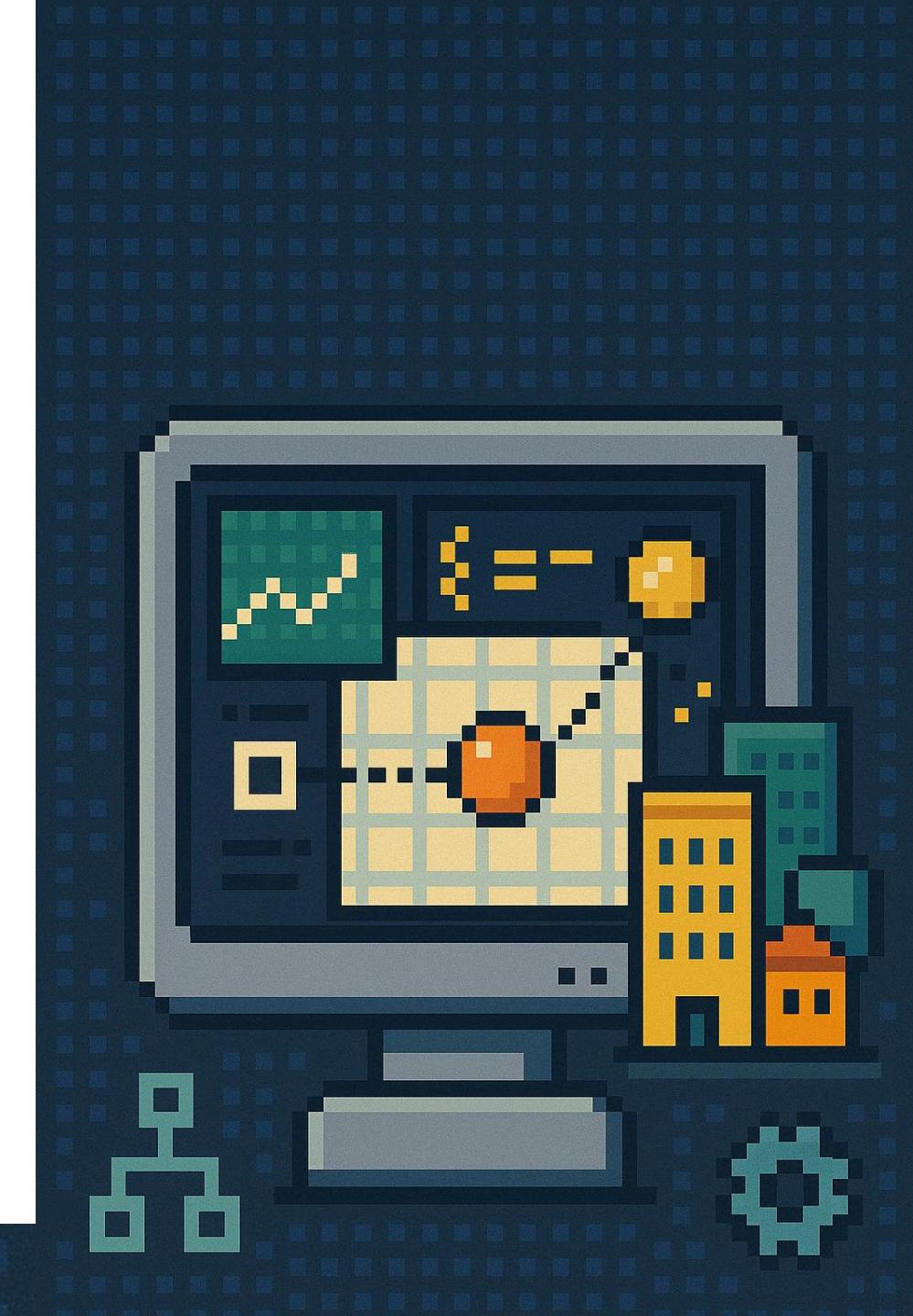


Amalgama platform – набор инструментов для разработки ИМ и систем поддержки принятия решений на Java
<http://www.platform.amalgamasimulation.com>

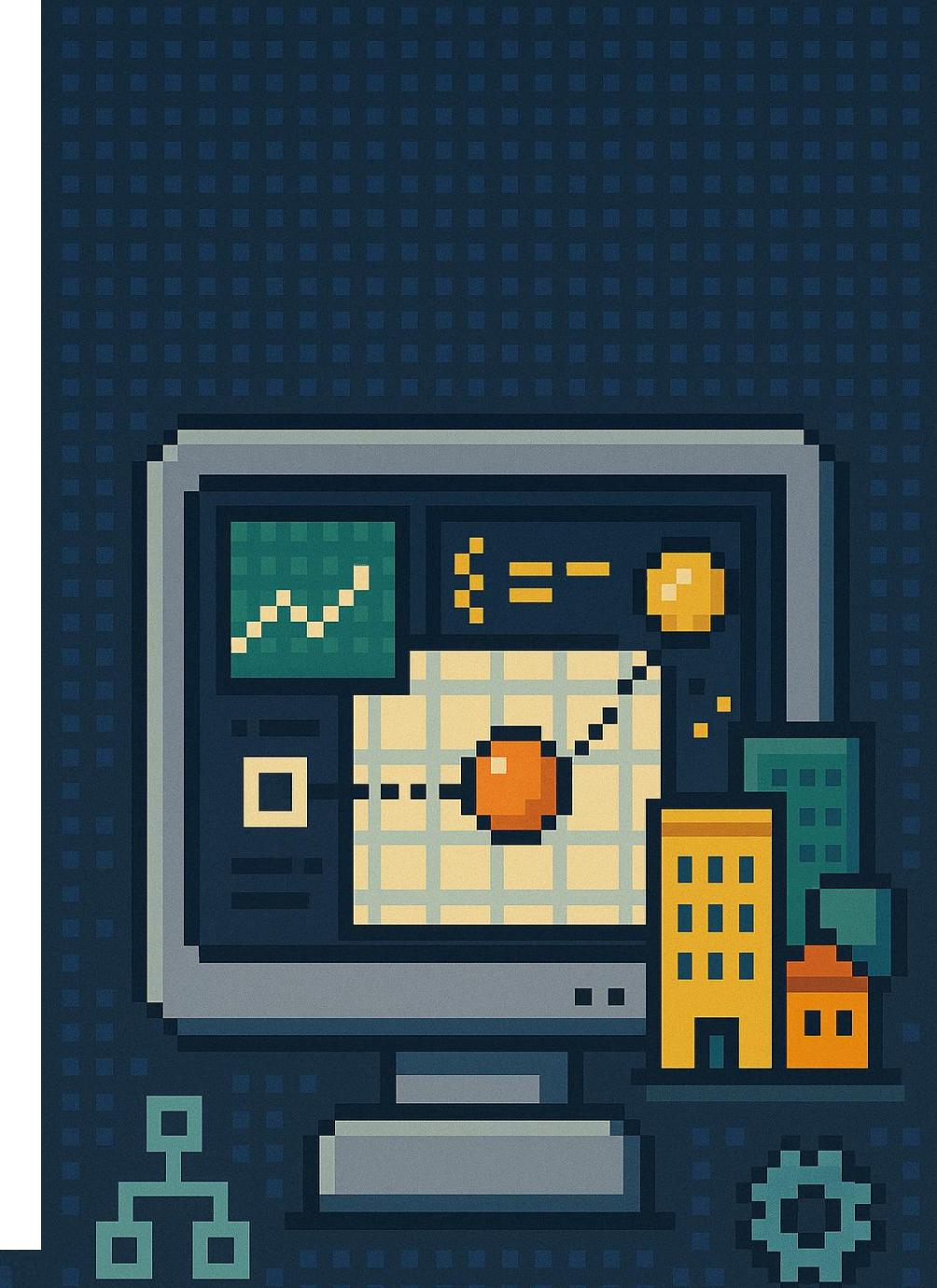
Имитационные модели могут быть как отдельными системами, так и частью больших систем управления и поддержки принятия решений

Вариант интеграции	Схема интеграции	Описание
Использование модели как отдельного инструмента для поддержки принятия решений	A central grey user icon is connected by double-headed arrows to both a blue cylinder labeled 'Модель' (Model) and a blue puzzle piece labeled 'ИС' (Information System). To the left of the user is a dashed circle containing icons of a house, a car, and a briefcase.	<ul style="list-style-type: none">• Модель – самостоятельная исполняемая программа• Модель является инструментом аналитика и запускается им вручную с целью решения локальных задач
Использование модели в качестве системы поддержки принятия решений, интегрированной в информационную среду предприятия	A central grey user icon is connected by double-headed arrows to both a blue cylinder labeled 'Модель' (Model) and a blue puzzle piece labeled 'ИС' (Information System). To the left of the user is a dashed circle containing icons of a house, a car, and a briefcase. A dashed arrow also connects the cylinder to the puzzle piece.	<ul style="list-style-type: none">• Модель – программа, поддерживающая ручную или автоматическую загрузку данных из информационной системы (1С, SAP, Oracle)
Интегрированная информационная система поддержки принятия решений на основе ИМ – «цифровой двойник»	A central grey user icon is connected by double-headed arrows to both a blue cylinder labeled 'Модель' (Model) and a blue puzzle piece labeled 'ИС' (Information System). To the left of the user is a dashed circle containing icons of a house, a car, and a briefcase. The cylinder and puzzle piece are enclosed within a dashed rectangular box labeled 'Предприятие' (Enterprise) at the top and 'Аналитик' (Analyst) at the bottom.	<ul style="list-style-type: none">• Модель – программный модуль, который может даже не иметь пользовательского интерфейса• Модель автоматически запускается информационной системой, результаты моделирования используются автоматически

Вопросы?



Кейс 1. Оптимизация логистической сети и управления запасами с применением имитационного моделирования



Предпосылки проекта

О компании

- Diageo Russia – один из 5 крупнейших оптовых дистрибуторов алкогольной продукции в России
- Бизнес с низкой маржой, критично зависящий от качества клиентского сервиса и логистических затрат

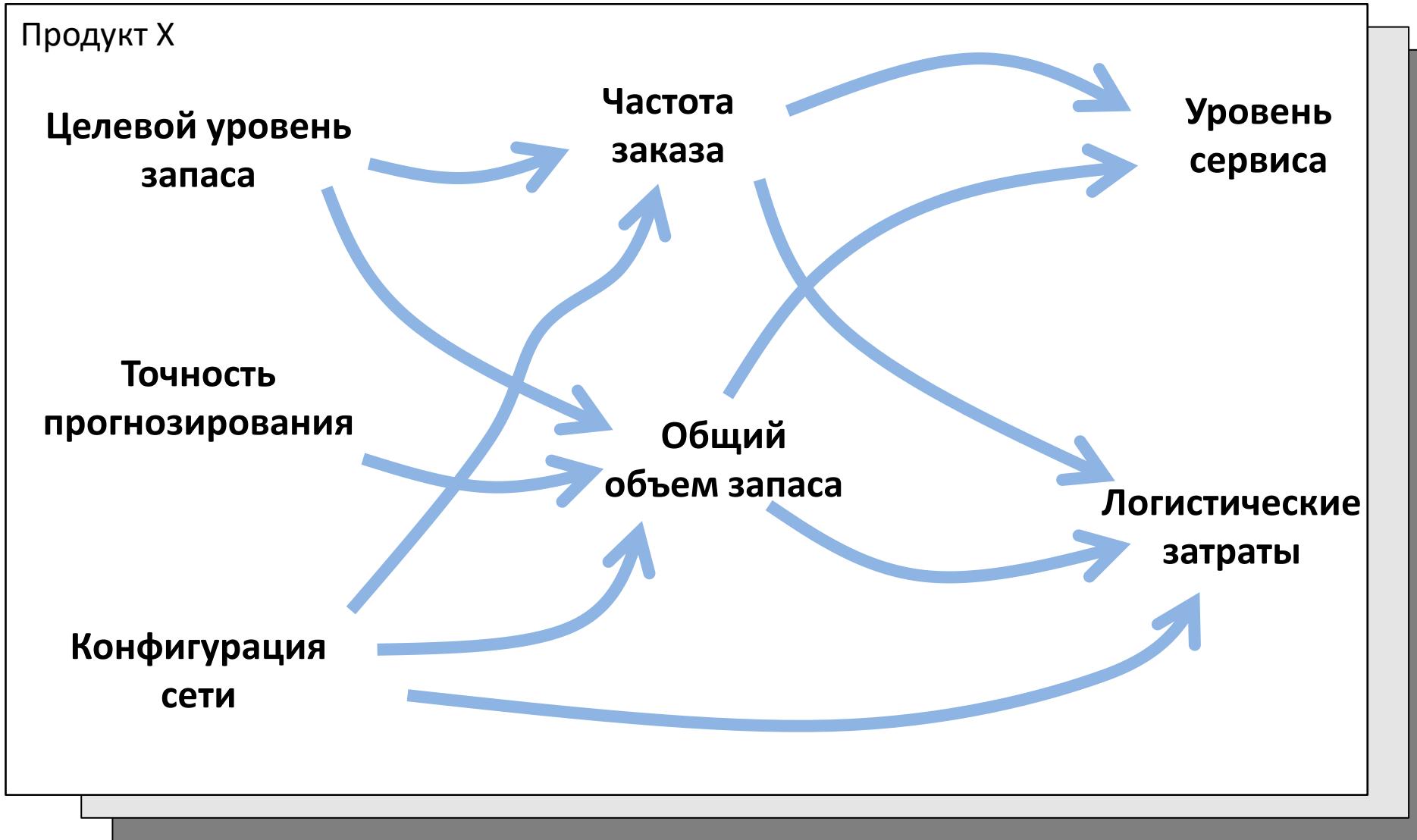
Проблемы и вызовы

- Рост логистических затрат на единицу продукции, несмотря на увеличение объёмов продаж
- Планы расширения за пределы Европейской части России — в регионы Урала и Сибири
- Намерение открыть новый завод на территории РФ

Задачи консалтингового проекта

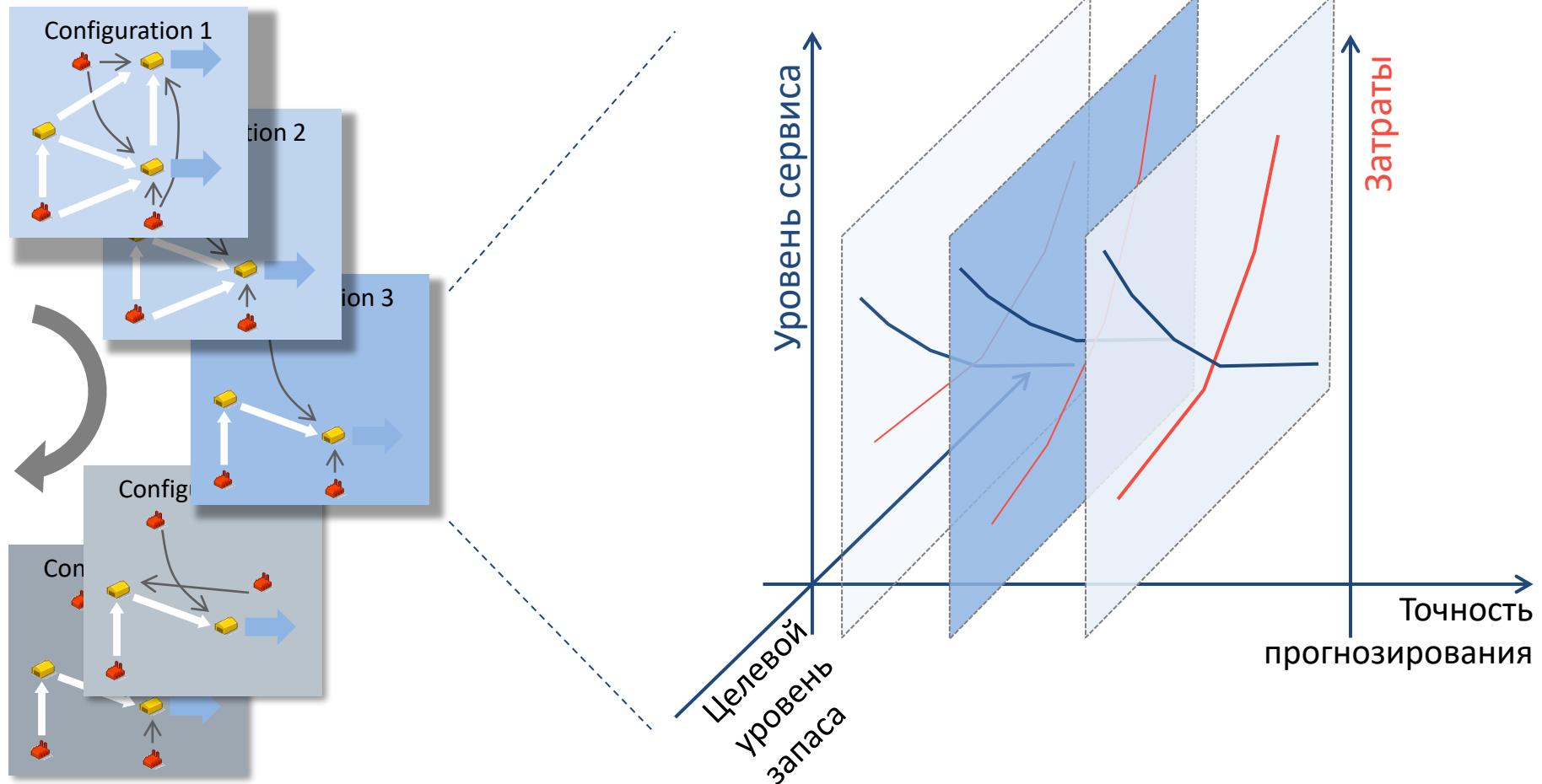
- Обосновать и продемонстрировать пути снижения логистических затрат
- Определить оптимальную конфигурацию логистической сети для расширенной географии бизнеса

Почему имитационное моделирование?



Задача имитационного моделирования

Для каждой конфигурации логистической сети определить, как точность прогнозирования и целевой уровень запасов влияют на логистические затраты и уровень сервиса

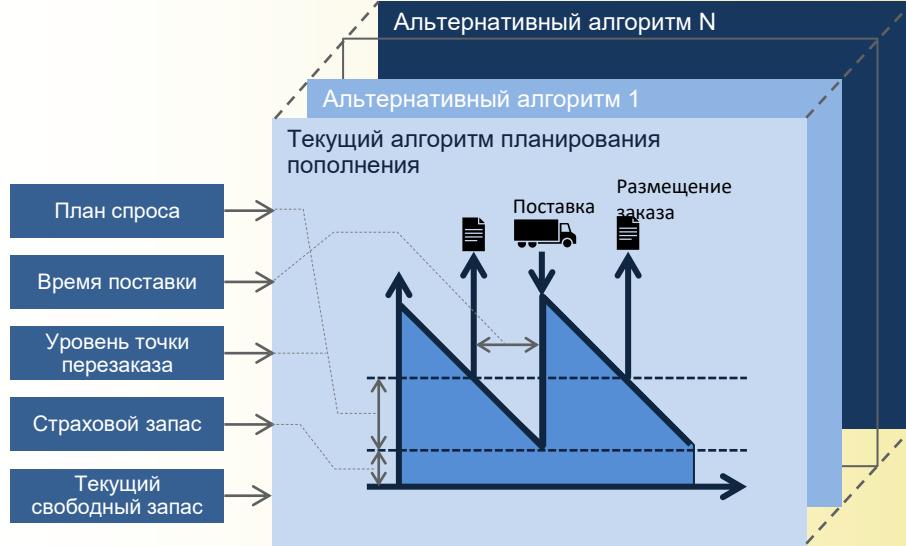


Структура логистической сети



Для адекватного моделирования логистической сети требовалось учитывать алгоритмы пополнения складов и кратность упаковки продукции

Моделирование пополнения складов



Алгоритмы пополнения – правило принятия решения о заказе товара на основании текущего запаса, ожидаемых поставок, прогноза спроса и других факторов

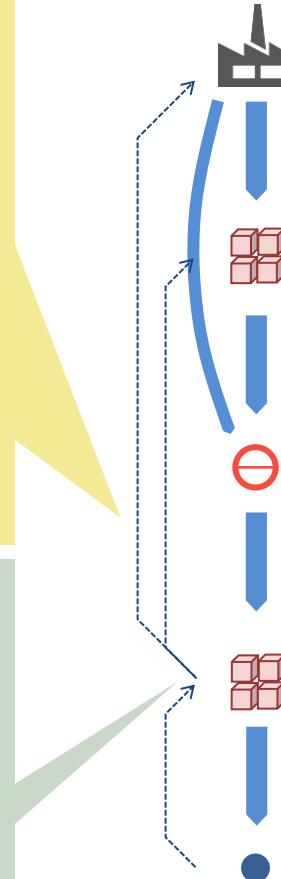
Алгоритмы пополнения существенно влияют на материальные потоки

Моделирование комплектации / разукомплектации

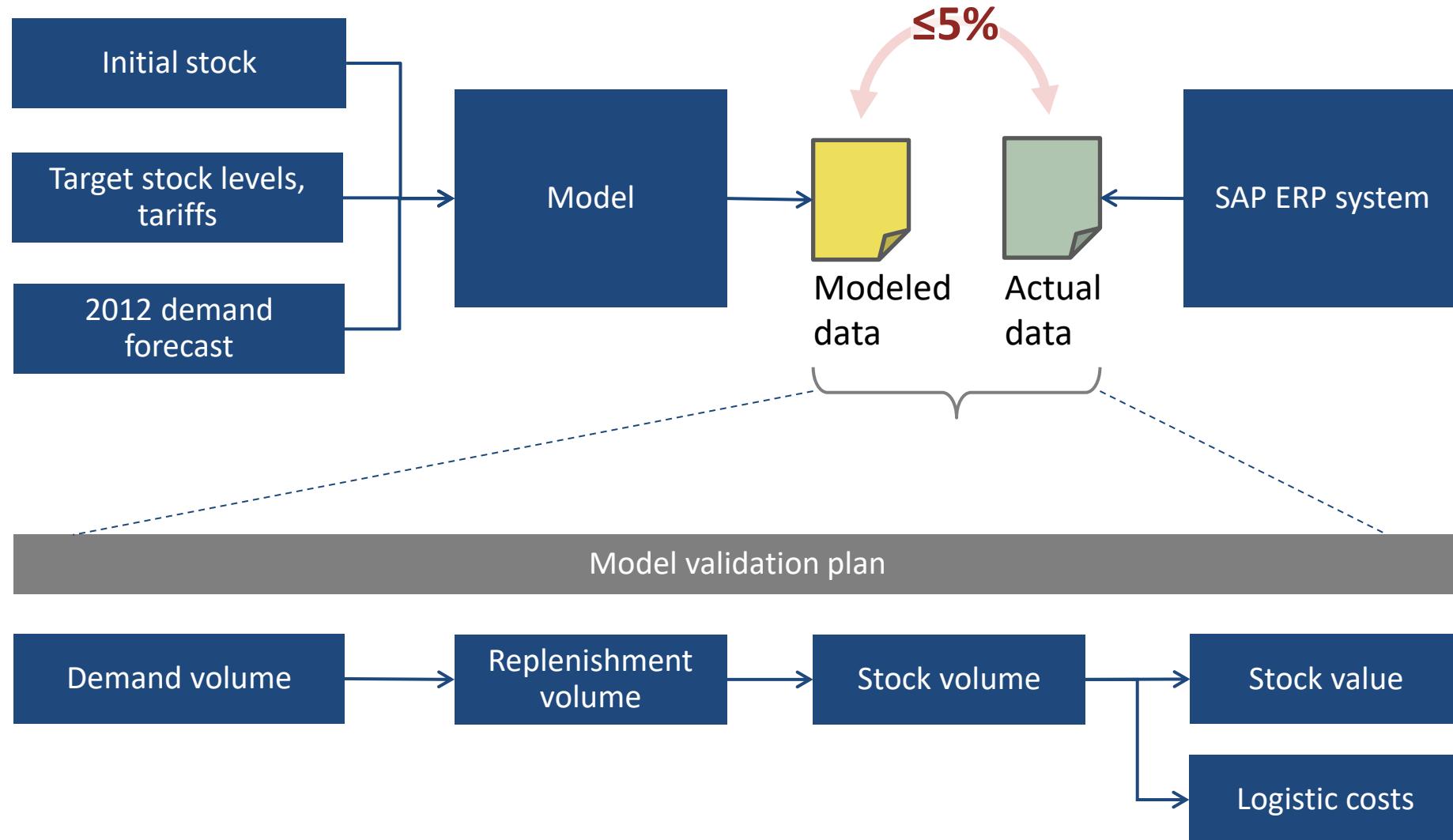


Моно-паллеты, смешанные паллеты и отдельные коробки по-разному обрабатываются на складах.

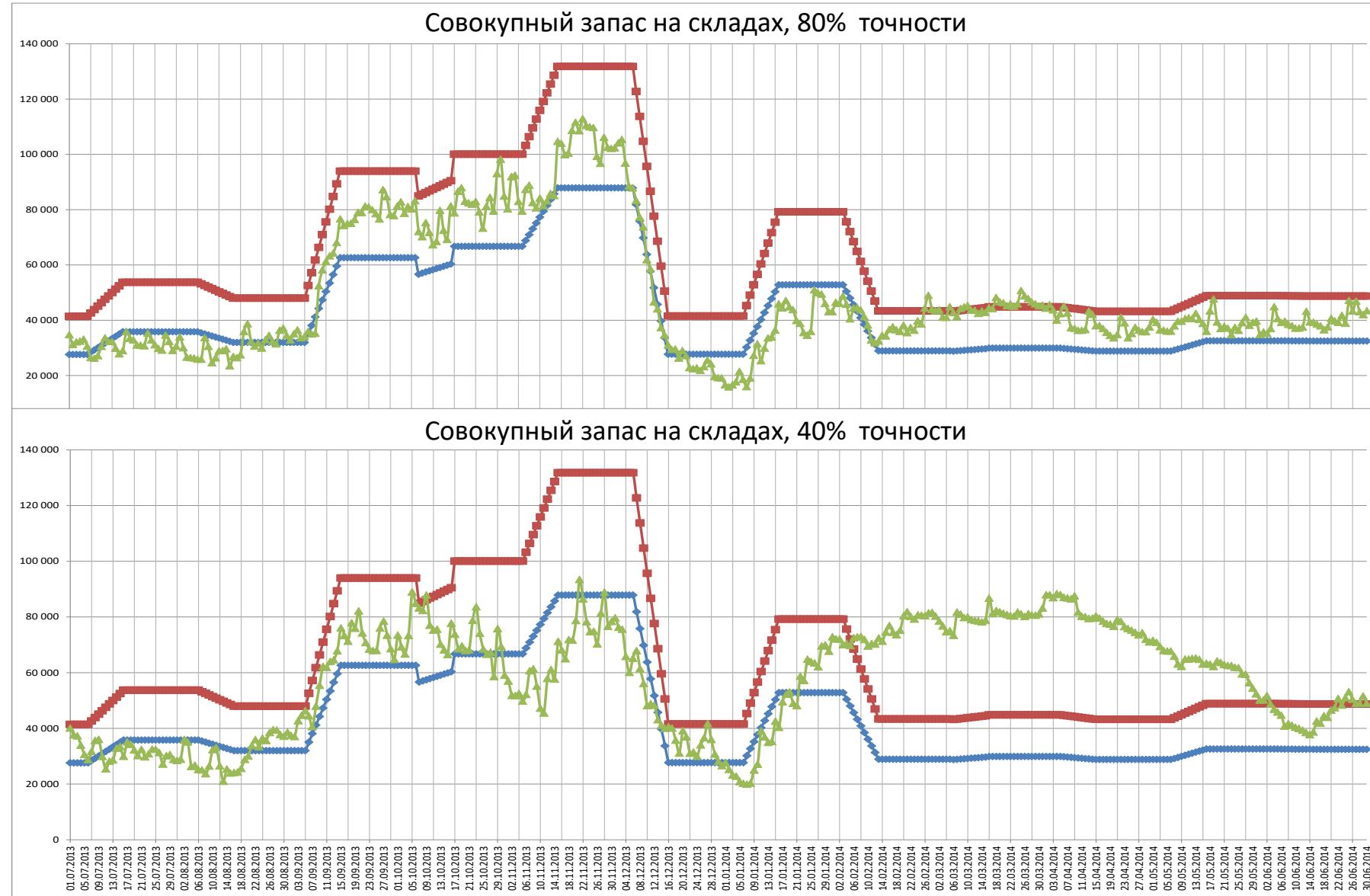
Комплектность и кратность поставки продукции сильно влияет на размер складских затрат



Валидация модели

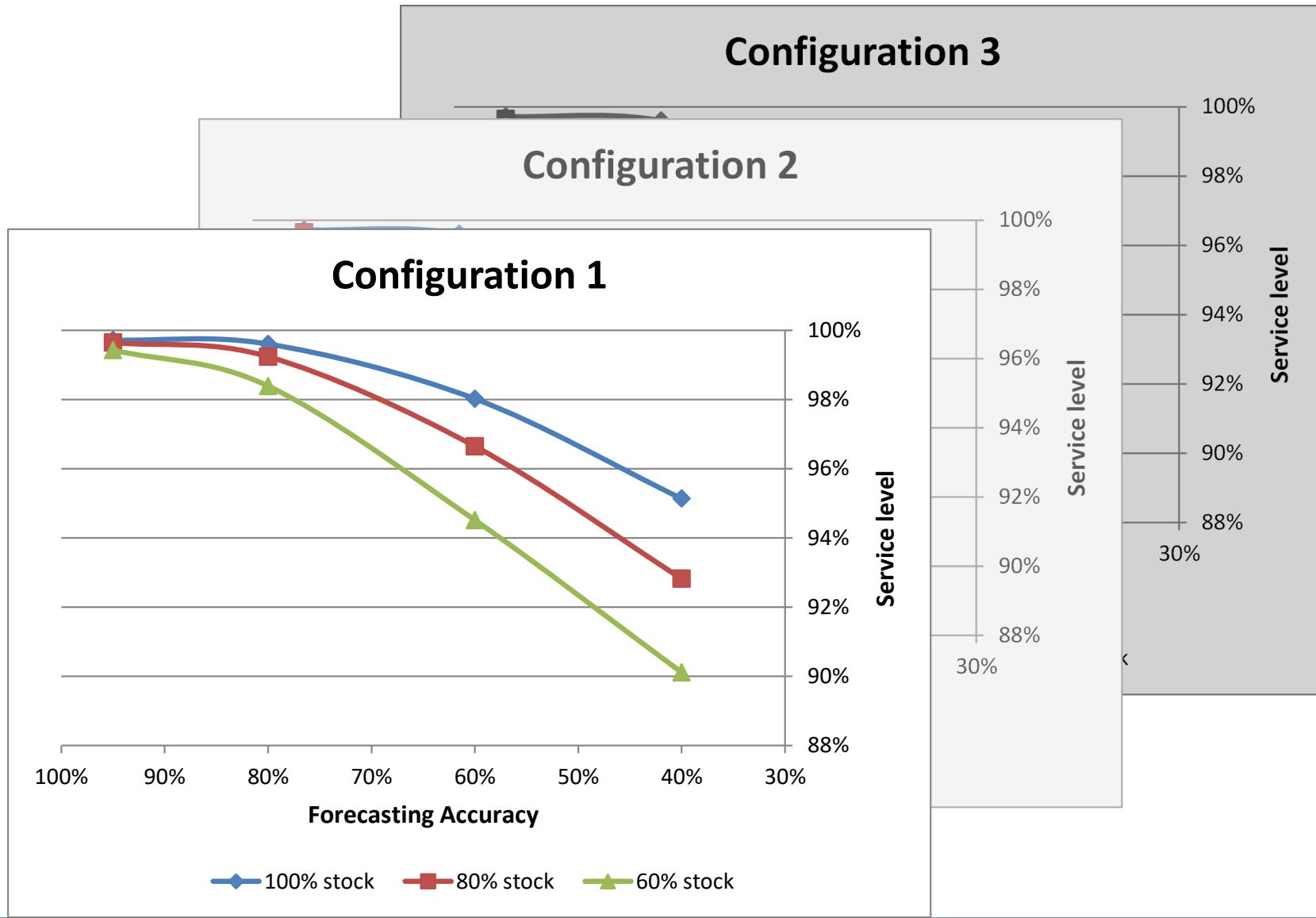


Товарные запасы при различной точности планирования

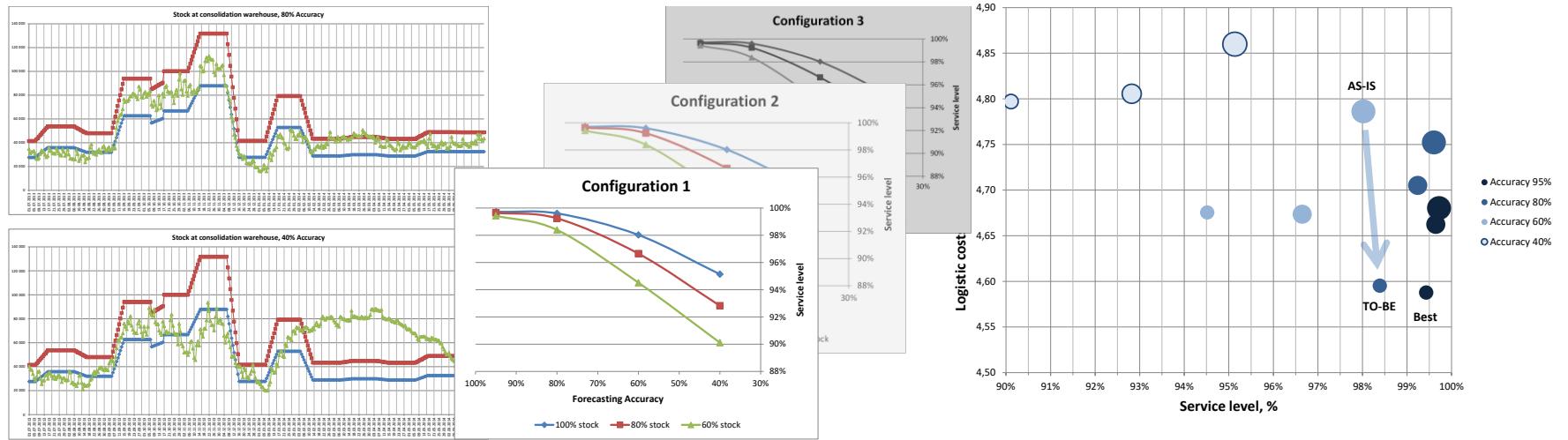


- Верхний уровень запаса
- Уровень запаса
- Нижний уровень запаса

Зависимости уровня сервиса от точности прогнозирования и уровня запаса для различных конфигураций сети



Бизнес-результаты



- Период окупаемости инициативы по повышению точности прогнозирования продаж с 60% до 80% составляет менее 2 лет
- Увеличение точности прогнозирования на 20% позволит снизить целевой уровень запасов на 40%, что приведет к сокращению логистических затрат на единицу продукции на 7%
- Открытие региональных складов потребует неоправданно больших запасов для поддержания целевого уровня сервиса

Кейс 2. Использование имитационной модели для планирования модернизации плавильного цеха Надеждинского металлургического завода



Надеждинский металлургический завод входит в состав ПАО ГМК «Норильский никель»

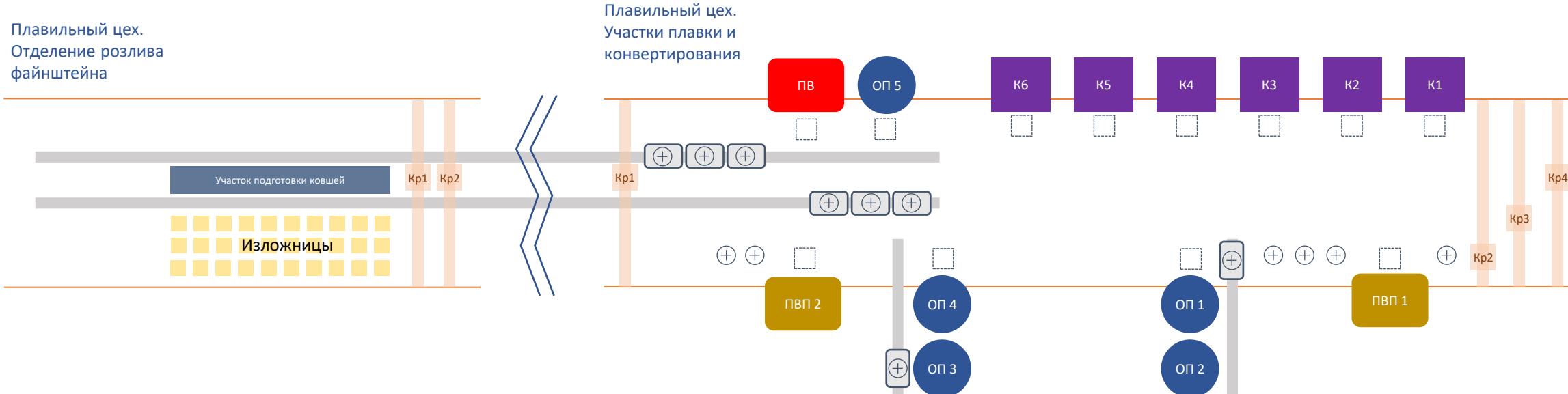


Планировалась масштабная модернизация НМЗ – строительство третьего плавильного комплекса (ЗПК)

Основные изменения:

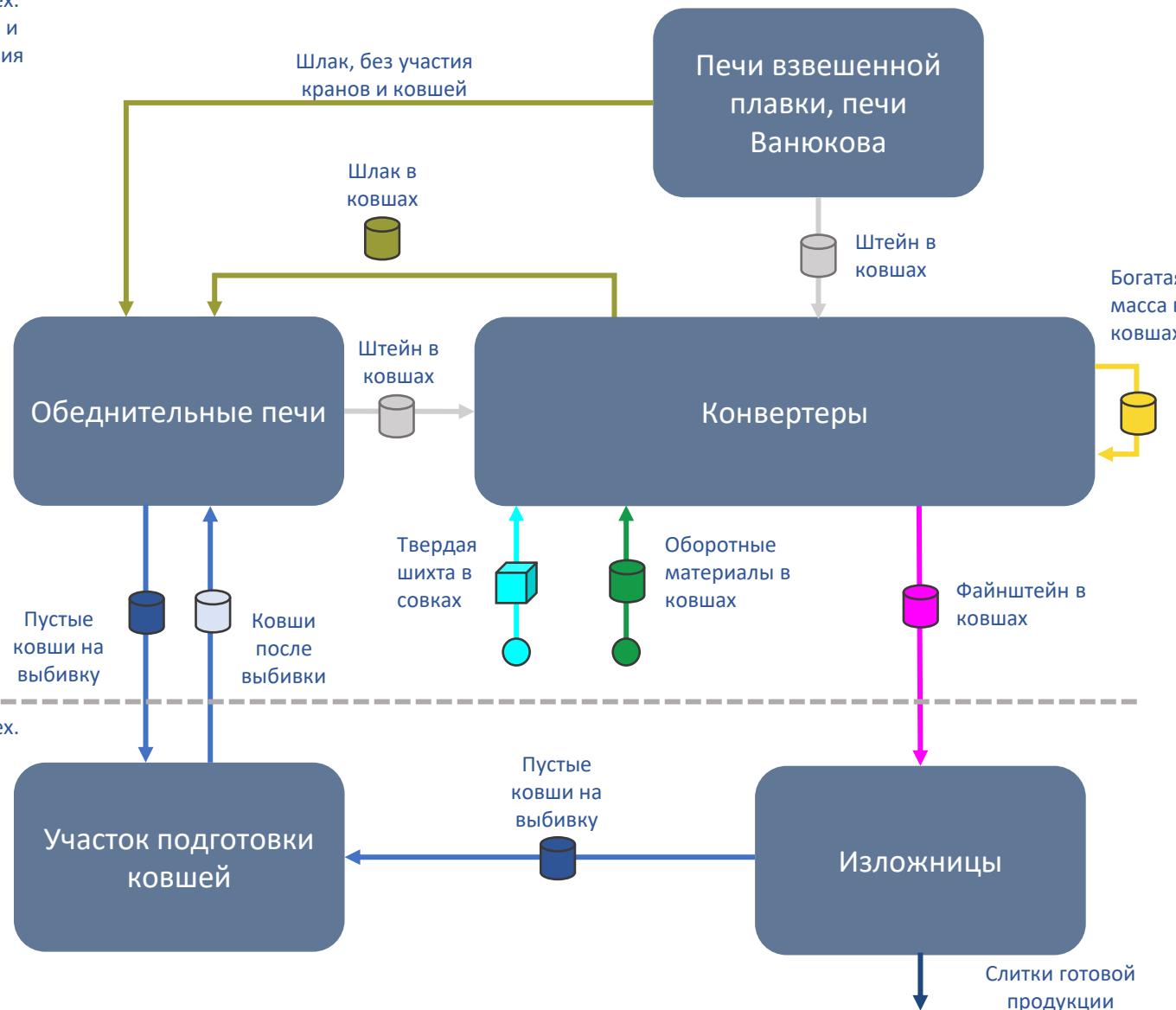
- Возведение печи Ванюкова в существующем плавильном цехе
- Возведение дополнительной обеднительной печи
- Расширение отдела розлива файнштейна

Ввод в эксплуатацию ЗПК позволит производить больше файнштейна
– но насколько больше?



Моделируемые грузопотоки, концептуальная схема, учитываемое оборудование

Плавильный цех.
Участки плавки и
конвертирования



Участок плавки и конвертирования

- печи взвешенной плавки (ПВП)
- печи Ванюкова (ПВ)
- миксеры печей Ванюкова
- конвертеры
- обеднительные печи (ОП)

Отделение розлива файнштейна (ОРФ)

- участок подготовки ковшей
- изложницы

Элементы транспортной системы

- мостовые краны
- технологическая посуда (ковши)
- места установки ковшей
- передаточные телеги
- места выбивки ковшей
- места ремонта изложниц

Цели проекта и способ их достижения

Цели проекта

1. Оценить достижимую производительность ПЦ НМЗ после строительства ЗПК
2. Определить технологические и организационные изменения, необходимые для эффективной работы цеха после модернизации

Способ достижения цели

1. Разработка системы имитационного моделирования

Этапы детализации:

- 1) Создание планировщика: рассмотрение этапов конвертирования и работы ПВП, ПВ, ОП и конвертеров
- 2) Дополнение планировщика имитационной моделью: рассмотрение крановых операций, отделения розлива файнштейна, оборота технологической посуды.

2. Верификация

Верификация имитационной модели – проверка соответствия числовых показателей модели соответствующим показателям работы реального плавильного цеха.

3. Сценарный анализ

Пакетный запуск сценариев для сравнения результатов моделирования сценариев «как есть» и различных вариантов «как будет».

Сценарный анализ с помощью имитационной модели

В рамках проекта был проведен сценарный анализ, в котором были рассмотрены 3 варианта работы плавильного цеха после модернизации:

- в будущей конфигурации с текущей технологией
- в будущей конфигурации с использованием новой технологии
- в будущей конфигурации с использованием новой технологии и кислородной продувкой

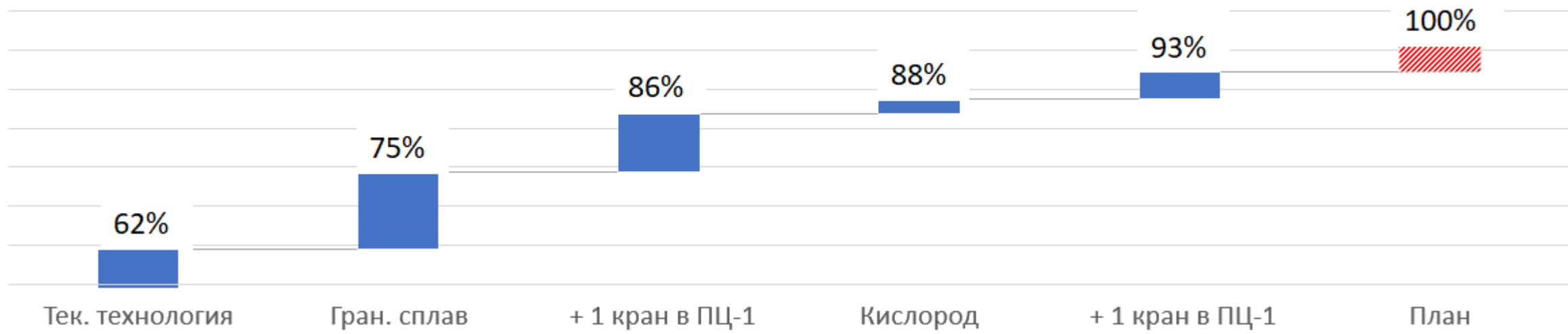
Для каждого из вариантов были определены:

- максимальная производительность работы конвертеров
- максимальная производительность логистической системы участка плавки и конвертирования
- максимальная производительность участка розлива файнштейна
- максимальная пропускная способность передаточных телег
- общая максимально достижимая производительность цеха

Кроме того, для каждого варианта выполнялся поиск наиболее существенных ограничений, влияющих на максимальную производительность: количество кранов на участке плавки и конвертирования, длительность слива штейна из печей взвешенной плавки и обеднительных печей, транспортировка холодных оборотов и т.д.

Сводные результаты сценарного анализа на базе трех вариантов работы плавильного цеха после модернизации

Достижимые объемы производства файнштейна после ввода ЗПК при реализации технологических улучшений, в пересчете на тыс. тонн в год



Номер сценария	Описание сценария	Количество доп. кранов в ПЦ-1	Показатели имитационной модели, тыс.т/год	Доля от планового показателя
1	Будущая конфигурация с текущей технологией	0		62%
2	Будущая конфигурация с использованием гранулированного металлического сплава	0		75%
2.2.	то же	1		86%
2.13.	то же	2		89%
3	Будущая конфигурация с использованием гранулированного металлического сплава и кислородной продувки	0		77%
3.2.	то же	1		88%
3.13.	то же	2		93%

Результаты проекта

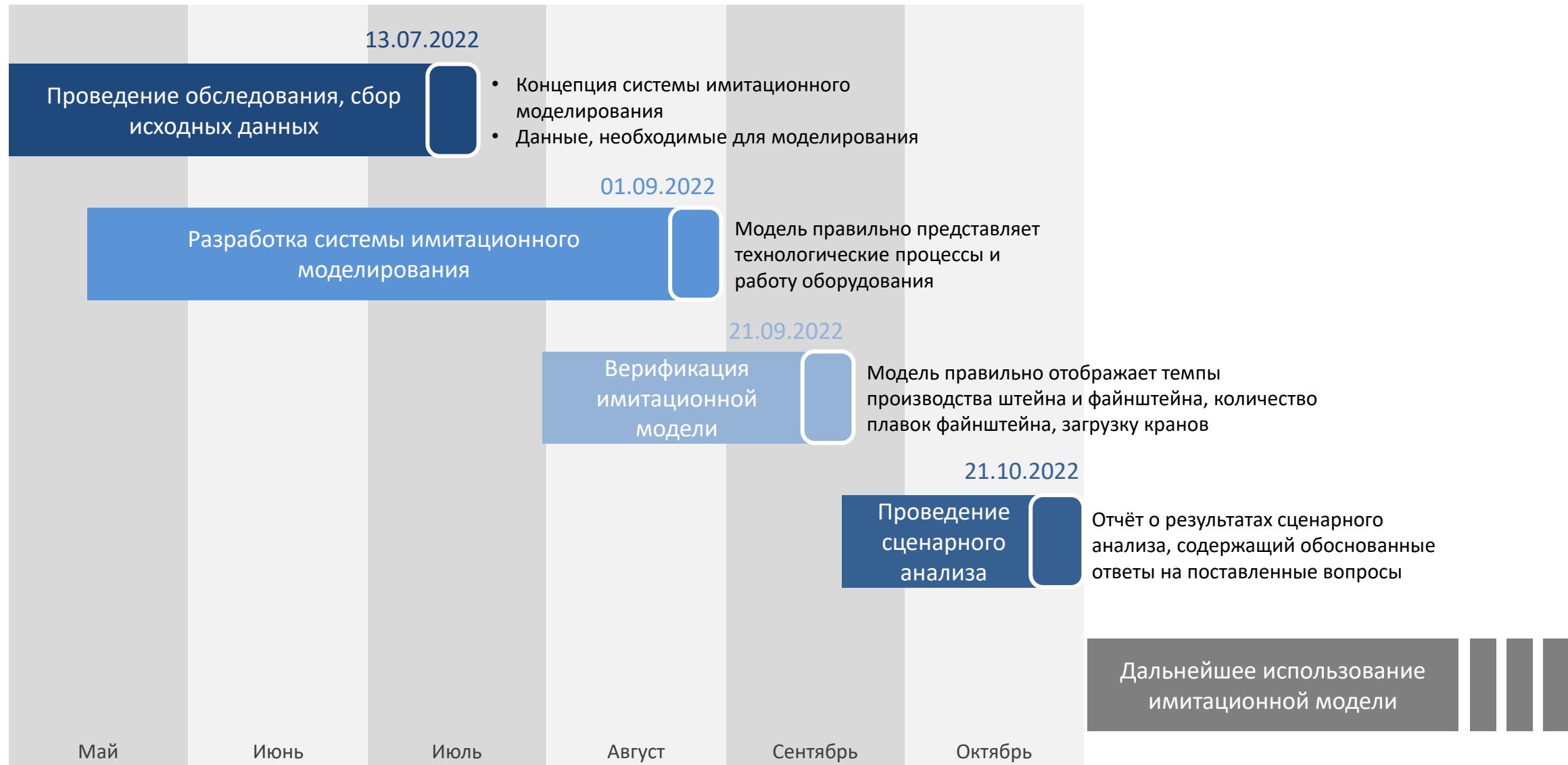
Выполнено

- Определена максимально достижимая производительность ПЦ НМЗ после строительства третьего плавильного комплекса
- Обоснован выбор предпочтительной технологии работы цеха
- Выявлено, что исходные целевые показатели даже при выбранной технологии при заданных параметрах недостижимы
- Выявлены ограничения, которые не позволяют достичь целевых показателей производства
- Рассчитано требуемое количество технологической посуды – ковшей и изложниц
- Определены требования к модернизации крановой системы участка плавки и конвертирования

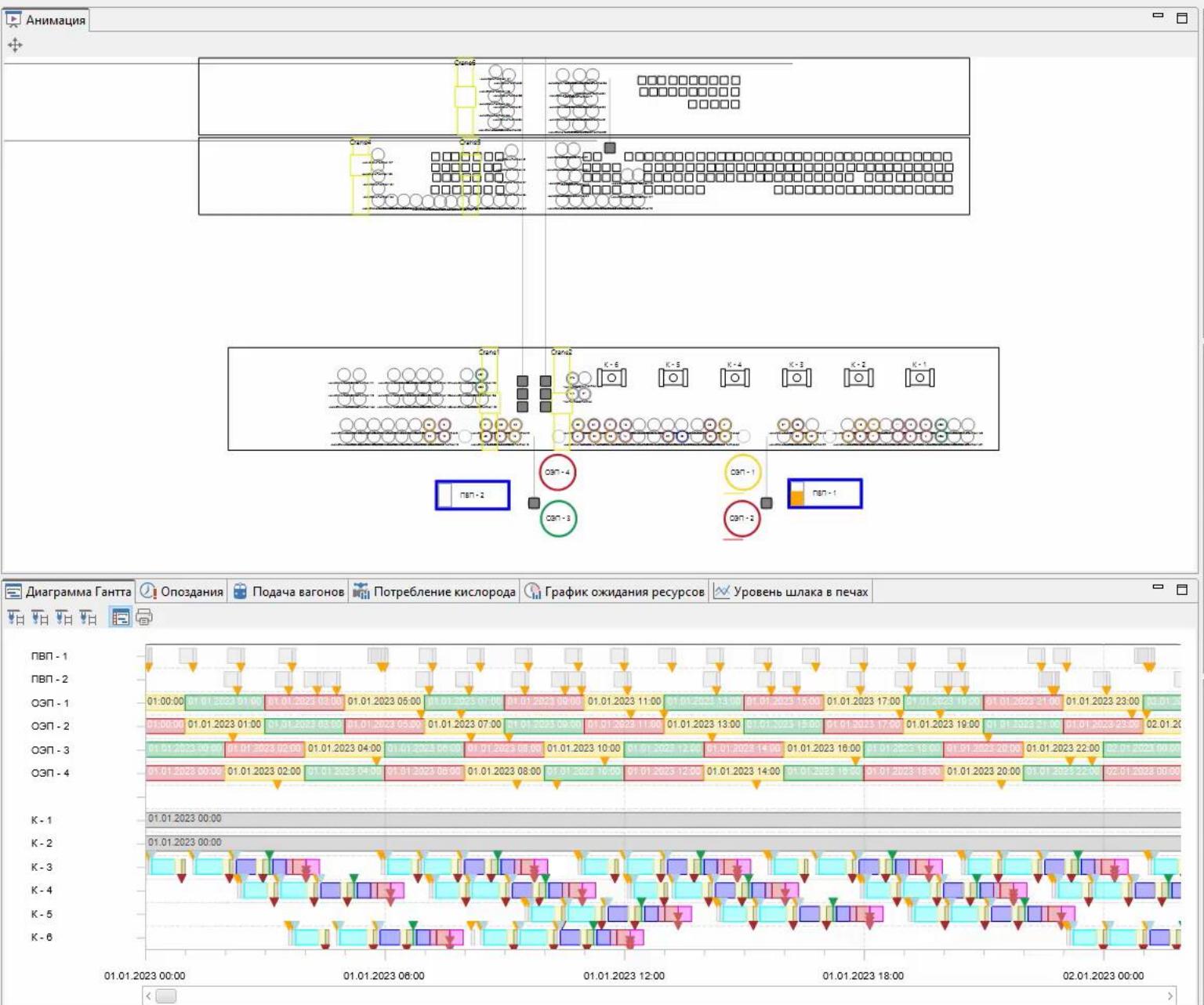
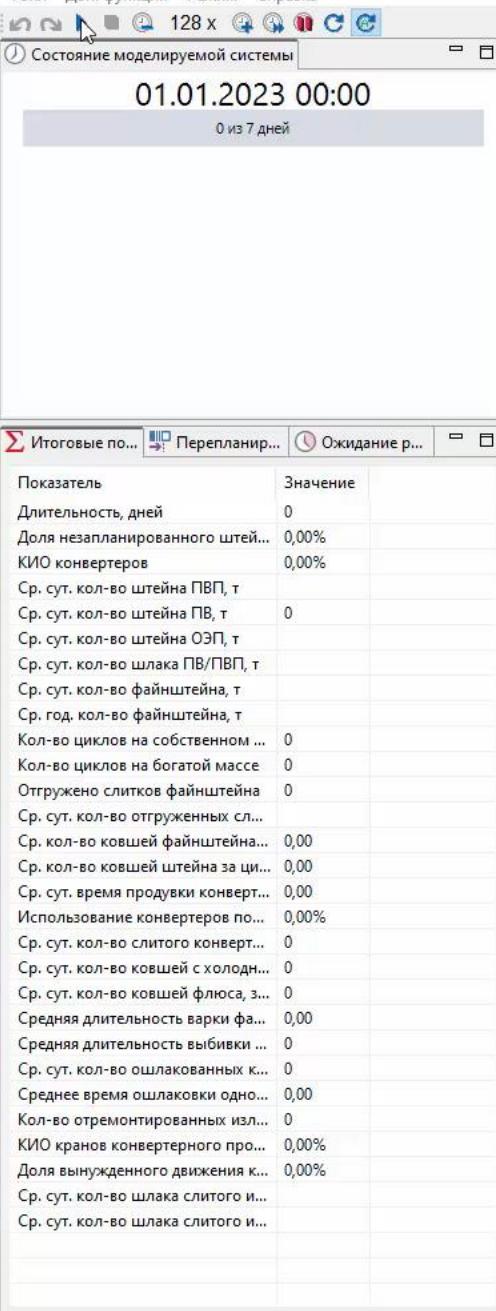
Что еще можно делать с помощью модели

- С помощью созданной системы имитационного моделирования проверить гипотезы расшивки выявленных ограничений для достижения целевых показателей производства файнштейна

Этапы выполнения проекта



Время, месяцы, 2022 год



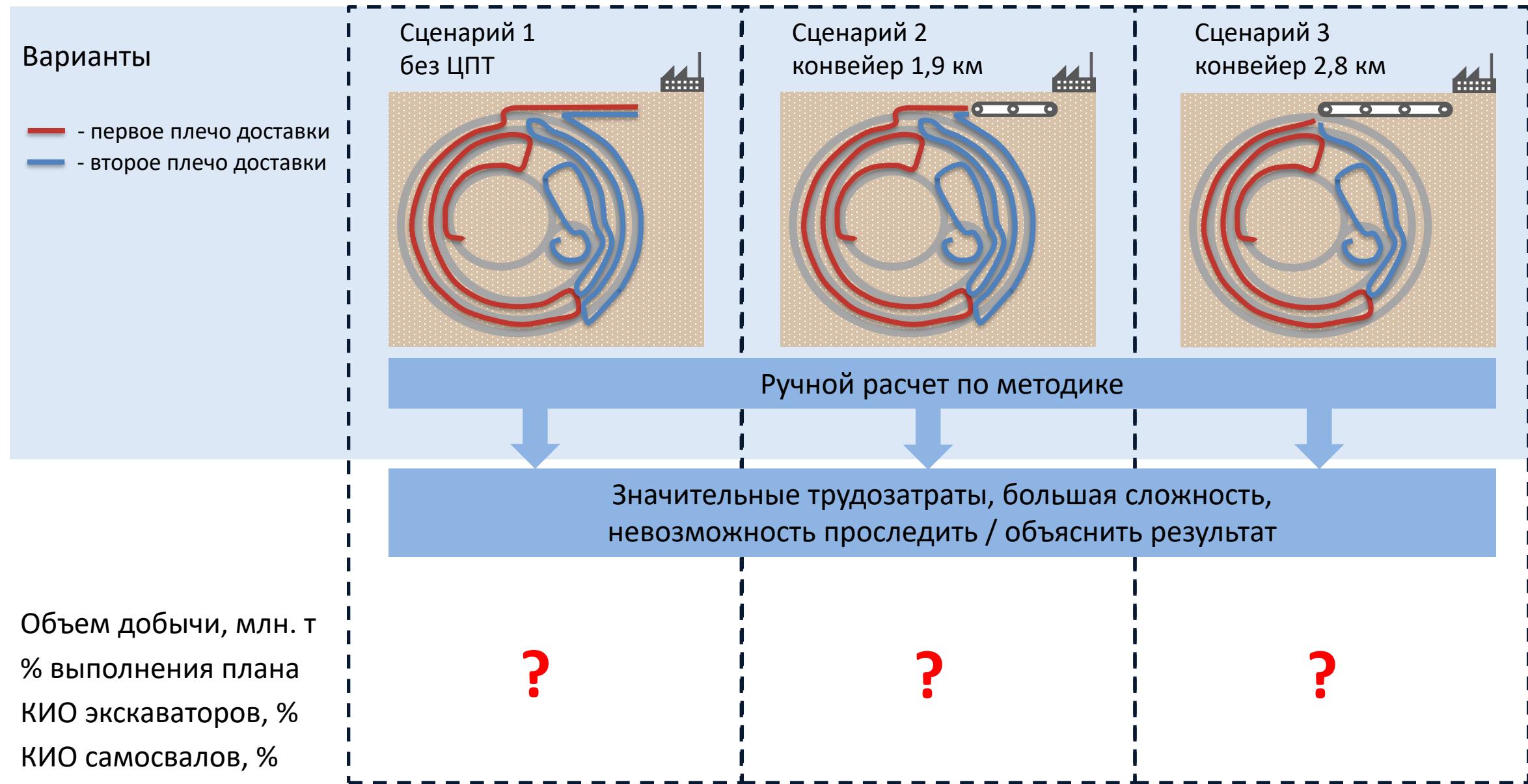
Кейс 3. Обоснование стратегических решений в горнорудной промышленности с помощью MineTwin



Принятие решений – неотъемлемая часть ежедневной работы руководителей на всех уровнях организации в горно-рудной промышленности

- Сколько бульдозеров, экскаваторов и самосвалов необходимо для выполнения плана?
- Сколько будет необходимо самосвалов при переходе на ЦПТ?
- Как изменится качество шихтовки при переходе на ЦПТ?
- Насколько строительство скипового подъема позволит сократить парк оборудования?
- Как повлияет на производительность рудника применение различных графиков работы оборудования?

Ручное сравнение вариантов организации работы карьера трудозатратно



Начальная страница Редактор сценария

Развернуть Свернуть Проверить Запустить Расчет парка Расчет парка Ср.

Сценарий (01.01.24 - 01.02.24)

- Карта (16 узлы, 8 ребра)
- Горная масса
- Грузопоток
- Типы подвижного оборудования
- Подвижное оборудование
- Расписания
- Планы
- 3D-объекты

Материалы

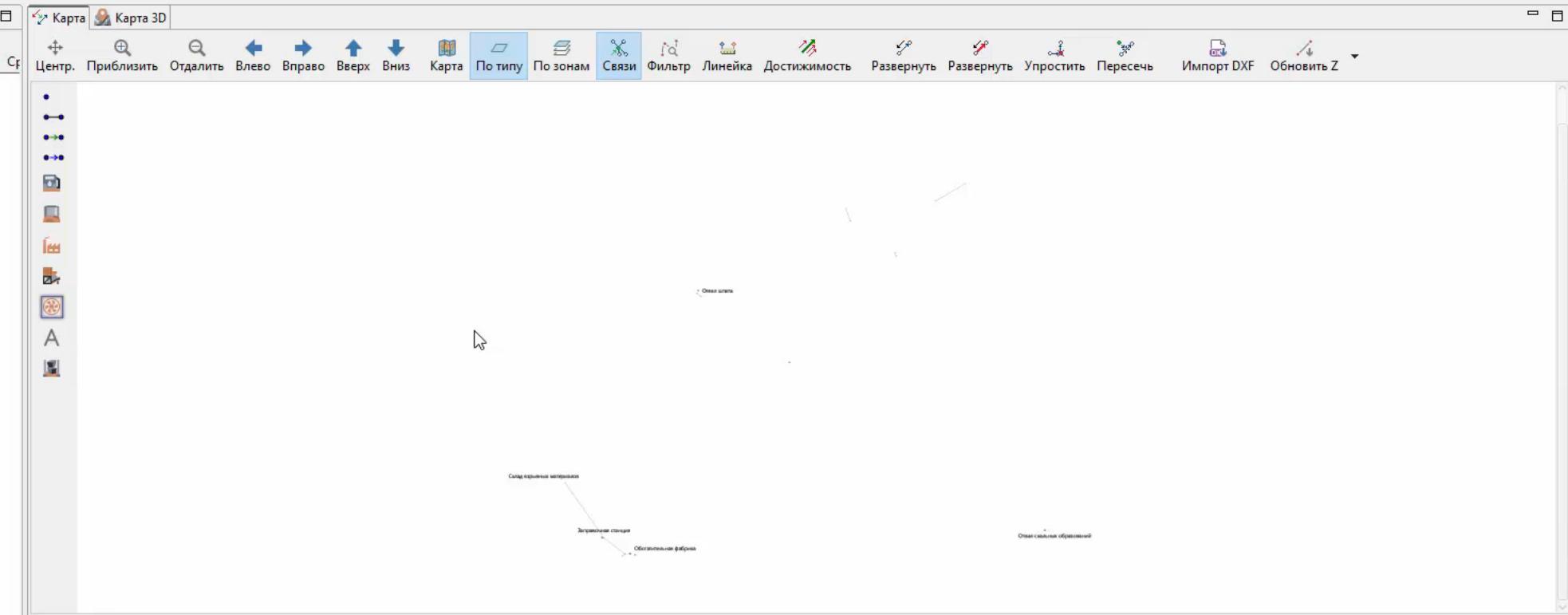
Идентификатор	Название	Тип материала
Апатит	Апатит	Полезное ве...
Прочие включения	Прочие включения	Порода

Свойства

Апатит (Материал)

Основные

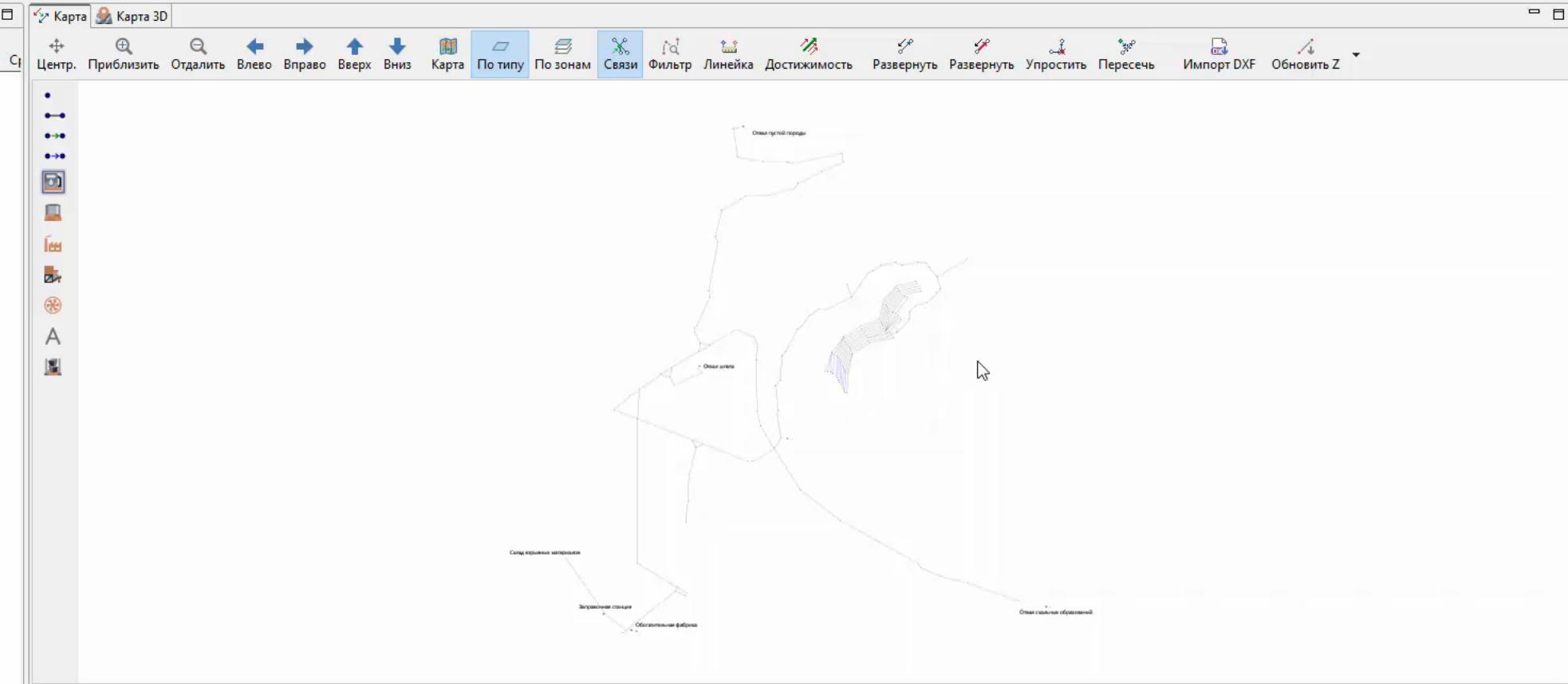
Идентификатор	Апатит
Название	Апатит
Тип материала	Полезное вещество





Начальная страница Редактор сценария

- Развернуть Свернуть Проверить Запустить Расчет парка Расчет парка Сценарий (01.01.24 - 01.02.24)
 - > Карта (181 узлы, 238 ребра)
 - > Горная масса
 - Грузопоток
 - Места разгрузки (5)
 - Хранилища (1)
 - Смешиватели (0)
 - Дробилки (0)
 - Конвейеры (0)
 - Перерабатывающие фабрики (0)
 - Типы подвижного оборудования
 - Подвижное оборудование
 - Расписания
 - Планы
 - 3D-объекты



Свойства

Сценарий №0 (Сценарий)

Основные	Идентификатор	Сценарий №0
Планирование	Название	Сценарий №0
Для экспертов	Дата начала	01.01.2024 00:00
Карта	Дата окончания	01.02.2024 00:00
Затраты	Моделировать заправку оборудования	<input type="checkbox"/>
	Описание	<div style="height: 100px;"></div>

1.0 x 744,0 01.02.2024 00:00 RT: 5,7

Статус эксперимента

01.02.2024 00:00
Смена 2

Промоделировано 31 из 31 дней

План добычи: 45,2К т/день, 16,5М т/год
Выполнение плана добычи по массе: -14%

Выполнение плана добычи по содержанию: -14%

27,6 км дорог
13 Блоки, 5 активны сейчас
5 мест разгрузки, 2 с рудой сейчас

10 СБУ, 93% КТГ, 30% КИО
1 Зарядные машины, 93% КТГ, 1% КИО
10 Самосвалы, 71% КТГ, 70% КИО
3 Экскаваторы, 93% КТГ, 52% КИО

Анимация | Карта 3D | Расписание

01.02.2024 00:00

Кумулятивный график, т

25.01.00:00 26.01.00:00 27.01.00:00 28.01.00:00 29.01.00:00 30.01.00:00 31.01.00:00 01.02.00:00

Доступно: Забурено
Заряжено: Взорвано
Погружено в самосвалы: Выгружено в местах разгрузки
Подано на фабрику: План

Статистика

	Сут...	Зат...	Са...	СБУ	Экс...	Зар...	Бул...	Пое...	Др...	Ко...	Пер...	Хра...	Бл...	Мес...	См...	Мар...	Зад...
Добыча накоп. итогом	1 208 495																
План накоп. итогом	1 400 000																
Отклонение от плана	-13,68%																
ГПР накоп. итогом	0																
План ГПР накоп. итогом	0																
Отклонение от плана ГПР	+0,00%																
Всего добыто	1 208 495																
ПИ накоп. итогом	241 699																
План ПИ накоп. итогом	280 000																
Отклонение ПИ	-13,68%																
Средний объем НЗП, т	373 518																
Ср. время добычи 1 т, дней	15,50																
Общая доступность, %	83,80%																
Доступность самосвалов, %	70,75%																
Доступность буровых маш...	93,18%																
Доступность экскаваторов...	92,80%																
Доступность зарядных ма...	93,43%																
Общая доля времени прос...	6,62%																
Доля времени простоя ША...	5,91%																
Доля времени простоя БМ...	0,00%																
Доля времени простоя экс...	32,76%																
Доля времени простоя зар...	0,00%																
Общий КИО, %	45,86%																
КИО самосвалов, %	69,74%																

Сут... Зат... Са... СБУ Экс... Зар... Бул... Пое... Др... Ко... Пер... Хра... Бл... Мес... См... Мар... Зад...

Дата	Доступн...	Забурен...	Взорван...	Погру...	Выгру...	Подан...	План	Качест...	План ...	Кол-во...	Кол-во...	Объем...	Добыч...	План н...	Откл...	Доб...
01.01.2024	1 582 014	1 582 014	1 582 014	1 209 595	1 208 495	0	1 400 000	20,00%	20,00%	0	5 499	5 537 442	1 208 495	1 400 000	-13,68%	0

Кумул...

ГПР 6...

Время ...

% Измен...

Измен...

Буфер ...

Зоны ...

Кумулятивный график ГПР, т

25.01.00:00 26.01.00:00 27.01.00:00 28.01.00:00 29.01.00:00 30.01.00:00 31.01.00:00 01.02.00:00

Доступно: Забурено
Заряжено: Взорвано
Погружено в самосвалы: Выгружено в местах разгрузки
План

Длина доставки, м

Route	Length (m)	Percentage (%)
3.00K - 3.50K	~60	~60%
3.50K - 4.00K	~63	~63%
4.00K - 4.50K	~63	~63%
4.50K - 5.00K	~63	~63%
5.00K - 5.50K	~63	~63%
5.50K - 6.00K	~66	~66%
6.00K - 6.50K	~100	100%
6.50K - 7.00K	~35	~35%



Начальная страница Редактор сценария

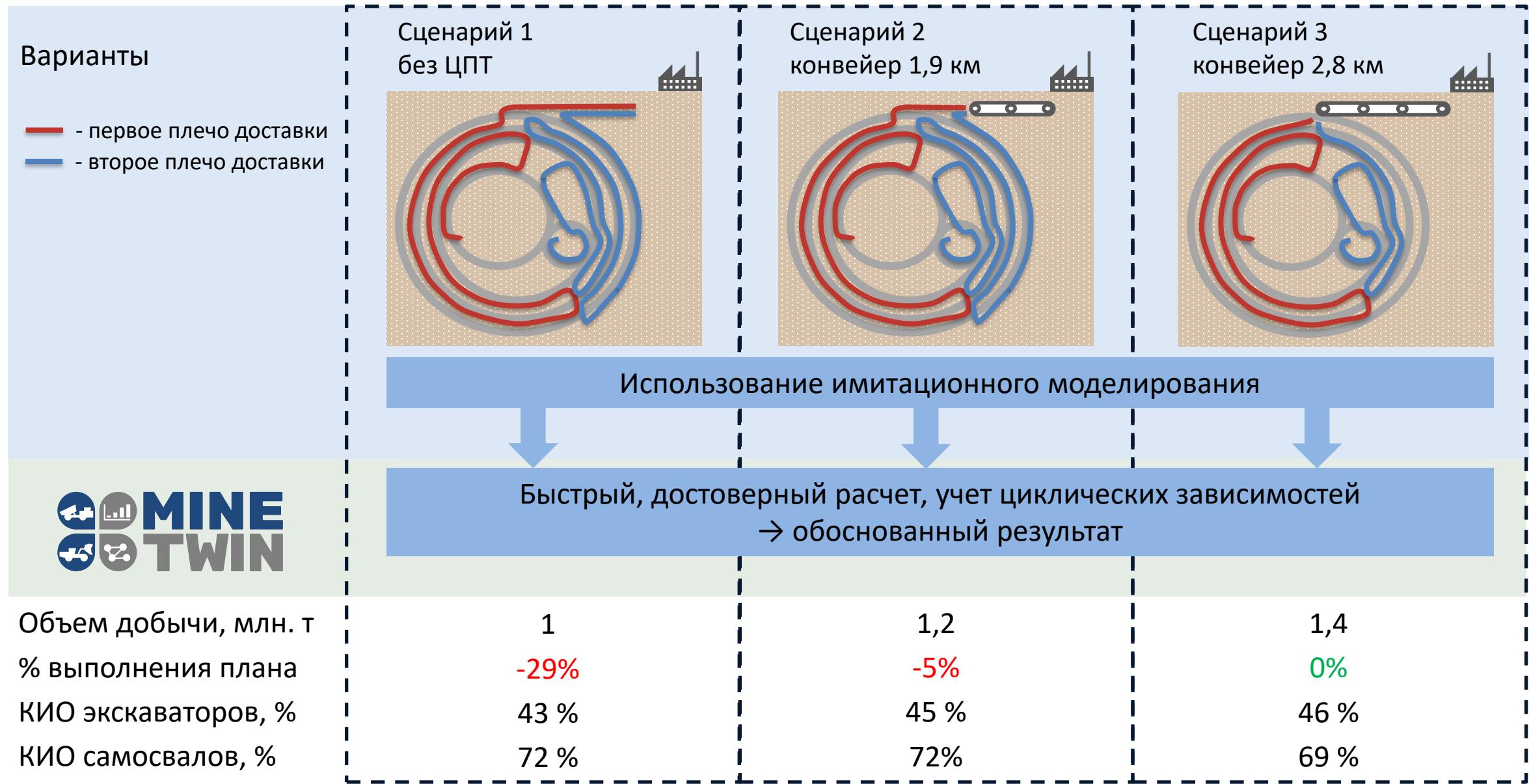
Развернуть Свернуть Проверить Запустить Расчет парка Расчет парка Ср

Карта Карта 3D

Центрировать Приблизить Отдалить Влево Вправо Вверх Вниз Кarta По типу Позициям Связи Фильтр Линейка Достигимость Развернуть Развернуть Упростить Пересечь Импорт DXF Обновить Z

Свойства

Имитационная модель позволяет выполнить быстрый и достоверный расчет



Выводы

- Использование имитационных моделей для принятия оперативных и среднесрочных решений является индустриальным стандартом в горнорудной отрасли
- Такие модели позволяют учитывать циклические зависимости, сложные ограничения и вероятностные величины, которые невозможно учесть с помощью других инструментов
- Использование таких инструментов как MineTwin позволяет упростить и ускорить процесс выбора оптимального варианта организации горных работ в подземных рудниках и карьерах

**Спасибо за
внимание!**

