СамНЦ РАН, СамГТУ, Группа компаний «Генезис знаний», НОЦ «Ин

Эмерджентный интеллект мульт
технологий

тр Олегович,
РАН, проф. СамГТУ,
И НОЦ «Инженерия будущего»,
тель совета директоров
«Генезис знаний»

ВСПУ 2024, 17-20 июня 2024 г.

дение

- Главной новостью в области «Искусственного интеллекта» (ИИ) в начале 2023 года стал чат-бот ChatGPT от компании OpenAI, использующий большую языковую модель (LLM) на основе методов машинного обучения.

- Число пользователей ChatGPT уже в январе 2023 года достигло 100 миллионов, с более чем 25 миллионов пользователей в день и 615 млн. посетителей (по данным Similarweb.com).

- Возникает вопрос, являются ли нейронные сети и машинное обучение наиболее прогрессивным способом создания ИИ для будущего, которые позволят создать системы «сильного (общего) интеллекта»?

- Однако, научная дискуссия о том, что считать сильным «Искусственным интеллектом» и можно ли его измерить еще только многократно обострилась.

- Цель доклада – обсуждение возможного альтернативного подхода, который был использован при решении ряда сложных задач управления ресурсами, понимания текстов и других

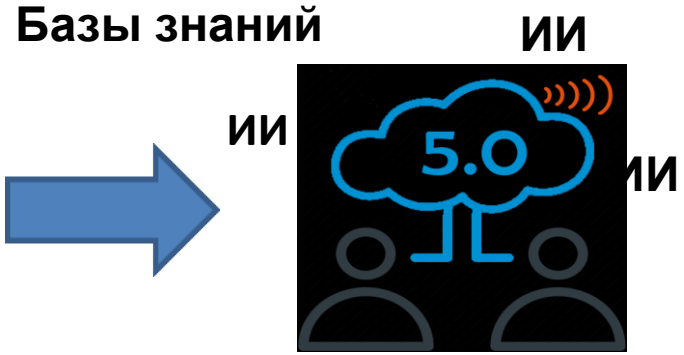
Основная гипотеза предлагаемого подхода

- **Эмерджентность** (от англ. Emergent- «возникающий, неожиданно появляющийся») в теории систем — появление в ходе взаимодействия элементов открытой самоорганизующейся системы новых свойств, не присущих её элементам в отдельности; несводимость свойств такой системы к сумме свойств ее элементов.
- **Более мягкое определение:** «Эмерджентность – способность взаимодействующих агентов справляться с задачами, превышающих возможность отдельных агентов» (Ю. Л. Словохотов, Д. А. Новиков, Распределенный интеллект мультиагентных систем. Ч. 1. Основные характеристики и простейшие формы, Пробл. управл., 2023, выпуск 5, 3–22).
- **Основная гипотеза нашей работы** состоит в том, что сильный «Искусственный интеллект (ИИ)» в будущем должен быть построен как природо-подобный, самоорганизующийся и эволюционирующий коллективный интеллект, способный самообучаться и менять свой собственный исходный код.
- Именно такой интеллект мы будем называть **сильный «Эмерджентный ИИ» (ЭИ),** подчеркивая самоорганизацию как основной принцип его построения и отличая его от других видов роевого, распределенного и коллективного интеллекта**.**
- **В качестве методической основы ЭИ** предлагается рассматривать теорию сложных адаптивных систем (И.Прижогин, 1977), базирующаяся на неравновесной термодинамике в открытых самоорганизующихся системах с протоком энергии, в которых возникают автокаталитические цепные реакции, образующие «неустойчивые равновесия» или «устойчивые неравновесия».
- Первый шагом к ЭИ может стать использование **мультиагентных технологий с виртуальным рынком** (как предшественником термодинамической модели) для моделирования процессов самоорганизации и решения сложных задач управления ресурсами, понимания текстов, кластеризации, проектирования и т.д.
- **Эволюция в ЭИ** может базироваться на использованием онтологий и связанных инструментов**,** дающих возможность вручную или автоматически извлекать знания и изменять правила принятия решений агентов в ходе работы ЭИ системы.
- Мы рассмотрим применения этой концепции и методологии ЭИ в самых разных по своему назначению системах, чтобы показать возможный универсальный характер предлагаемого подхода..

пути к Industry 5.0 – коллективному интеллекту «всего»!

Эволюция укладов

Цифровизация знаний и цифровые эко-системы



Сетевое управление в колониях разно-размерных ИИ

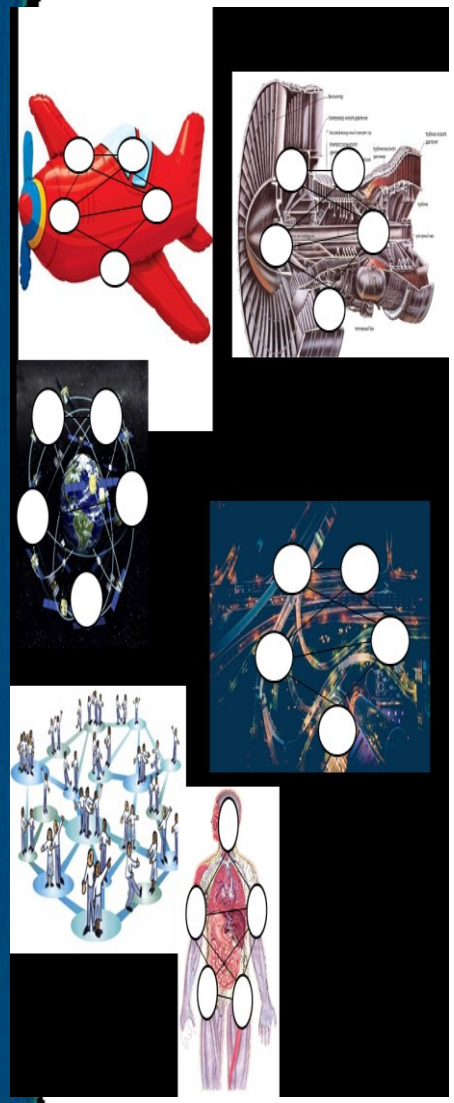
Индустрия 4.0 - решает задачи сбора данных и автоматизации физических процессов производств, а также бизнес процессов предприятий, интегрирует АСУ ТП с информационно-аналитическими и учетными системами.

Индустрия 5.0 - ориентирована на цифровизацию знаний и создание цифровых колоний и экосистем автономных цифровых двойников «всего» на базе технологий искусственного интеллекта (ИИ) для автоматизации ментальных процессов коллективного принятия решений, т.е. коллективный искусственный интеллект предприятий и группировок роботов.

Цифровой двойник (ЦД) – виртуальная модель, синхронизированная с состоянием реального объекта, позволяющая планировать и моделировать объект (прошли путь от цифровых теней – до Smart, Cognitive и Autonomous Digital Twins).

ЦД все чаще представляются **программными агентами**, способными воспринимать среду, принимать решения, взаимодействовать с себе подобными и обучаться из опыта.

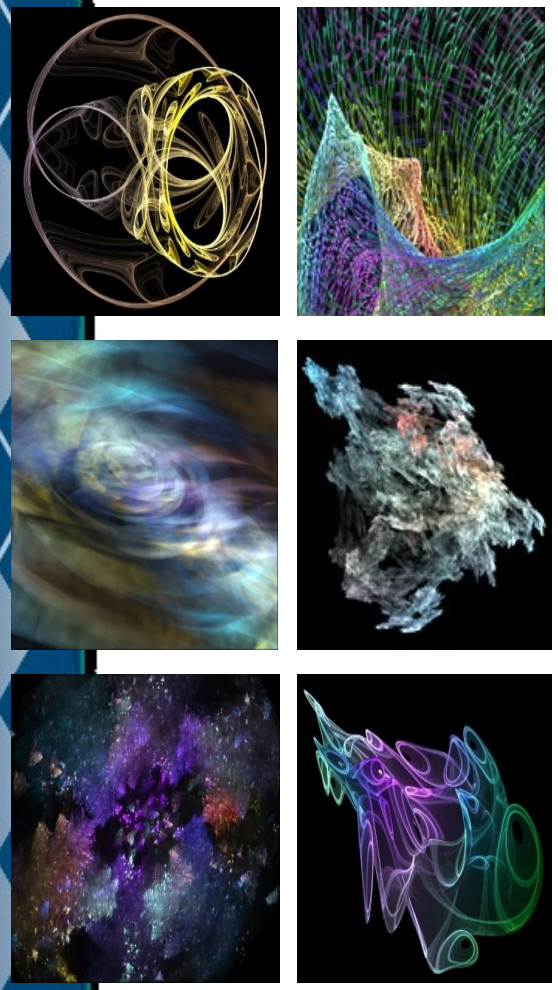
ренд от централизации и иерархий - к сетям и самоорганизации



Объект управления	Область применения	Форма модели Цифрового двойника сложного объекта
Сложные высоко-технологичные изделия	Космические аппараты Самолеты Двигатели	• Самолет как сеть >100 тыс. связанных агентов частей • Двигатель нового поколения как сеть агентов договаривающихся лопаток • Перьевое крыло из агентов перьев
Группировки роботов	ДЗЗ Связь Навигация	Рой агентов летательных аппаратов, спутников и дронов – высокая гибкость и эффективность, живучесть
Городская инфраструктура	Транспорт ЖКХ	Взаимодействие агентов автомобилей, дорог и светофоров для безопасности
Крупные организации	Управление проектами Цепочки поставок	Агенты людей, проектов, задач, РИД и др. – умное, гибкое, эффективное управление
Биологические объекты (человек, растения, др)	Медицина Сельское хозяйство	Сеть агентов органов, биоценозов и др. Управление ростом растений Лечение не органа, а организма!

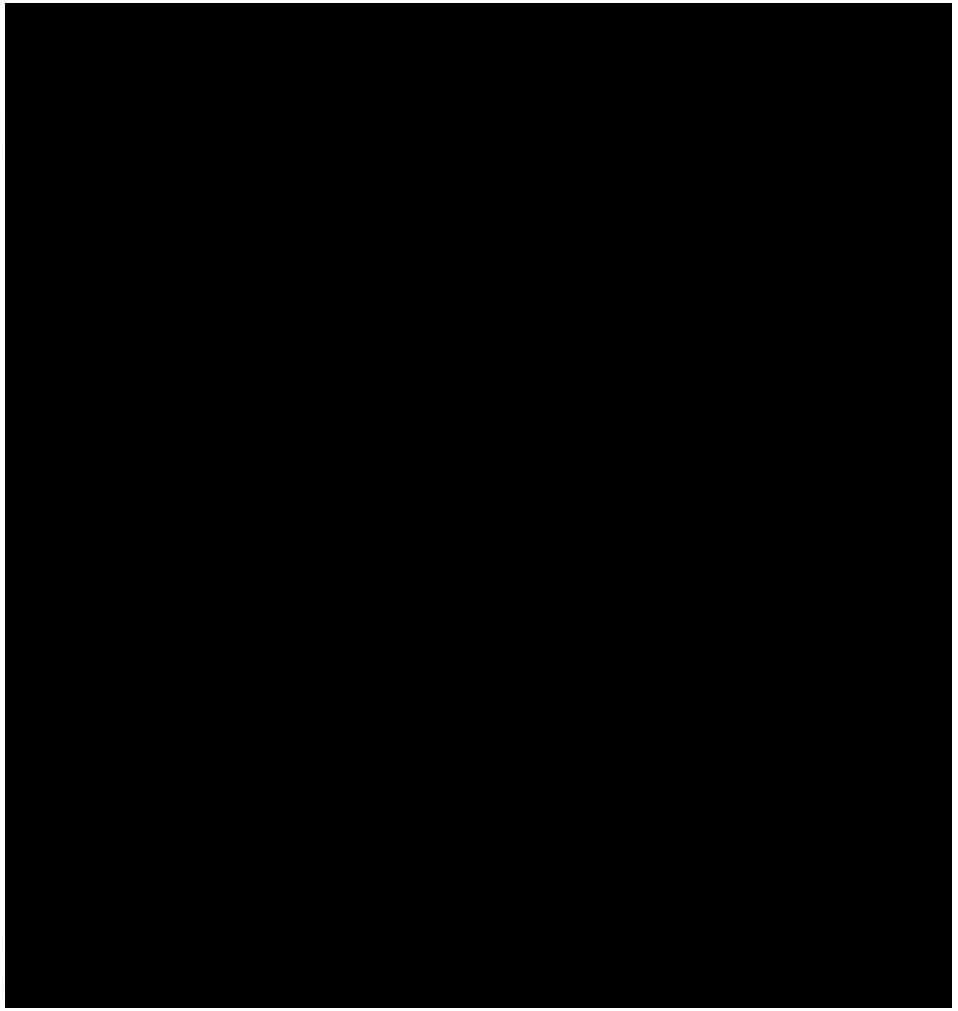
Как же управлять такими системами?

Сдвиг парадигмы в Industry 5.0 - переход к сложным, нелинейным и недетерминированным моделям ЦД, изменяющимся в ходе работы



- С эпохи Возрождения и до XX века в науке царило «линейное мышление» (результат суммарного воздействия равен сумме воздействий
- Примеры линейных закон: Ньютона (механика), Ома (электричество), Гука (теория упругости), Мальтуса (рост популяций), Максвелла (электродинамика)
- Из линейности следует детерминизм: следствие однозначно определяется причиной, существует одно правильное решение ... Но линейная наука изучает только устойчивые процессы, воспроизводимые в эксперименте.
- Однако, далеко не все явления природы линейны, устойчивы и воспроизводимы. Пример: неживые (звезды, галактики и т.д.) и, тем более, живые системы (от клетки - до человечества) находятся в состоянии, далеком от равновесия, и являются открытыми, недетерминированными и нелинейными.
- Примеры нелинейных явлений: финансовый кризис, зарождение атмосферных вихрей, образование галактик и пятен планктона в океане, мышление и творческая деятельность.
- Есть ли подходы, позволяющие создавать такие сложные системы в ИТ индустрии, пригодные для решения широкого спектра различных задач и построения моделей ЦД сложных объектов?

Самоорганизация и эволюция как фундаментальные принципы природы, определяющие нелинейные и недетерминированные явления



- О происхождении жизни мы еще много не знаем, но же известно следующее:
- **В до-историческом океане на Земле** было много аминокислот, растворенных в теплой воде, куда поступала энергия от молний и извержения подводных вулканов.
- В одном из известных экспериментов “Миллера-Юри” было обнаружено, что аминокислоты и некоторые протеины могут формоваться из базовых элементов в условиях первичной Земли.
- **Было показано, что все 20 важнейших для начала жизни протеинов могут появляться таким образом.**
- В какой то момент (мы пока не знаем когда и как!) достаточно сложные протеины появились, которые начали воспроизводить и копировать себе.
- Такие протеины, как было показано, могут оказываться в жировых пузырях, которые могут рассматриваться как первичные клетки, в перспективе способные к делению.

Основатели теории сложных адаптивных систем и неравновесной термодинамики

Илья Пригожин - бельгийский химик, русский по происхождению, получивший Нобелевскую премию по химии в 1977 за открытие неравновесной термодинамики.

Второй закон термодинамики гласит, что физические системы необратимо обращаются в хаос. **Однако, классическая термодинамика не объясняет как появляются сложные системы из состояния хаоса и как они себя поддерживают.**

Пригожин утверждает, что открытые нелинейные системы, получающие энергию и материю извне, могут проходить **периоды нестабильности и самоорганизации**, приводящие к построению более сложных систем, чьи характеристики не могут быть заранее предсказаны.

Результатом стала теория сложных адаптивных систем, важнейшим открытием которой стали **автокаталитические реакции** в самоорганизующихся системах.

Стюарт Кауфман – американский биолог и врач, изучавший происхождение жизни на Земле.

Известен гипотезой, что сложность биологических систем организмов обусловлена не Дарвинскими принципами природного отбора, **а самоорганизацией и неравновесной динамикой**, как изложено в его книге «Origins of Order (Происхождение порядка)» (1993).

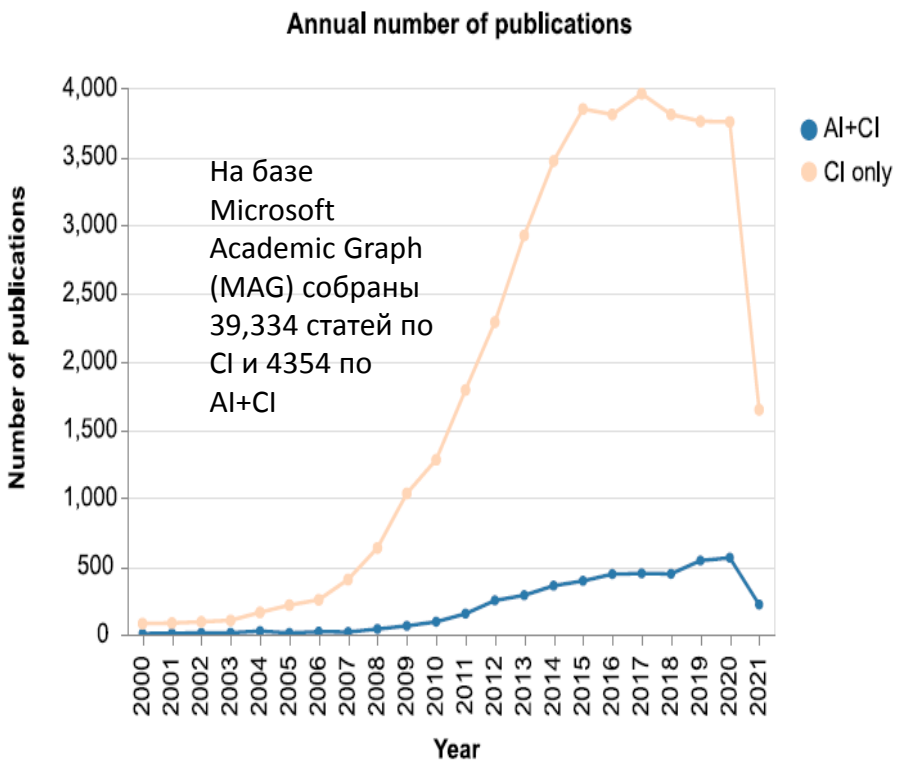
Под самоорганизацией (спонтанным порядком) в его трудах понимается процесс, формирующий порядок из локальных взаимодействий частей изначально неупорядоченной системы.

Недавние исследования показали, что клетки в организме человека – это аттракторы (устойчивые неравновесия).
Стюарт также показал, что так формируются полимеры, в том числе, пептиды, обеспечивающие репродукцию сложных молекул.

Stuart Kaufmann, At Home in The Universe: The search for the laws of self organization and complexity, New York: Oxford University Press, 1995

Ландшафт исследований по «Коллективному интеллекту»

Aleks Berditchevskaia, Eirini Maliaraki, Konstantinos Stathoulopoulos. **A descriptive analysis of collective intelligence publications since 2000, and the emerging influence of artificial intelligence** - Collective Intelligence, August-September 2022, pp 1–12. DOI: 10.1177/26339137221107924



Коллективный интеллект (CI): вся литература по коллективному разуму, напрямую не связанная с ИИ. В частности, для CI собраны публикации по темам: «краудсорсинг», «гражданская наука», «коллективный интеллект», «мудрость толпы», «коллективная мудрость», «социальные вычисления» и другие.

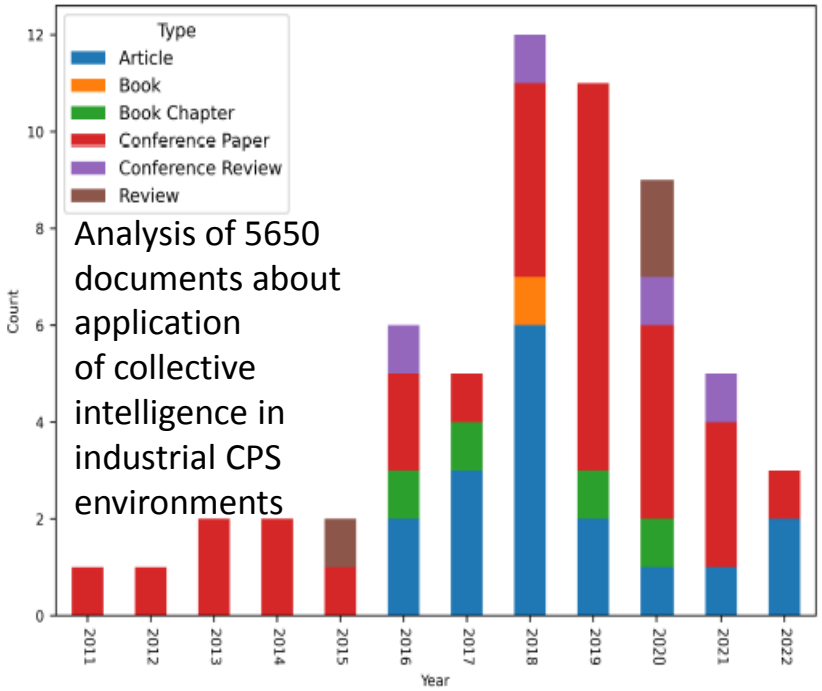
Искусственный интеллект (AI): вся литература по искусственному интеллекту, не относящаяся к CI. Для сбора публикаций по ИИ использованы следующие направления исследований: «глубокое обучение», «машинное обучение», «обучение с подкреплением» и «искусственный интеллект».

Термодинамической модели ЭИ в понимании проф. И.Пригожина пока не удалось обнаружить

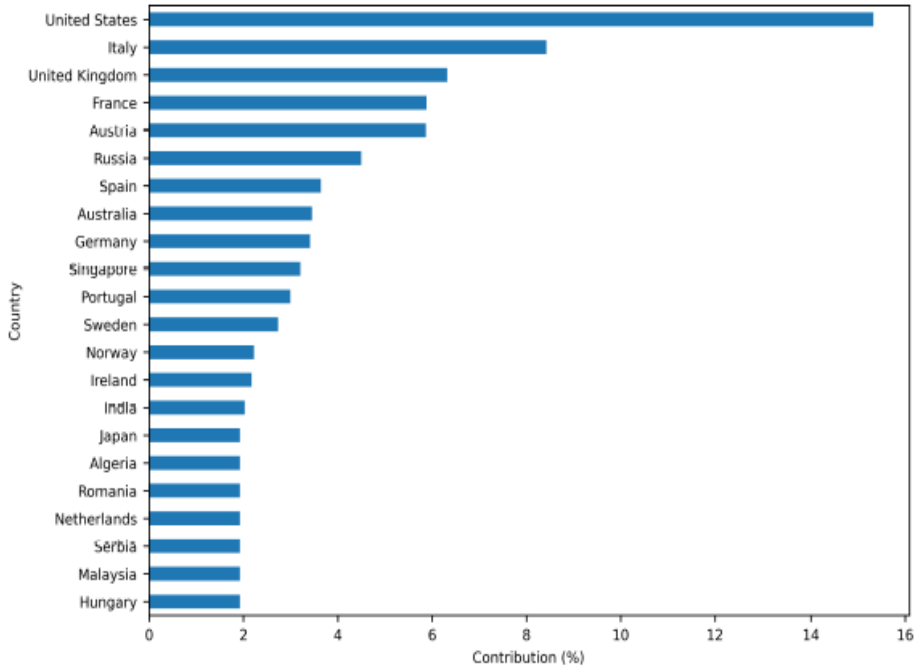
Вместе с тем, в литературе уже появляются отдельные статьи по «Эмерджентному интеллекту», но на других принципах, для управления роями роботов, трафика в телекоммуникационных сетях и т.д.

Ландшафт «Коллективного интеллекта» самоорганизующихся кибер-физических систем / цифровых двойников

Leitão, P.; Queiroz, J.; Sakurada, L. Collective Intelligence in Self-Organized Industrial Cyber-Physical Systems. Electronics 2022, 11, 3213. https://doi.org/ 10.3390/electronics11193213



Analysis of 5650 documents about application of collective intelligence in industrial CPS environments

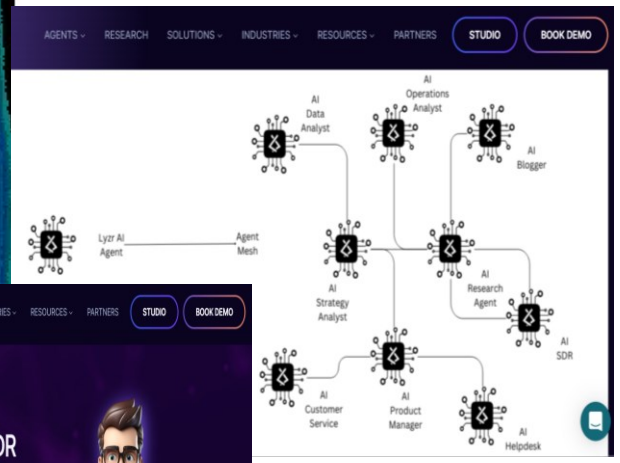


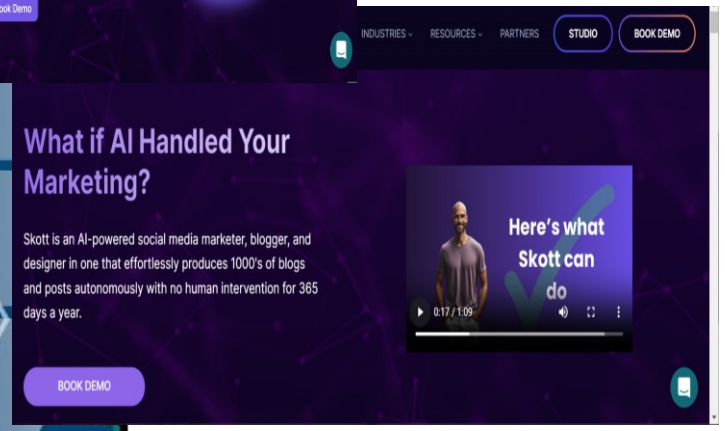
Основное внимание в этом исследовании уделено коллективному искусственному интеллекту (DAI) и киберфизическим системам (CPS).

Вывод статьи в том, что ЭИ на основе CPS пока еще не вышел на передний край исследований в академических кругах и промышленных сообществах.

Ожидается, что в ближайшие годы интерес к ЭИ значительно вырастет и приобретет высокую актуальность.

Коллективный интеллект и AI Агенты предприятия: Джейсон – продавец и Скотт – маркетолог (работают 24/7)





AgentMesh - General Intelligence of the organisation's AI ecosystemот (https://www.lyzr.ai/)

Обычно продавец делает 100 звонков в день

→ Джейсон может делать 100 000 звонков в день

Обычно маркетинг нового бренда требует 12-24 месяца

→ Скотт решает эту задачу много быстрее:

- Изучает появляющиеся новые статьи каждый день
- Пишет блоги, оптимизированные под цель
- Адаптирует блоги к каналам СМИ
- Публикует блоги во всех социальных сетях и платформах

Результат от внедрения ИИ:

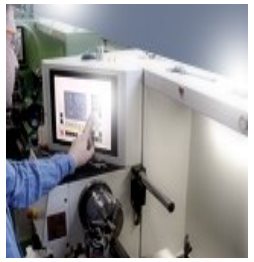
- Рост лидов на 200%,
- 240 часов экономия на контент-менеджменте,
- 90% сокращение расходов на маркетинг
- Повышение на 15% известности в сетях и т.д.

https://www.geeky-gadgets.com/microsoft-autogen-ai-agent-framework/

Рутинная автоматизация!

Сложность современных задач управления ресурсами

Управление грузоперевозками: 500 грузовиков на дороге, 100 заказов в день, горизонт: 1-5 дней, 600 точек развозки, время на заказ - 3-15 сек, критерии – прибыль, качество, стоимость и время перевозки, риски, равномерность пробега машин, режимы работы водителей, штрафы за опоздание, типы грузов и тары, время работы складов, времена стыковок и др.;



Управление фабриками: сборка двигателя – 50 тыс. деталей, 30-40 цехов, каждый цех – 150 рабочих, каждое изделие – от 10 до 300 техопераций, 10 заказов на цех в день, одно ССЗ рабочего – до 100 задач, горизонт – от дня до 6 месяцев, число задач на горизонте - до 150 тыс., время на событие – от 2 сек до 5 мин, учет техпроцессов, умений рабочих, брака, наличие на складе и т.д.;

Управление цепочками поставок: до 10 тыс. товаров, 2 тыс. узлов в сети (фабрики, магазины, склады), 1 тыс. каналов доставки, 2 тыс. заказов в день, горизонт – от 1 мес. до 1 года; обработка 1 события - от 20 сек. до 15 мин., учет прогнозов продажи, емкость каналов, скорость продажи, цены заказов, штрафы за отклонение, стоимости производства, транспорта, хранения, структура сети, минимальный объем партии и др.

Управление мобильными бригадами: число событий в день: от 50 до 250 заявок в период проброса, в среднем около 100 заявок в день; число ресурсов: 43 бригады; горизонт планирования: период работы смены (8-12 часов); время на события – до 1 минуты, критерии: минимальный пробег, как можно больше заявок выполнить и др.

Задача многокритериального планирования и оптимизации ресурсов в реальном времени

з проблем управления предприятиями показывает, что управление ресурсами - сложная критериальная задача, требующая согласованного решения по ситуации во взаимодействии с еством участников этого процесса (заказчиков, финансистов, производственников, логистов, их и др.), имеющих свои интересы, критерии принятия решений, предпочтения и ограничения.

римеры критериев планирования, важность которых может меняться от ситуации:

- Обеспечить качество выполнения работ
- Выполнить все заказы в срок
- Минимизировать стоимость исполнения заказов
- Равномерная загрузка ресурсов
- Минимизировать риски
- Выдать рабочим зарплату в конце месяца
- Обеспечить профилактику и ремонт оборудования

В ходе решения задачи не только важность, но даже состав критериев могут меняться для каждого участника.

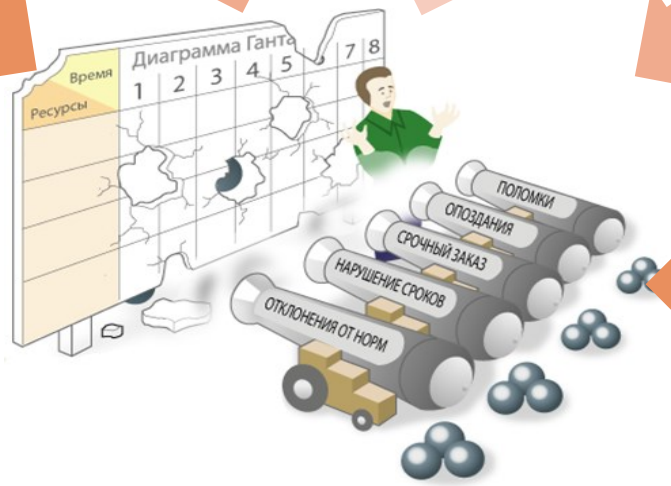
План должен адаптивно пересматриваться в виду частого появления непредвиденных событий

Исполнители опаздывают с выполнением работ или не выходят на работу

Оборудование ломается или встает на профилактический ремонт

Меняются приоритеты у уже запланированных заказов

Изменения в организации или технологии выполнения заказов



Поступают срочные заказы на продукцию или услуги

Смежники опаздывают с поставкой комплектующих и другие

Развитие мультиагентных технологий

Начало в 1980-ые годы …

Объектно-ориентированное программирование, искусственный интеллект, параллельные вычисления, телекоммуникации

Ключевое понятие: агент - программный объект, способный воспринимать ситуацию, принимать решения и взаимодействовать с себе подобными

Мультиагентная система – состоит из множества программных агентов, позволяющих решению проблемы самоорганизовываться

Традиционно базировались на логике (M.Wooldridge, etc)

Наиболее перспективный подход bio-inspired (Van Brussel, Paulo Letao, V.Maric, 1998):

- Агент заказа
- Агент продукта
- Агент ресурса
- Штабной агент

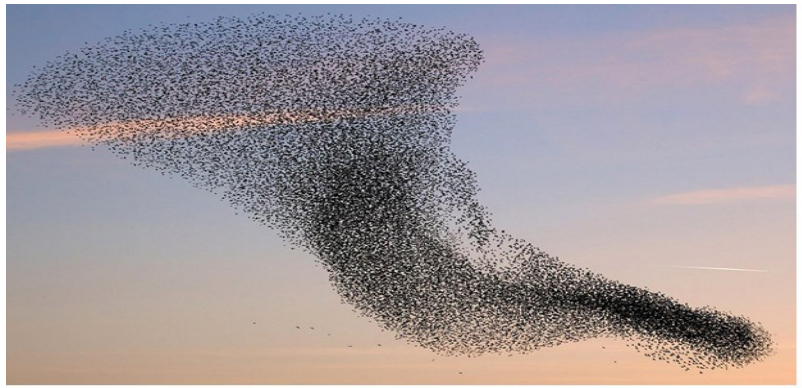
Дополнительные классы агентов задач (операций) + функциональность агента целостности + протоколы переговоров по методу компенсаций, включая горизонтальные и вертикальные переговоры

Первые применения: е-коммерция, текущие применения: логистика, извлечение знаний, понимание текста и другие

Будущее: самоорганизующийся Web-Intelligence

ЭИ наследует идеи роя пчел и колонии муравьев из биологии …

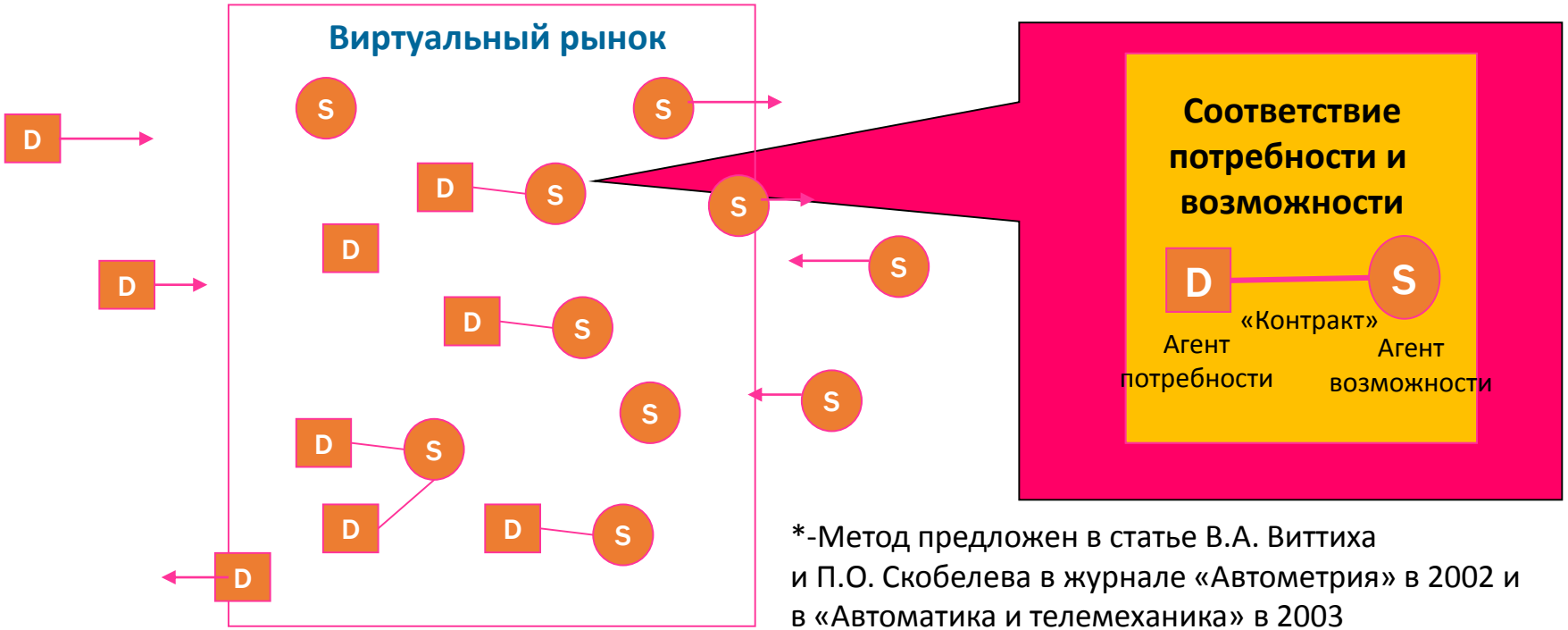
ɔироде - это сообщество достаточно примитивных организмов (рой пчел, колония муравьев и др.), все действия которых сводятся к элементарным инстинктивным реакциям.



нако, эти особи вместе, действуя согласованно, образуют сложную самоорганизующуюся систему с природо-подобным ентным (роевым) интеллектом», многократно преумножающую индивидуальные возможности особи и позволяющую решать задачи выживания, защиты границ, воспроизводства и пропитания в постоянно изменяющихся условиях.

… и развивает подход виртуального рынка

анный поиск соответствий между конкурирующими и кооперирующимися агентами бностей и возможностей на виртуальном рынке системы позволяет строить решение любой ой задачи как динамическую сеть связей (ПВ-сеть), гибко изменяемую в реальном времени (*).



*-Метод предложен в статье В.А. Виттиха и П.О. Скобелева в журнале «Автометрия» в 2002 и в «Автоматика и телемеханика» в 2003

мечание: Математическое обоснование эффективности виртуального рынка как альтернативы ейному программированию см. в трудах известных математиков из Кембриджа, вышедших в 2009-2010 гг.:
.Shoham, K.Leyton-Brown. Multi-agent systems: Alghoritmic, Game Theoretic and Logical Foundations. – Cambridge versity Press, 2009: http://www.masfoundations.org.
letworks, Crowds, and Markets: Reasoning about a Highly Connected World. By David Easley and Jon Kleinberg. nbridge University Press, 2010 : http://www.cs.cornell.edu/home/kleinber/networks-book/.

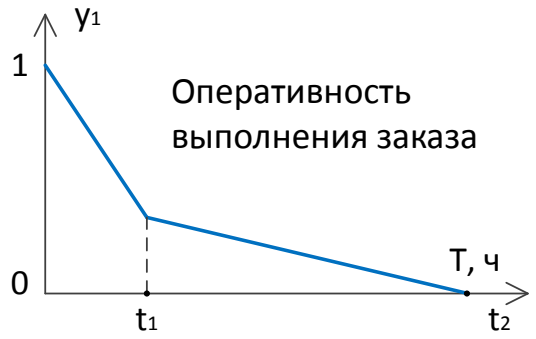
Базовые классы агентов ПВ-сети для управления ресурсами

Тип	Цели и предпочтения для функции удовлетворенности	Ограничения
Агент заказа	Быть выполненным с минимальной задержкой (c) и стоимостью (p): $Y_i = w_1\left(1-\frac{c}{c_{\text{кр}}}\right)+w_2\left(1-\frac{p}{p_{\text{кр}}}\right)$	Сроки, объем, предельная стоимость
Агент задачи: • групповой • атомарной	Быть выполненным на подходящем ресурсе в указанные сроки за минимальное время ($\tau_i = finish_i - start_i$): $Y_i = \begin{cases} 1, \tau_i < \tau_{\text{опт}} \\ \frac{\tau_i-\tau_{\text{кр}}}{\tau_{\text{опт}}-\tau_{\text{кр}}}, \text{иначе} \end{cases}$	Характеристики требуемых ресурсов и продуктов, сроки начала и окончания, взаимосвязи с другими задачами
Агент ресурса	Быть максимально загруженным, минимизировать простои и переналадки: $Y_i = \begin{cases} 0, u_i < u_{\text{кр}} \\ \frac{u_i-u_{\text{кр}}}{u_{\text{опт}}-u_{\text{кр}}}, \text{иначе} \end{cases}$, где u_i – утилизация ресурса i	Календарь работы, интервалы недоступности, правила обслуживания и переналадки, производительность
Агент продукта	Обеспечить свое хранение, минимизировать время между производством и потреблением (e): $Y_i = 1-\frac{e_i}{e_{\text{кр}}}$	Требования по хранению, время поставки или производства, время потребления
Агент целого - предприятия (подразделения)	Выявление «узких мест» в расписании и поддержка гомеостаза, управление активностью агентов системы, взаимодействие с внешними системами	Время, отводимое на планирования, глубина цепочек перестановок в расписании

Функции удовлетворенности и бонусов агентов ПВ-сети

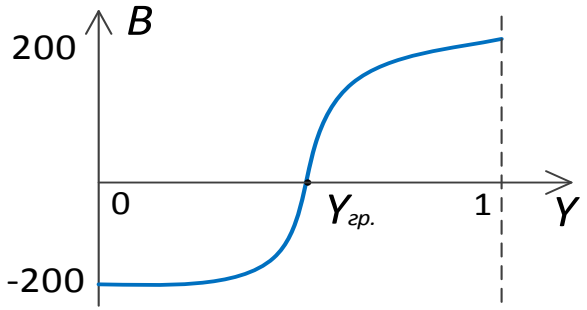
Функции удовлетворенности

$$Y_i = \sum_{j=1}^{M} w_{ij} y_{ij}, \quad 0 \le w_{ij} \le 1, \quad \sum_{j=1}^{M} w_{ij} = 1 \; \forall_i$$



Функция бонусов и штрафов

$B_i(Y_i)$



Удовлетворенность агента

- В основе работы системы лежит «виртуальный рынок», на котором агенты заказов могут покупать услуги ресурсов.
- При этом состояние агента характеризуется степенью удовлетворенности (свертка по критериям) и наличием финансовых ресурсов для улучшения удовлетворенности.
- Чем ближе состояние к требуемому идеалу, тем выше показатель удовлетворенности агента и тем больше система премирует агента.
- Виртуальные деньги при этом играют роль «энергии» для установки и перестройки связей.

Бонусы и штрафы агента

- При входе в систему агент получает сумму по тарифу на счет для приобретения услуг ресурсов.
- Бюджет расходуется агентом на поиск решения и дальнейшую перестройку расписания для улучшения уровня удовлетворенности.

Решение конфликтов

- В случае конфликта один агент может предложить другому компенсацию за уступку своего места в плане.
- Второй агент уйдет из конфликта и освободит свое место если только сумма ухудшений будет меньше чем сумма улучшений для системы в целом.

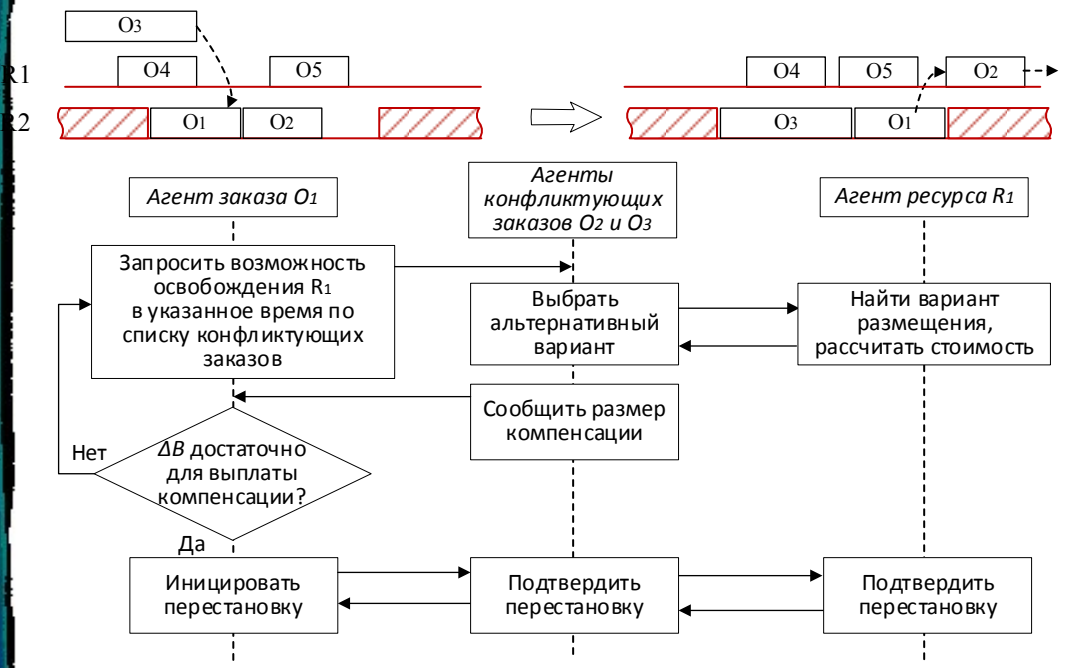
Метод компенсаций для принятия решений агентами при разборе конфликтов и поисках баланса (консенсуса)

- Цепочка перестановок считается успешной, если агент активного заказа a_k может компенсировать потери всем конфликтующим агентам $\{a_i \mid i \neq k,\ plan'_k \cap plan_i \neq \emptyset\}$ за счет достигаемого прироста ΔB_k

$$\Delta B_k \geq \sum_{i \neq k}^{n} \Delta B_i$$

- Процесс перестройки завершается по условию достижения **«конкурентного равновесия»** (консенсуса):

$$\Delta B_k + \sum_{i \neq k}^{n} \Delta B_i < 0 \quad \forall_k$$



Типы базовых операций:

- размещение задачи на свободном участке:
$$\Delta B_{task} + \Delta B_{resource} > 0;$$
- обмен задачами $task_1 \leftrightarrow task_2$ между ресурсами $resource_1 \leftrightarrow resource_2$:
$$\Delta B_{task_1} + \Delta B_{task_2} + \Delta B_{resource_1} + \Delta B_{resource_2} > 0;$$
- вытеснение менее выгодных задач из расписания:
$$\Delta B_{task1} + \Delta B_{task2} + \Delta B_{resource} > 0;$$
- перестановка (сдвиг) задач при наличии конфликтов:
$$\sum_{t \in \{tasks\}} \Delta B_t + \sum_{r \in \{resources\}} \Delta B_r > 0.$$

Онтологии для агентов позволяют:

- Сократить перебор вариантов через разбор конфликтов по отношениям ПрО (семантике);
- Автоматически настраивать агентов на онтологическую модель предприятия и сократить сложность и стоимость разработки

Пример цепочки подвижек при разрешении конфликтов в расписании до состояния нового консенсуса

Событие: приходит Заказ 0-1

2. Конфликт Заказа 0-1 и 1-2: заказ 1-2 делает попытку уйти на другой день

Загрузка ресурсов	День 1	День 2	День N
Ресурс 1	Заказ 1-1	Заказ 2-1	Заказ M-1
Ресурс 2	Заказ 1-2	Заказ 2-2	
Ресурс 3	Заказ 1-3	Заказ 2-3	Заказ M-3
Ресурс N	Заказ 1-N	Заказ 2-N	Заказ M-N

3. Конфликт Заказа 1-2 и 2-3: теперь 2-3 пробует найти новое размещение

4. Заказ 2-3 уходит на свободное место и вся цепочка принимается

- Новый Заказ 0-1 имеет свои сроки
- Наилучший ресурс для Заказа 0–1 будет 2-ой
- Заказ 0-1 инициирует цепочку перестановок, чтобы занять место на Ресурсе 2
- Заказ 1-2 пробует вытеснить Заказ 2-3
- Заказ 2-3 готов перейти на свободное место
- Цепочка сложилась – консенсус найден!

Определение «Эмерджентного интеллекта»

- В развитие выбранного подхода будем называть **«Эмерджентным интеллектом (ЭИ)»** способность открытой мультиагентной системы решать задачи путем выявления и разрешения конфликтов в ходе конкуренции и кооперации программных агентов на виртуальном рынке до достижения «конкурентного равновесия» (консенсуса), когда ни один из агентов более не может улучшить решение.

- **Измеримым проявлением и базовым актом самоорганизации ЭИ** будет построение цепочек согласованного принятия решений по изменению состояний агентов, спонтанно и недетерминировано возникающих как при реакции системы на непредвиденные события, так и при внутренней активности (проактивности) агентов в ходе выявления и разрешения конфликтов.

- Такой логически самозавершенный акт **коллективного согласования решений** в команде агентов можно интерпретировать как «вспышку озарения», когда решение сложной задачи вдруг само складывается в ходе разбора конфликтов, т.е. самоорганизуется.

- Именно конкуренция и кооперация сущностей с конфликтными интересами и будут определять сложность поведения ЭИ системы, а следовательно, качество и эффективность решений.

- Так открывается **диалектическая природа ЭИ**, в которой решение сложных задач осуществляется в единстве и борьбе агентов противоположностей, восходящую к буддийским первоначалам «инь и ян».

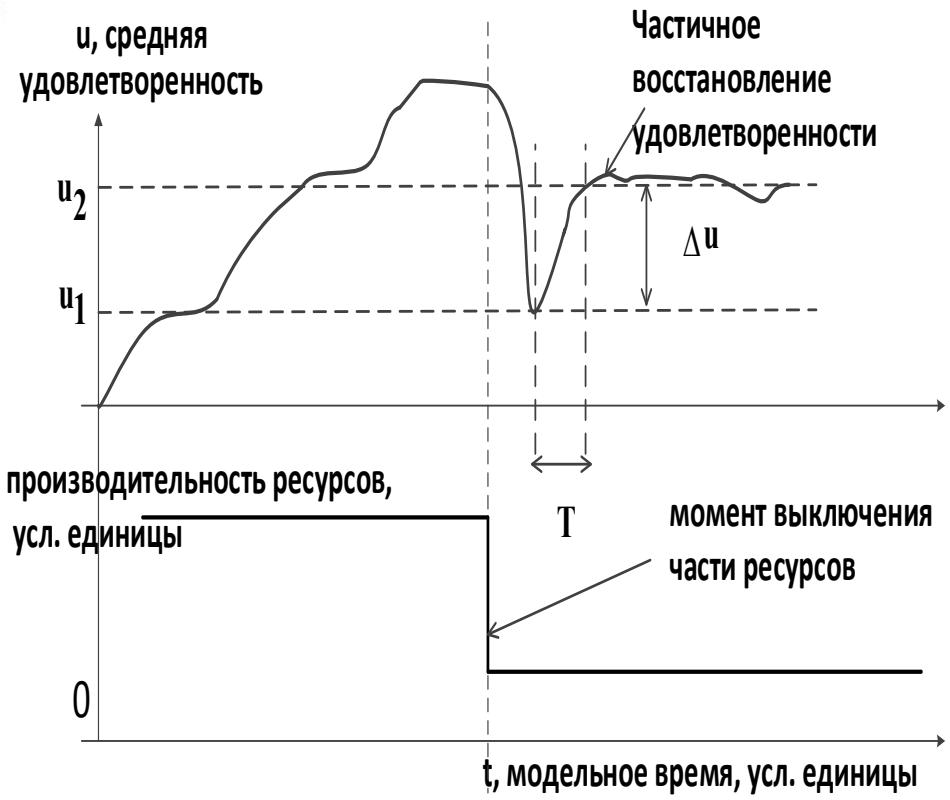
«Рой спутников» - интеллектуальная система управления группировкой малых космических аппаратов

Краткая версия: https://www.youtube.com/watch?v=B9ZMthmwsa4 (4.52 мин)

Более полная версия: https://youtu.be/vcDdMMJOupk (9.50

Измерение результатов ЭИ при реакции на событие или в проактивности

Халяев И.А. Как измерить искусственный интеллект? – ИИ и принятие решений, 2023, №1



Переходный процесс изменения связей между заказами, ресурсами, задачами и продуктами – например, по событию отключения части ресурсов завершается новым состоянием:

$$u(t) = \frac{\sum_j u_j^{task}(t) + \sum_l u_l^{res}(t)}{M(t) + N(t)}$$

где u_j^{task} – удовлетворенность агента j-й задачи, u_l^{res} – удовлетворенность агента ресурса *l*, N(t) и M(t)- число агентов задач и ресурсов.

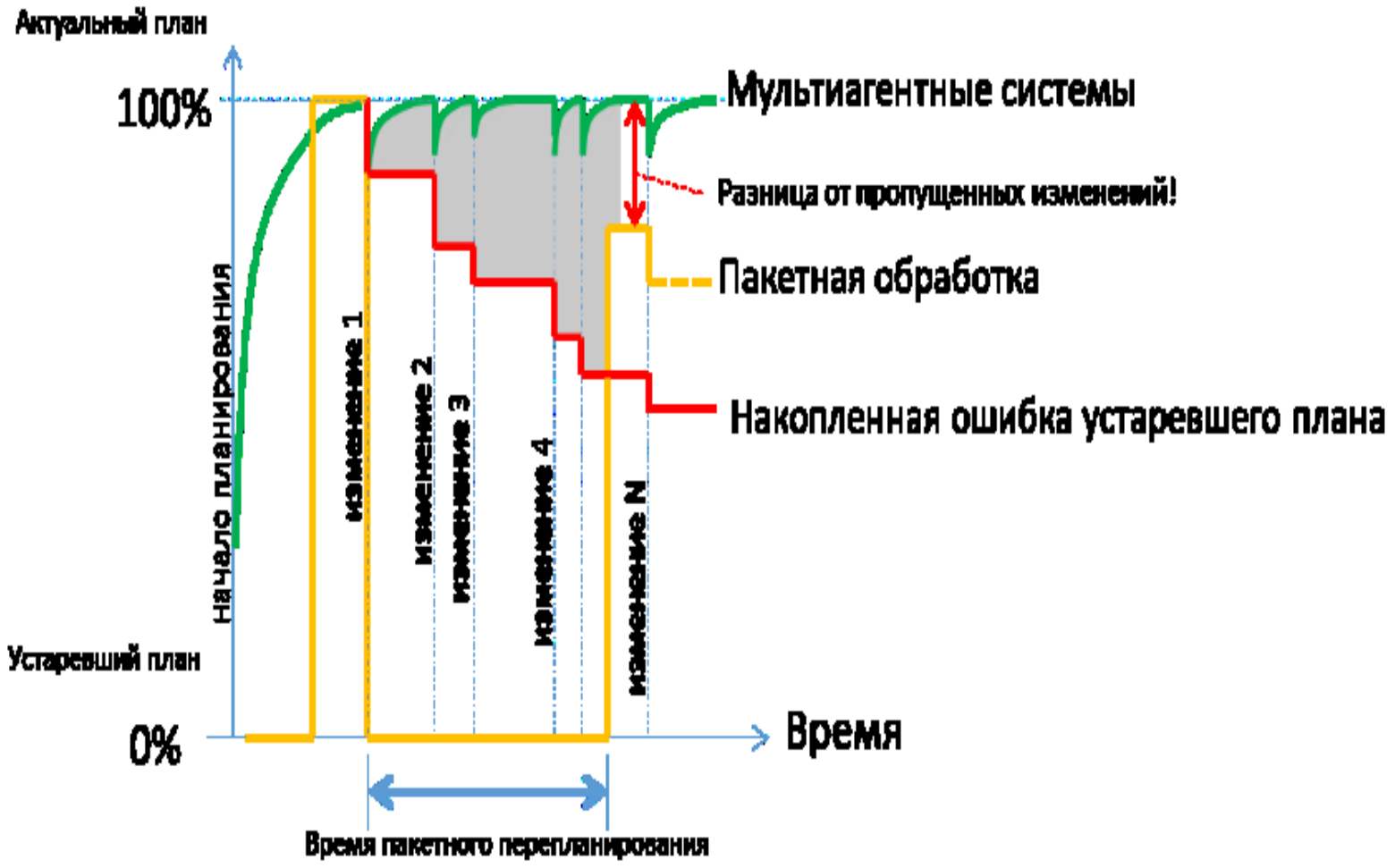
После момента максимального спада средней удовлетворенности до уровня u_1 через время T МАС приходит к новому квазиравновесному состоянию u_2.

Характеристика «силы» ЭИ для данного события:

$$\gamma = (u_2 - u_1) \cdot \frac{1}{T}$$

Подобный переходный процесс может наблюдаться не только при выходе из строя ресурсов, но и появлении новых заказов и других событиях.

Повышение эффективности предприятия за счет адаптивности ЭИ



Анализ результатов в сравнении с другими методами

Сценарий: состав модели ОГ ДЗЗ – 30 МКА. Проводилось планирование от 100 до 20000 заявок на съемку РИ с использованием различных алгоритмов планирования. Горизонт планирования в зависимости от числа заявок варьировался от 1 дня до 14 дней. При этом измерялось время, затраченное на составление плана, и значение целевой функции системы $OF = \frac{1}{N}\sum_{k=1}^{N} OF_k$.

График зависимости значения целевой функции системы от количества заявок

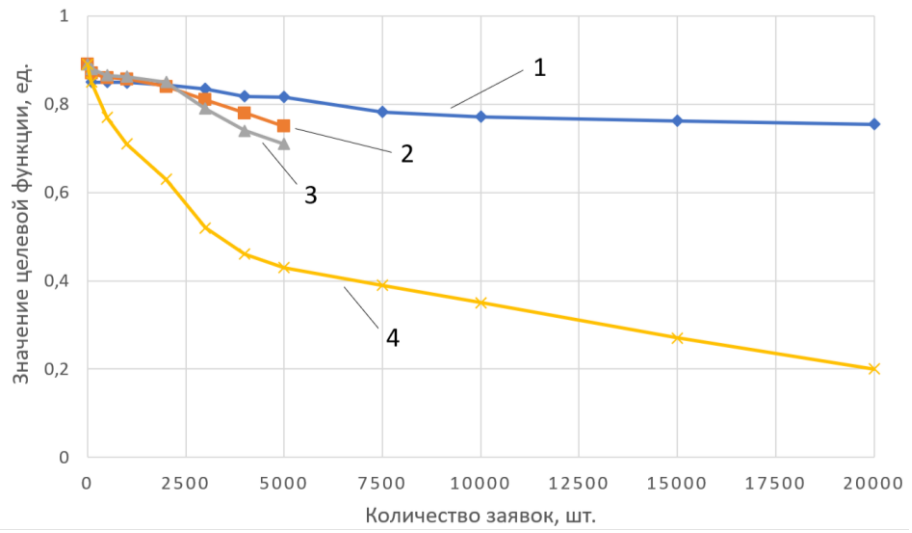
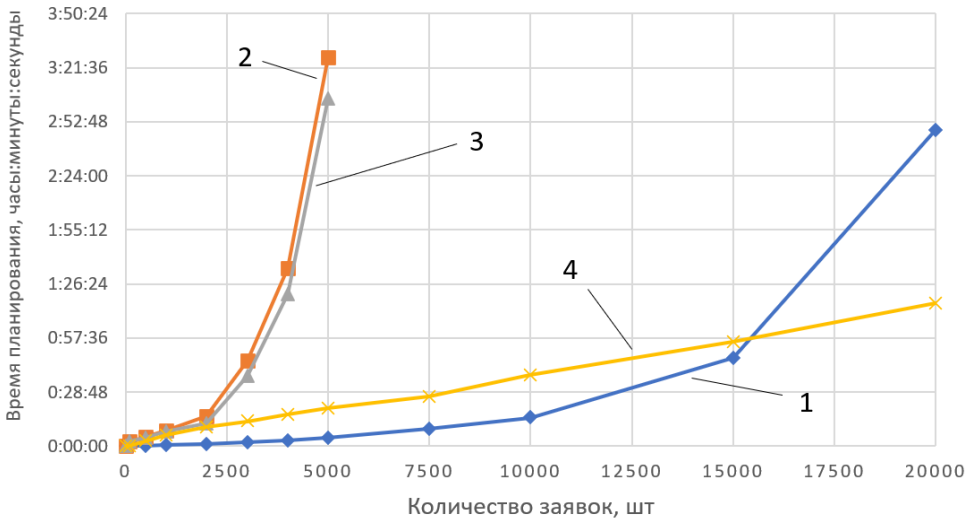


График зависимости времени планирования от количества заявок

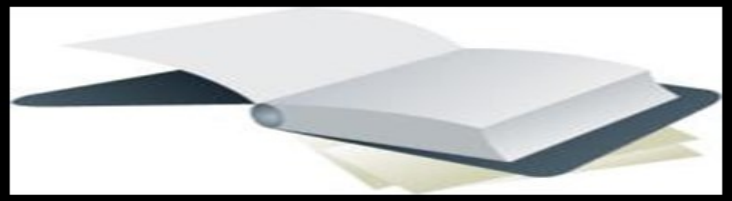


1) Мультиагентный метод; 2) Алгоритм имитации отжига; 3) Алгоритм поиска с запретами; 4) Алгоритм восхождения к вершине

Использованы программы из пакета OptoPlanner (Компании Red Hat), что потребовало подготовки данных, настройки алгоритмов и анализа и сопоставления получаемых результатов.

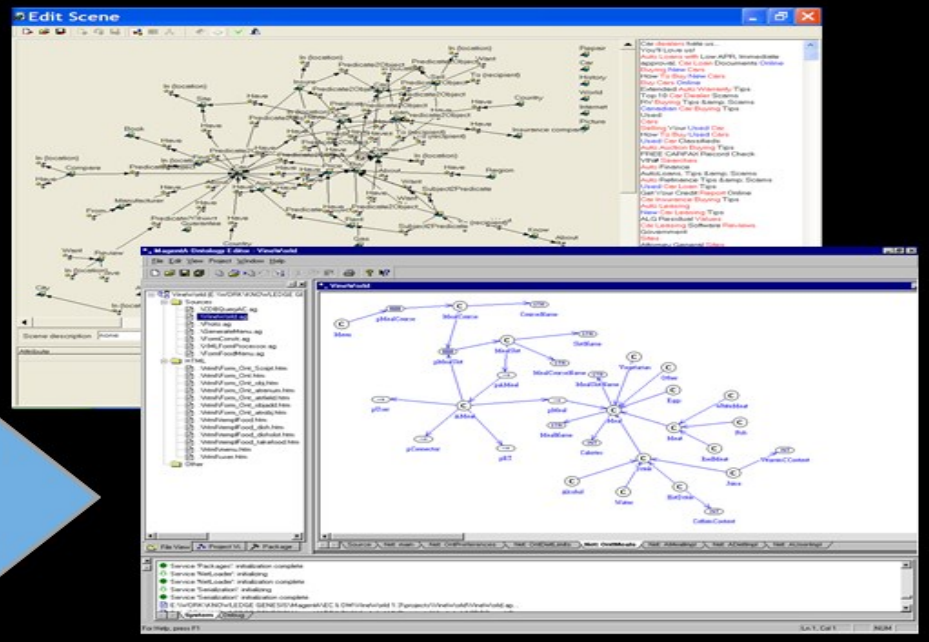
Базы знаний на основе онтологий

Традиционные формы представления информации: (отчеты, книги, таблицы и т.д.)



- Таблицы справочников
- Аналитические отчеты
- Условия применения
- Результаты полевых испытаний
- Советы и рекомендации
- Случаи из практики

Семантические сети онтологии – компьютерные модели знаний предметной области



Примеры экранов конструкторов онтологий

Задача построения базовой онтологии управления предприятиями

Результаты анализа задач управления ресурсами предприятия

1. Выделены типы понятий и отношений построения ЦД предприятий

Обл. определения	Отношение	Область значений
Заказ	Требует создания	Производимый продукт
Задача	Является частью	Групповая задача
	Следует за	Задача
	Использует	Ресурс / требование к ресурсу
	Производит	Производимый продукт
	Потребляет	Потребляемый продукт
Ресурс	Доступен	График доступности
Обеспечивающий ресурс	Входит в	Группа ресурсов
	Соединен с	Обеспечивающий ресурс / группа ресурсов
	Требует обслуживания	Правило обслуживания
	Требует переналадки	Правило переналадки

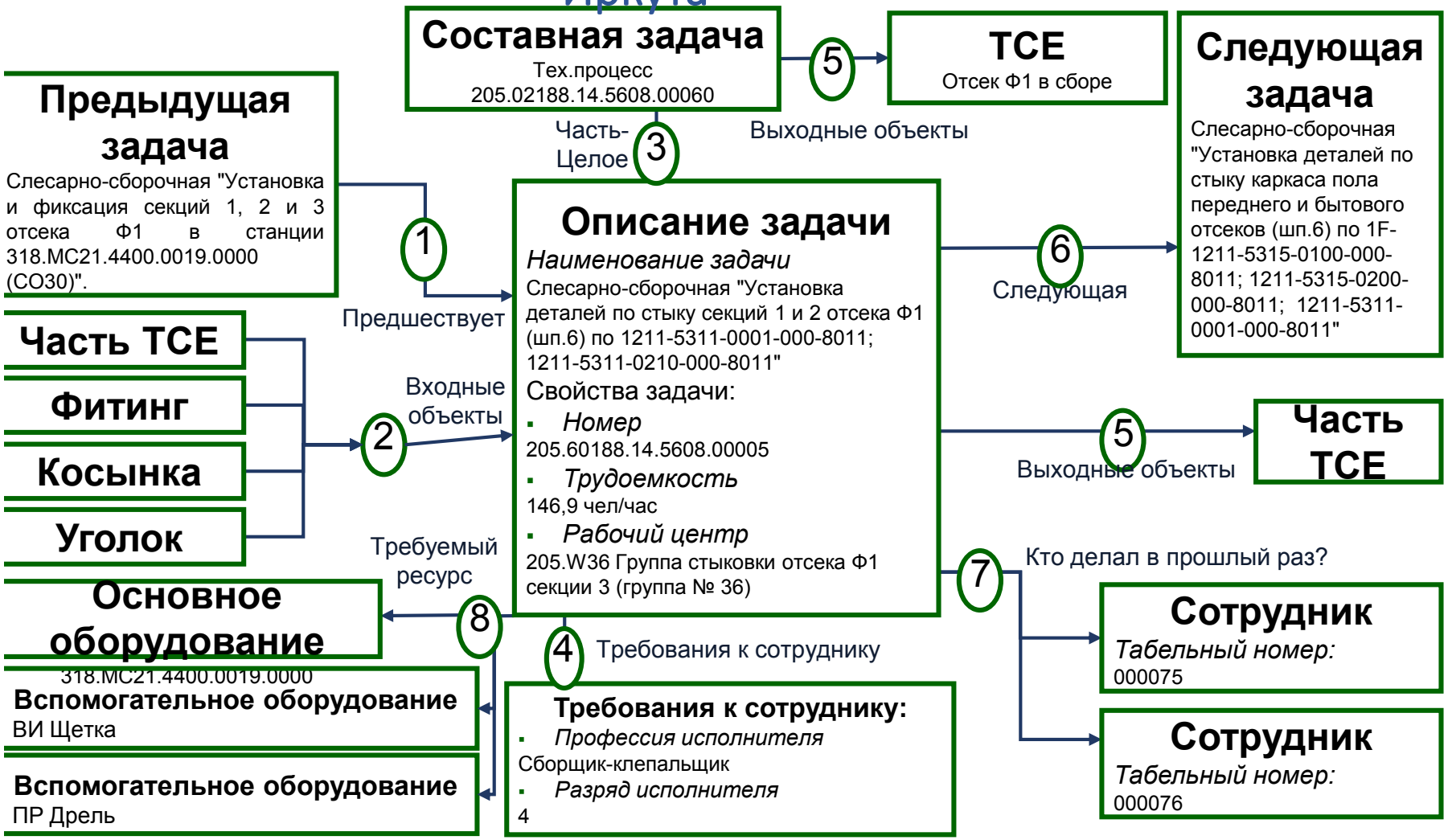
2. Выделены базовые типы задач

Атомарная	Продолжительность фиксирована
	Продолжительность зависит от состава и характеристик используемых ресурсов и/или объема выпускаемого продукта
Групповая	Продолжительность «покрывает» интервалы выполнения дочерних задач (атомарных или групповых)
Гамак	Выполняется строго между моментами времени окончания задач предшественников и началом задач-последователей

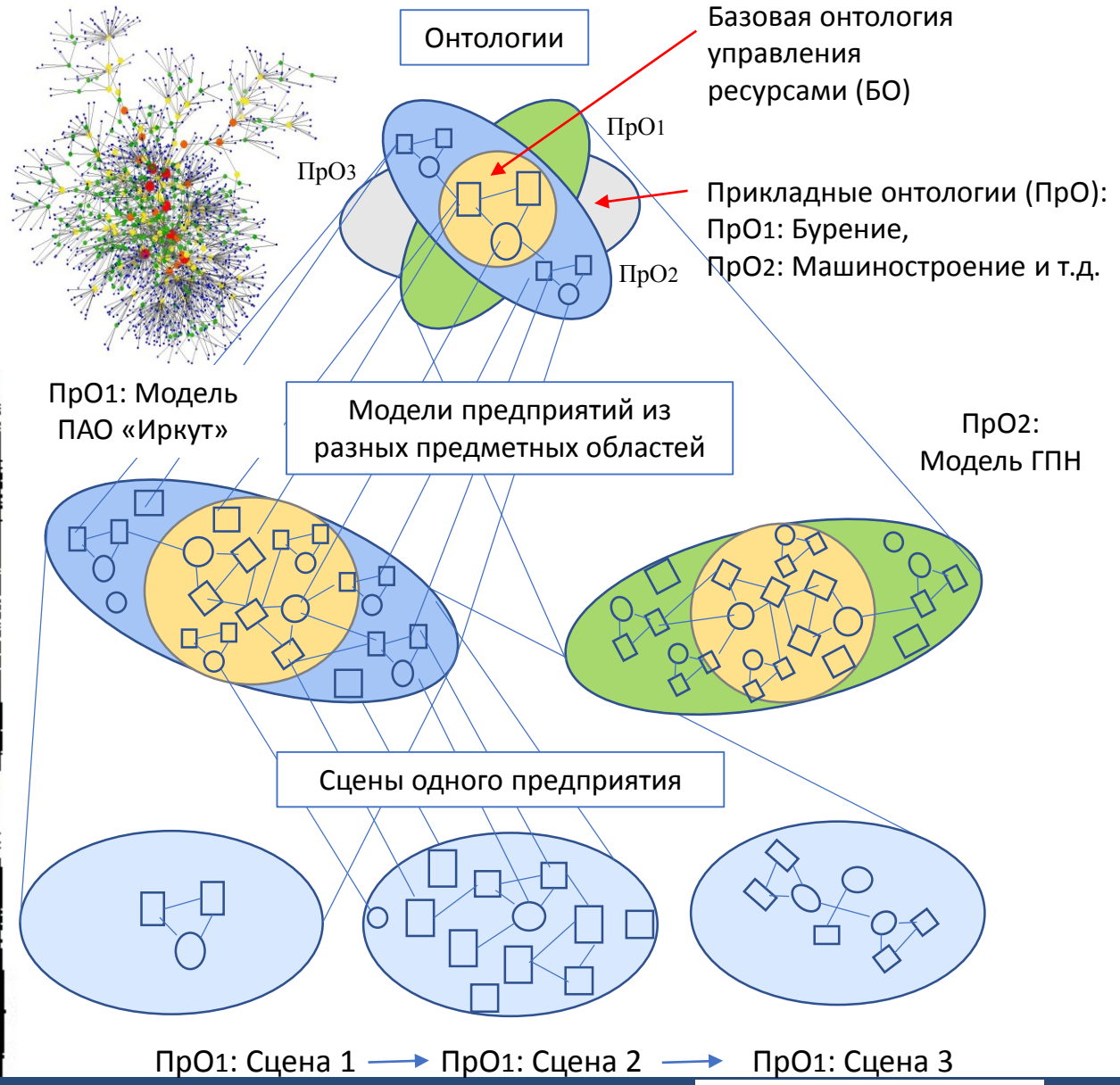
3. Выделены типы ресурсов

Преобразуемый	Тратится при выполнении задачи, может быть восполнен согласно графику поставок
Обеспечивающий	Становится доступными для повторного использования в прежнем количестве сразу после завершения задач, на которые был выделен

Пример онтологической модели задачи (операции) цеха Иркута



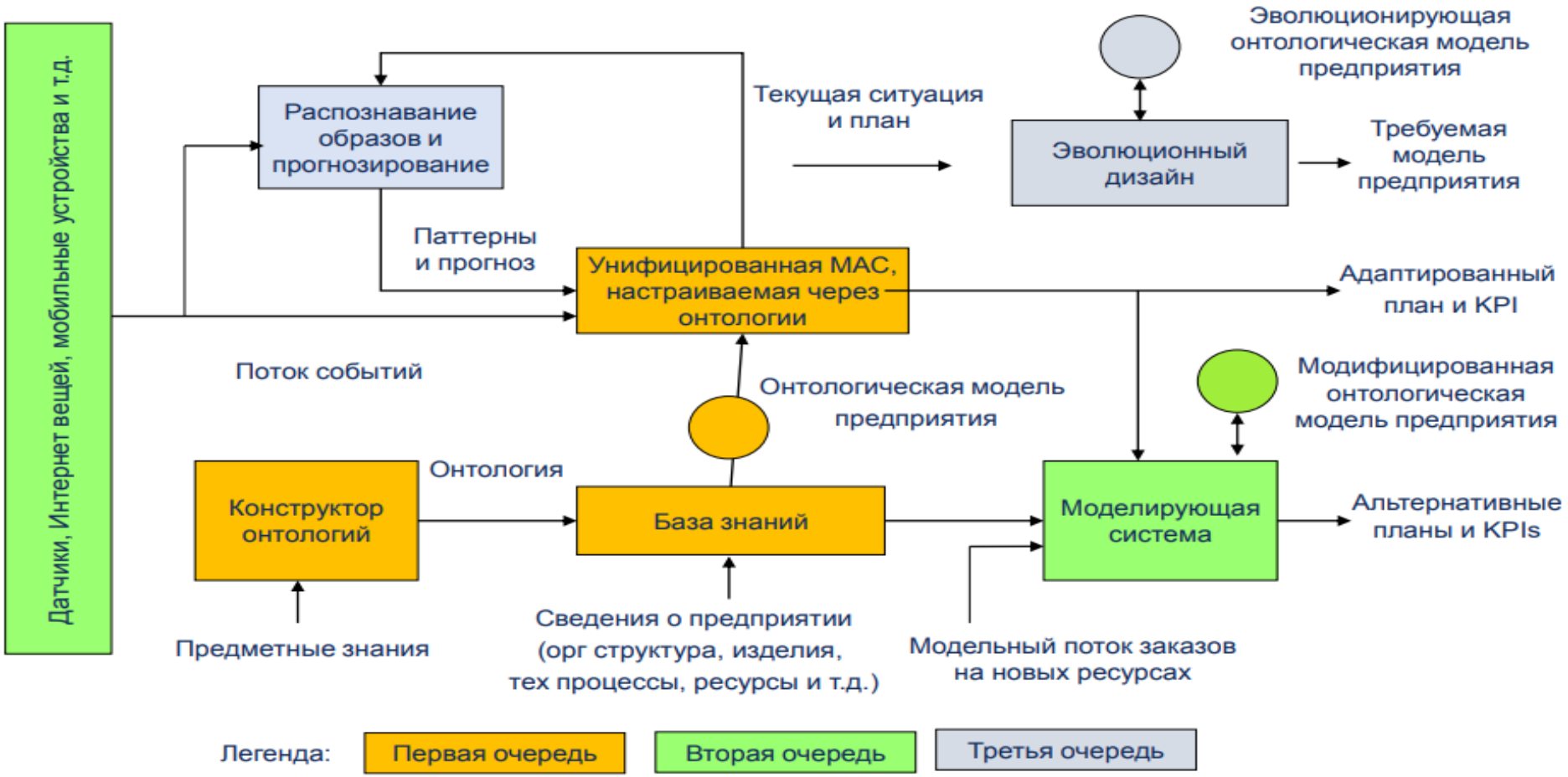
Онтологии – модели – сцены предприятия



- **Базовая онтология «Управление ресурсами»** – формализованная модель знаний предметной области процессов управления
- **Прикладная онтология** – онтология предметной области предприятия на основе базовой онтологии управления
- **Онтологическая модель предприятия** – спецификация ресурсного состава предприятия на основе онтологий управления и предметной области
- **Сцена предприятия** – состояние объектов и процессов предприятия в заданный момент времени

Экраны конструктора онтологий и базы знаний

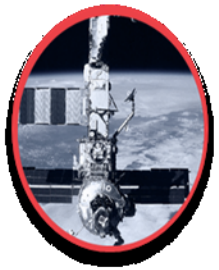
Перспективная архитектура ЭИ системы



Эффект от внедрений ЭИ систем

Smart Factory
[управление цехами]

- Заказчики: Тяжмаш, АвиаАгрегат, Кузнецов, Airbus, Иркут
- Построение производственного расписания на горизонт до 2 лет - за 10 – 15 минут
- Повышение валового объема продукции цеха на 5 – 10% при том же составе рабочих и оборудования
- Экономия от внедрения в одном цеху составляет не менее 1163 нормо-часов в месяц, или 7 чел-месяцев в месяц, что соответствует 3 – 8 млн. руб. в год



Smart Projects
[управление проектами]

- Заказчики: РКК «Энергия» и др.
- Полная прозрачность расходов при планировании и реализации
- Адаптивное планирование и повышение эффективности использования ресурсов (сокращение простоев и дефицитов)
- Сокращение времени построения планов в 5-7 раз

Smart Supply
[управление поставками]

- Для LEGO (США, сеть магазинов в Чикаго) – по итогам пилотного внедрения – увеличение прибыли на 18 %
- Для Coca-Cola (Германия) – повышение выполняемости заказов на 7 % и экономия на транспортные расходы до 20 %
- Мировой опыт показывает, что потенциал экономии от сокращения издержек предприятия на логистику поставок может составлять до 25 %

Smart Services
[мобильные бригады]

- Заказчики: Средневолжская газовая компания, Водоканал Волгограда и др.
- Сокращение времени реакции на непредвиденные события в 5-10 раз
- Повышена эффективность работы бригад на 40% (12 заказов вместо 7 в день)
- Поддержка гибкого планирования в реальном времени
- Сокращение ошибок диспетчеров и времени обучения с месяцев – до дней

Smart Taxi
[управление такси]

- Заказчики: Addison Lee и др.
- Количество обработанных заказов увеличилось на 7% при том же флоте
- Автоматически стали планироваться 98,5% всех заказов
- Количество потерь заказов сократилось на 2% до 3,5%
- Пустой пробег сократился на 22,5%
- Прибыльность возросла на 4,8%, при этом доходы водителей выросли на 9%, а также появилась возможность расширить флот

Smart Railways
[управление ЖД]

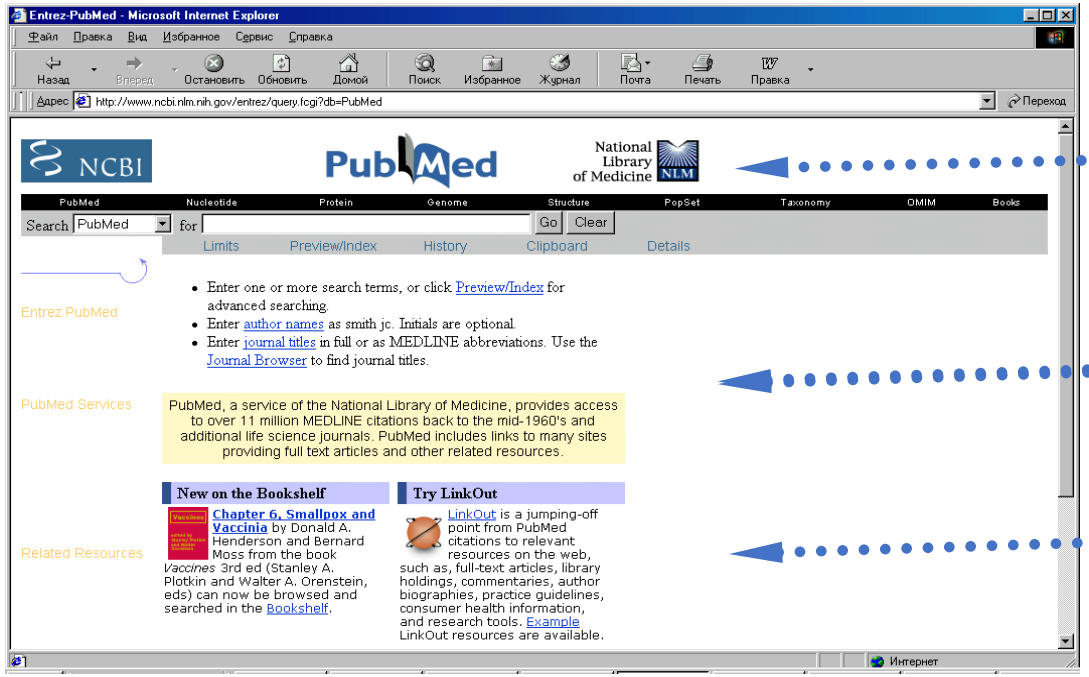
Ожидаемые результаты (в стадии разработки):

- Заказчик: РЖД (а рамках ИСУ ЖТ ВНИИАС)
- Увеличение скорости движения грузовых составов на БАМе - на 3-5 %
- Время пересчета графиков движения по событию – меньше 30 секунд
- Повышение оперативности работы диспетчерской и нагон графика - в 1.5 - 2 раза
- Снижение зависимости от человеческого фактора

Применение ЭИ систем для понимания текстов

Анализ рефератов статей MedLine по молекулярной биологии

Медицинская база данных MedLine прирастает на 1 млн. статей каждый год



Но дает бесплатно только рефераты статей

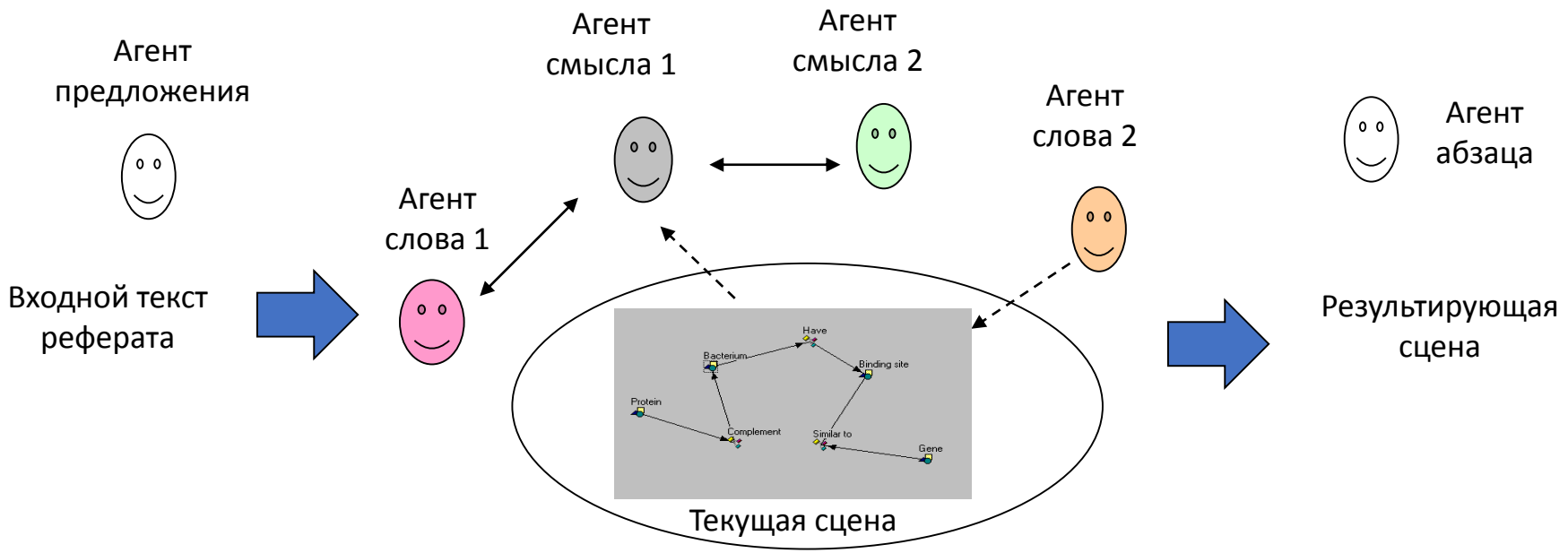
Предлагает ключевые слова для поиска статьей

Найденные статьи покупаются

Компания Integrated Genomics производит индивидуальные лекарства для людей по заказу японских компаний, в целях чего проводит постоянные длительные эксперименты.

Каждый день более 10 высоко квалифицированных экспертов читают рефераты и выбирают релевантные проводимым экспериментам, чтобы сократить затраты и сроки.

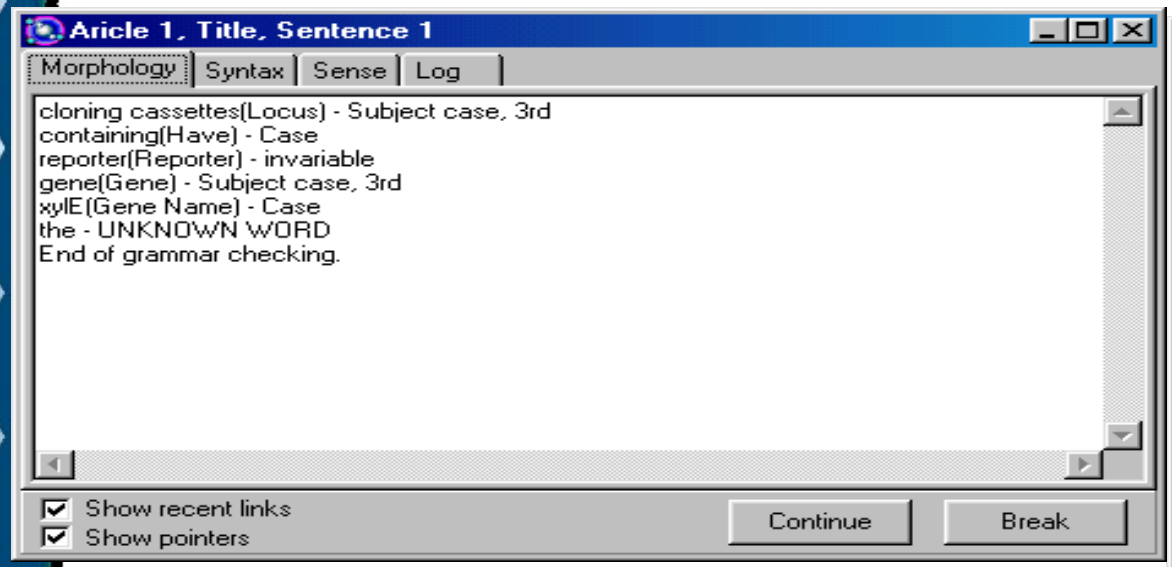
Виртуальный рынок ПВ-сети понимания текстов



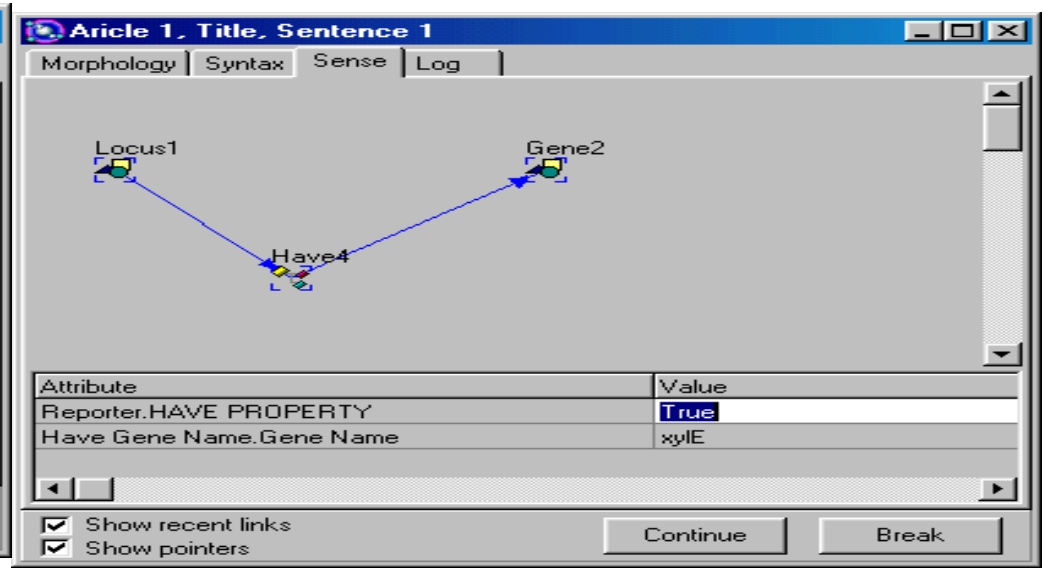
- Каждому слову в предложении присваивается свой программный агент
- Каждый агент получает из онтологии набор возможных значений (смыслов) для каждого слова
- Агенты слов и агенты значений в процессе переговоров на виртуальном рынке решают, какое значение является наиболее подходящим для каждого слова
- Слова конкурируют за значения, а значения конкурируют за слова на виртуальном рынке системы
- В ходе переговоров формируется семантический дескриптор предложения, связывающий объекты и отношения предложения
- Процесс завершается, когда ни один из агентов не может улучшить результат

Основные стадии разбора текста предложения реферата

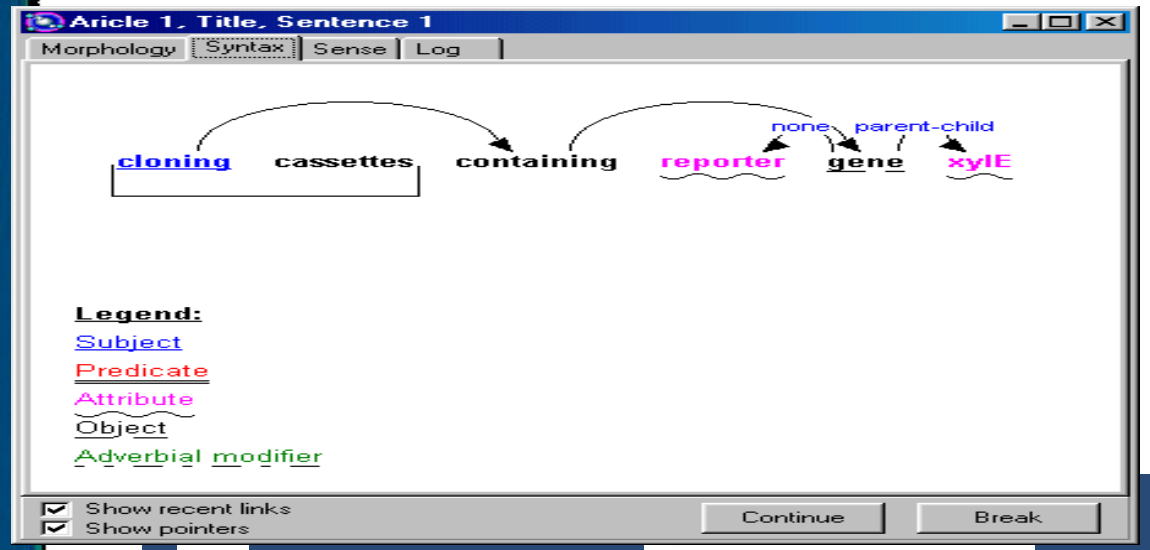
1. Morphology



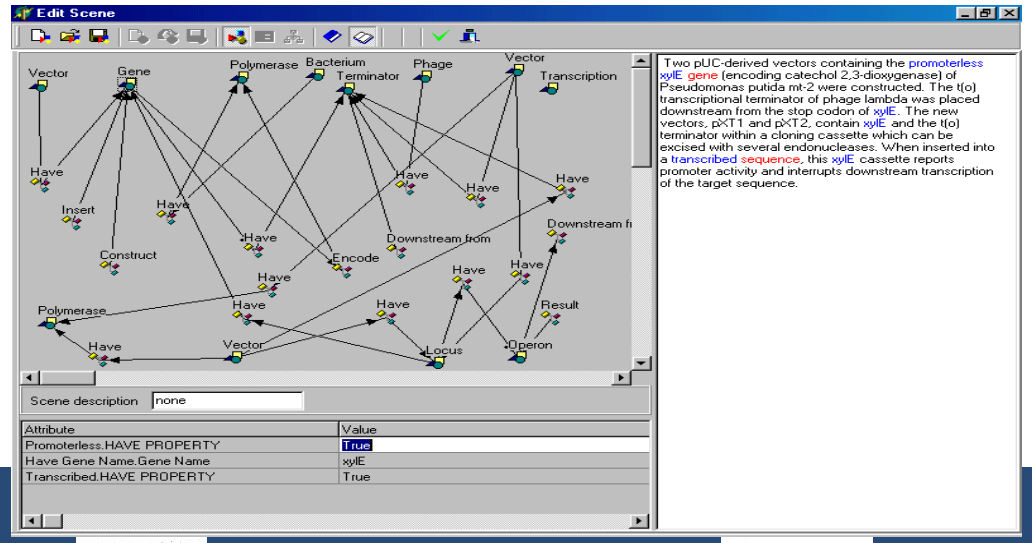
3. Semantics



2. Syntax

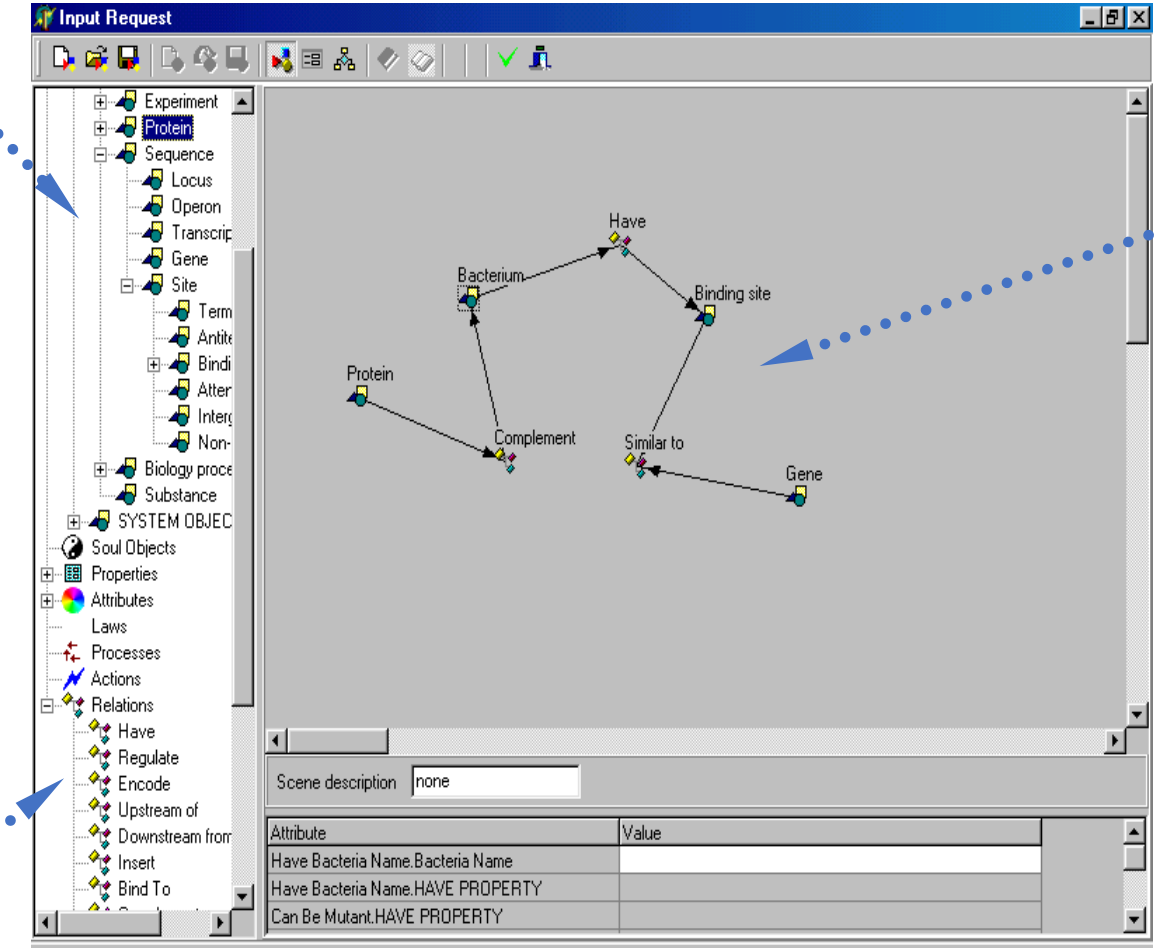


4. Pragmatics



Задание семантических дескрипторов рефератов MedLine

Список понятий

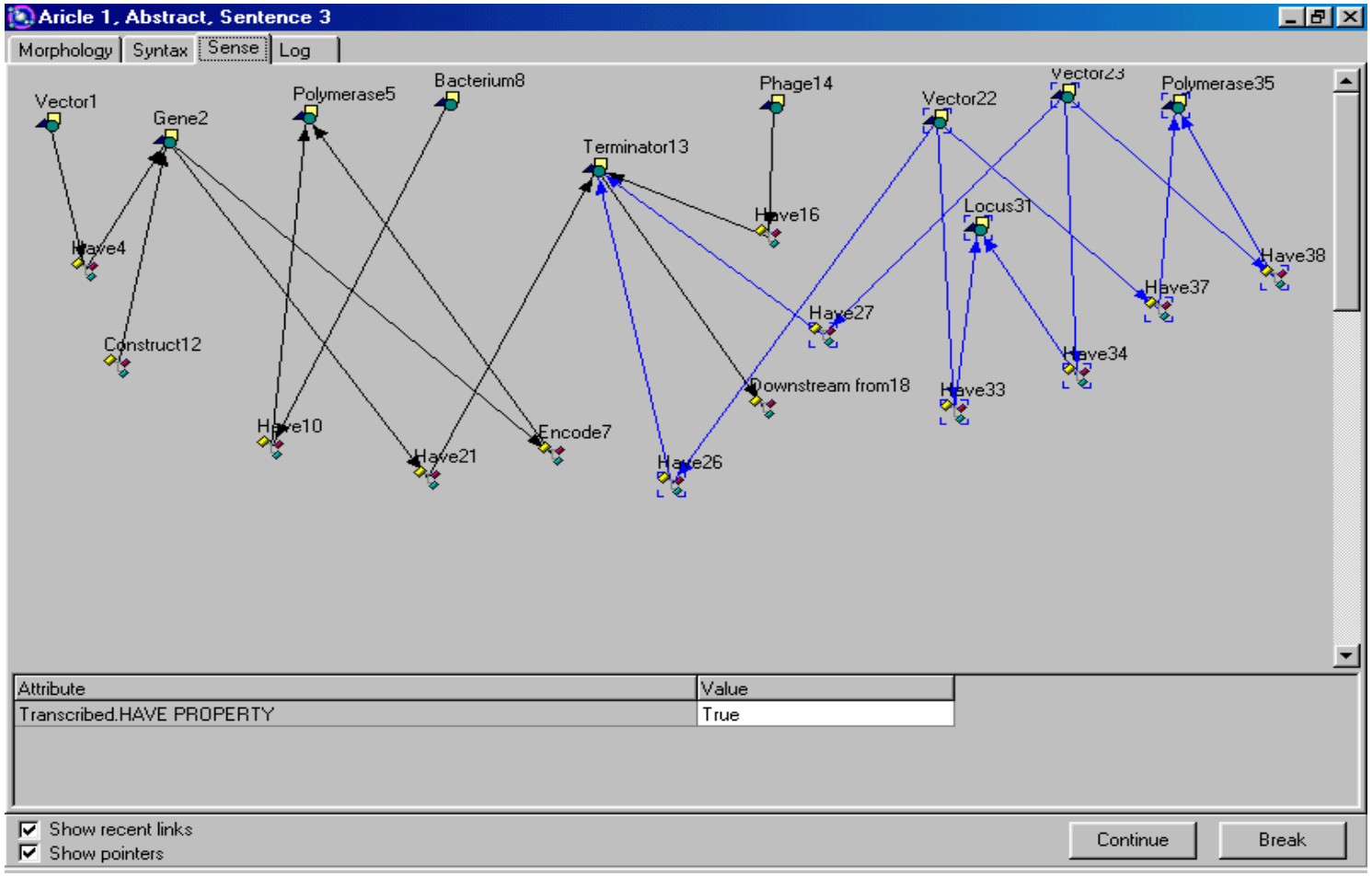


Семантическая сеть (сцена) текста

Свойства понятий и отношений

Список отношений

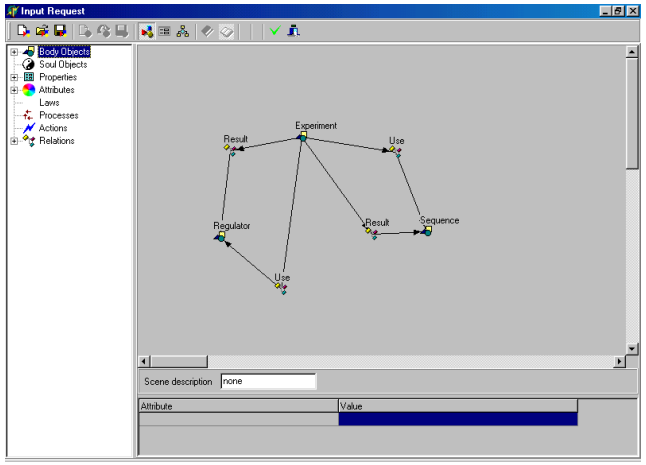
Пример разбора предложения реферата статьи (4)

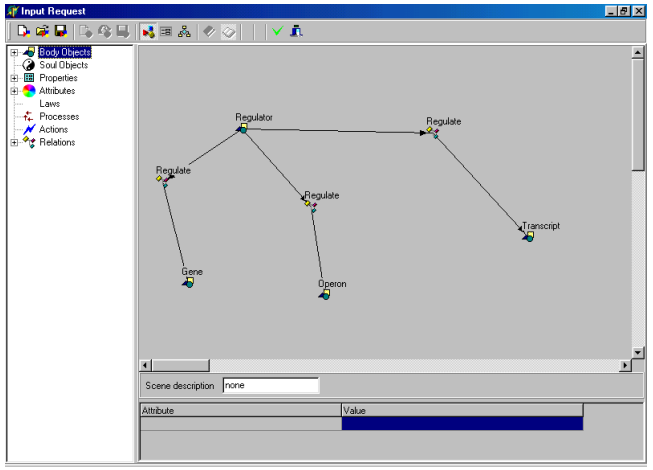


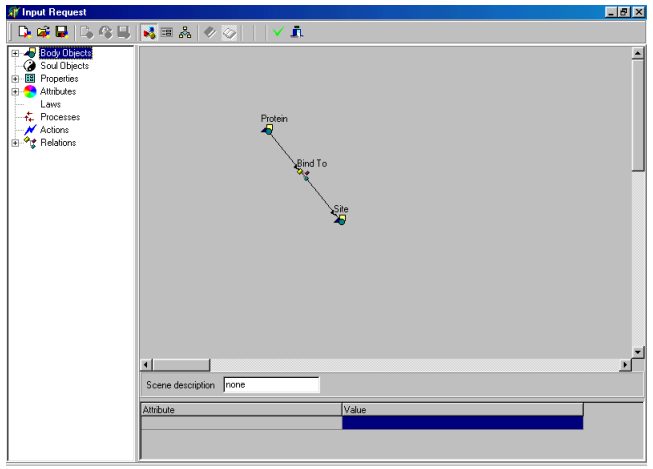
Two pUC-derived vectors containing the promoterless xylE gene (encoding catechol 2,3-dioxygenase) of Pseudomonas putida mt-2 were constructed. The t(o) transcriptional terminator of phage lambda was placed downstream from the stop codon of xylE. The new vectors, pXT1 and pXT2, contain xylE and the t(o) terminator within a cloning cassette which can be excised with several endonucleases.

Оценка качества результатов анализа рефератов

Пример запроса







Условия теста заказчика:

- Более 1000 рефератов, вручную выбранных экспертами компании
- 8 типов критериев “good” и “bad” выбора рефератов
- Сопоставляются вручную и автоматически выбранные рефераты
- А также сопоставление выбранных статей с поиском по ключевым словам

Результаты исследования

	Finding correct abstracts (default value=60%)		Deleting wrong abstracts (default value=40%)	
	a (strong match)	b (weak match)	a (strong match)	b (weak match)
Request № 1	81.5% (76-14)	64.8% (564-198)	54.7% (95-43)	54.1% (209-96)
Request № 2	87% (39-5)	72% (243-68)	90% (30-3)	56.9% (402-173)
Request № 3	86.9% (23-3)	69% (591-183)	64.9% (37-13)	55.7% (406-180)
Request № 4	84% (25-4)	55.3% (273-122)	80% (5-1)	39.6% (724-437)
Request № 5	69% (170-53)	65.3% (471-163)	100% (1-0)	63% (73-27)
Request № 6	78.2% (46-10)	71.3% (276-79)	87.5% (8-1)	72.9% (37-10)
Request № 7	74.6% (98-26)	65.3% (686-239)	54% (311-143)	
Request № 8	78.1% (87-19)	68.7% (115-36)	54% (311-143)	
Total (without duplicates):	81.4% (401-76)	61.9% (881-339)	54.4% (316-144)	41.4% (886-507)

Основной результат:

- В найденных “good” группах точности выявления корректных статей оказалась выше 81%, в некоторых случаях достигая значения в 90%
- В “bad” группах вероятность нахождения нужных статей, случайно туда попавших по ошибке, менее 8%
- Разработанный подход показал интересную закономерность, что даже при распознавании около 20% слов, за счет связей между ними, точность распознавания – получается около 80%.

Производительность работы системы:

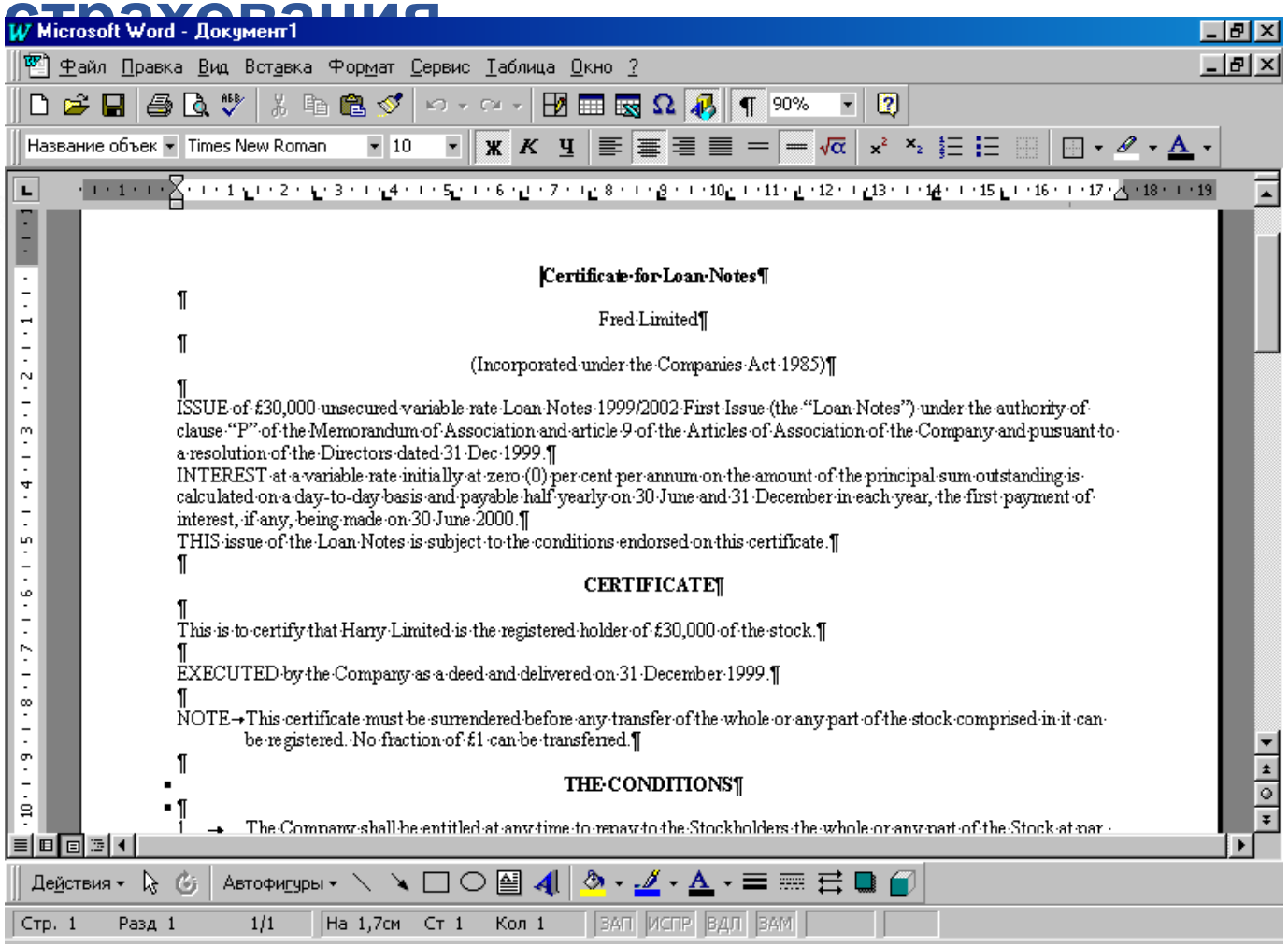
- Построение одного дескриптора ~ 1-2 min.
- Время поиска нужного реферата ~ 1 min.
- Онтология включает понятий и отношений: ~150 понятий и ~3100 отношений (с наследованием)

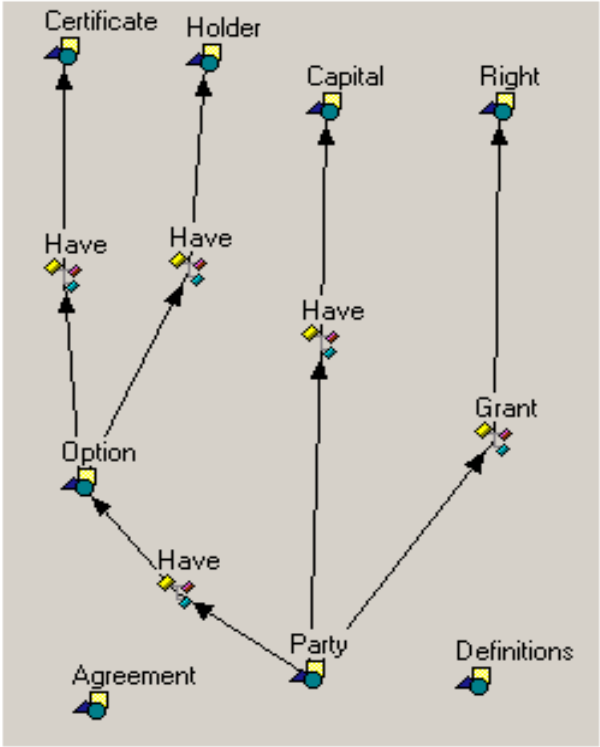
Сравнение с поиском по ключевым словам:

- Точность метода по сравнению с ключевыми словами – в 3-4 раза выше

Применение ЭИ систем для кластеризации текстов

Задача анализа и кластеризации контрактов страхования

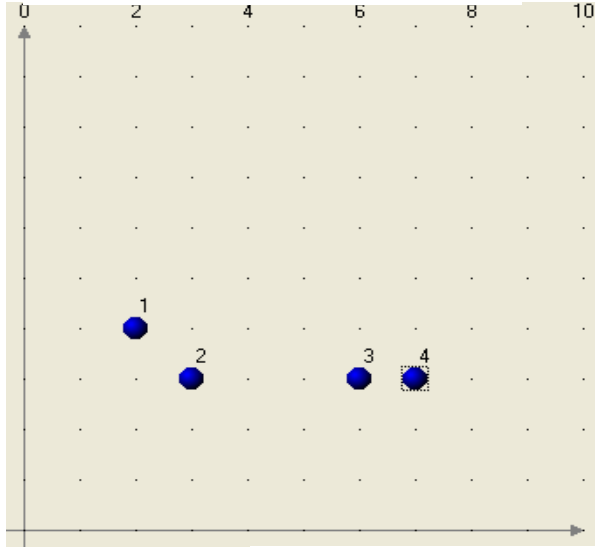




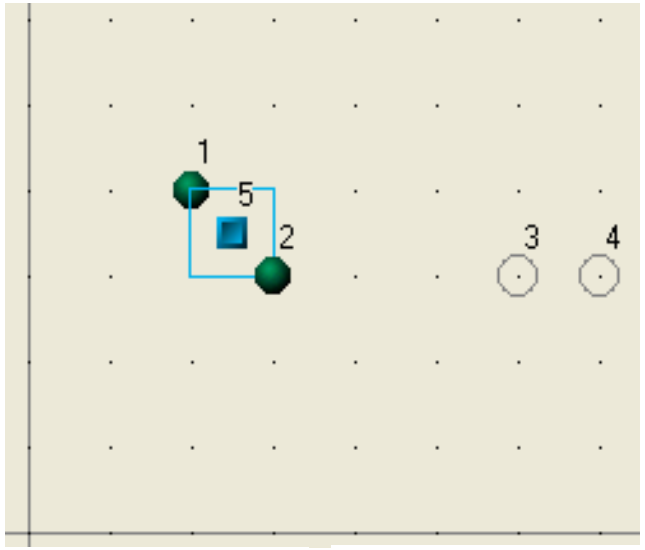
Компания AON столкнулась с задачей необходимости типизации и унификации текстовых документов тысяч и миллионов контрактов по страхованию автомобилей

Простейший пример кластеризации данных

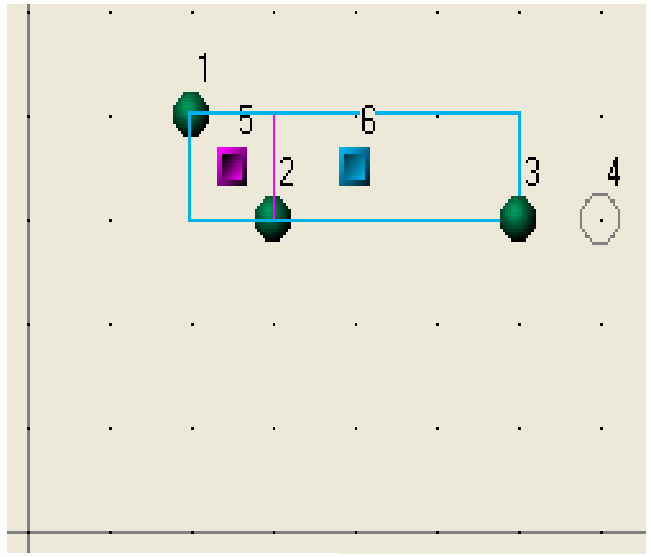
1. New orders are coming and start clustering



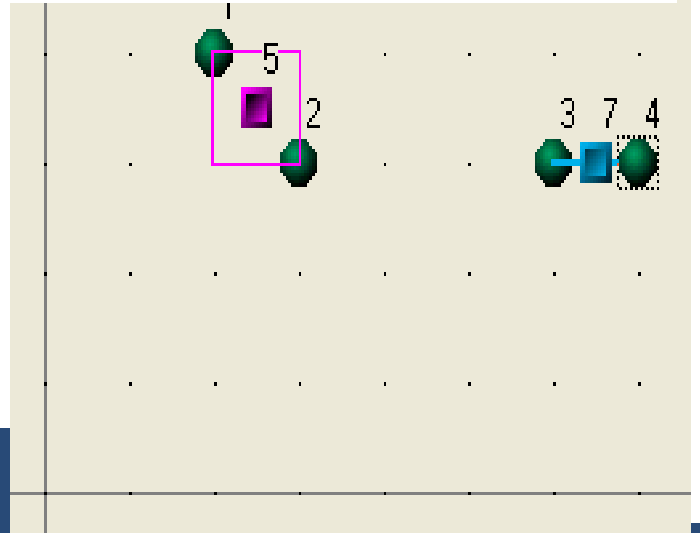
2. First cluster is created New orders are coming



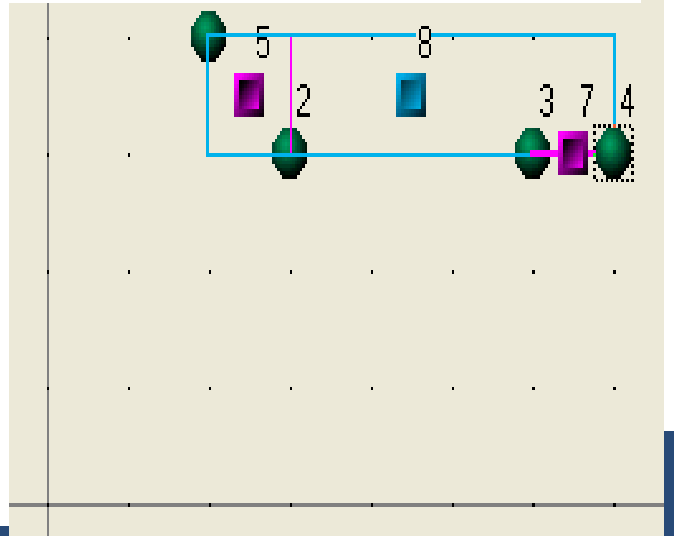
3. First cluster is trying to match record 3



4. Record 3 rejects proposal from Cluster 1 and form Cluster 2 with record 4



5. Cluster 1 and Cluster 2 make new jointed Custer 3 together



Построение новых заготовок (темплейтов) контрактов

Template Builder (Result)

File Help

Clauses of the Final Document:

[Losses arising from any Loss Occurrence occurring in] the United States of America and [/or] Canada

[Except for exclusion a), d), f), k)] and [n) the above shall apply] except as may be necessary to indemnify the [Syndicate] as a "Domestic Regulations Insurer" under the provisions of the Domestic Regulations of the Motor Insurers' Bureau, [or overseas equivalent]

[1. Any re
hostilities (
___] insur
nationalisa
by or unde
authority [
the Road T

[empty]
e) Loss or damage or liability, directly or indirectly occasioned by, happening through or in conseq...
Loss or damage or liability, directly or indirectly occasioned by, happening through or in consequen...
1. Any result
Any liability assumed by the Reinsured for loss or damage directly or indirectly occasioned by, happ...

Vehicles known to be carrying hazardous goods or to be agreed

[a) Loss] or destruction of or damage to any property [whatsoever] or any [___] loss or expense [whatsoever resulting] or [arising therefrom or] any consequential loss

[(B) any] legal [liability] of whatsoever nature

Real clauses:

requirements of the Road Traffic Acts

1. Any result of war, invasion, act of foreign enemy, hostilities (whether war be declared or not), civil war, rebellion, insurrection or military or usurped power or confiscation or nationalisation or requisition or destruction of or damage to property by or under the order of any Government or public or local authority except as far as is necessary to meet the requirements of the Road Traffic Acts

Loss or damage or liability, directly or indirectly occasioned by,
vasion, acts of
ared or not), civil war,
ped power or
struction of or
government or public
to meet the

Any liability assumed by the Reinsured for loss or damage directly or indirectly occasioned by, happening through or in consequence of war, invasion, acts of foreign enemies, hostilities (whether war be declared or not), civil war, rebellion, revolution, insurrection, military or usurped power or confiscation or nationalisation or requisition or destruction of or damage to property by or under the order of any Government or public or local authority

Оценка качества кластеризации и ценности для бизнеса

Примеры проведенных тестов

Number of Docs	Number of Groups* (auto/ manual)	Max hierarchy level (auto / manual)	Average number of docs in a group (auto / manual)	Same and similar groups (%)	Template validity level (%)
11	7 / 9	4/3	2/2	94 %	96 %
43	23/14	5/2	4/3	91 %	90 %
125	54/28	9/3	6/4	87 %	81 %
864	279 / 43	13/3	5/14	88 %	79 %

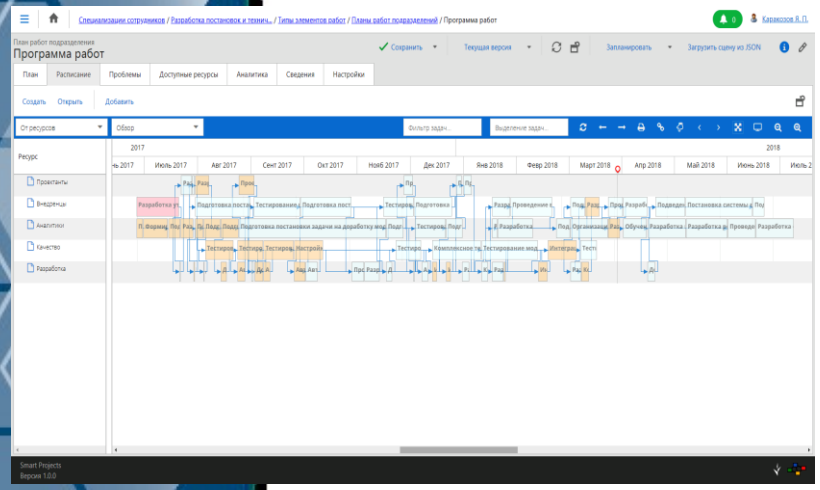
1. Выяснилось, что эксперты, как правило, предпочитают упрощать структуру документа.
2. Количество иерархических уровней и количество групп, производимых вручную, значительно меньше, чем создала система.
3. Все основные кластеры, созданные экспертами на верхних уровнях иерархии, фактически совпадают с теми, которые создаются автоматически.
4. Эксперты в предметной области предпочитают включать документ только в один кластер, похожий на документ, в то время как система предпочитает распределять такие документы по всем похожим группам.
5. Люди испытывают трудности с точным определением и запоминанием сходств документов.
6. Многие сопутствующие документы пропущены экспертами (около 35%), некоторые документы присвоены неправильно (11%).
7. Количество виртуальных кластеров, пропущенных разработанным решением, но признанных экспертами предметной области, относительно невелико (около 7%).

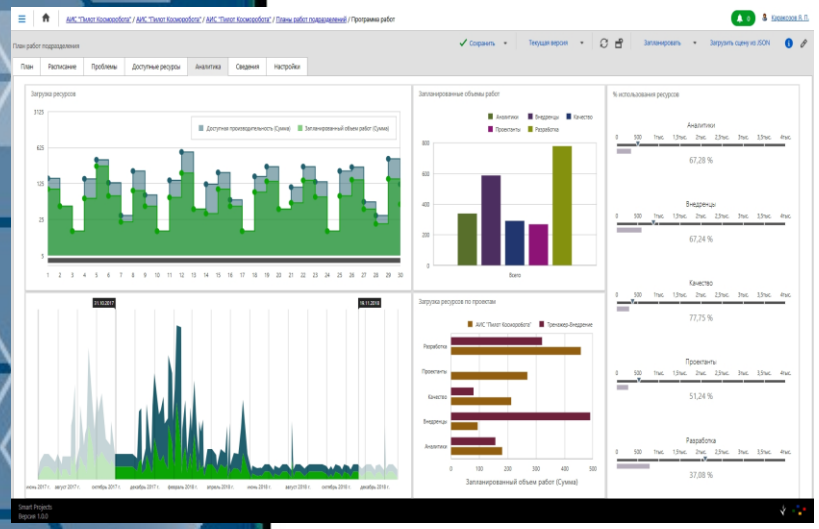
Бизнес результаты

1. На следующем этапе это мультиагентная система для кластеризации была развернута для промышленного применения и обеспечила около 90% приемлемых кластеров.
2. Планировалось, что обработка около 25 000 договоров автострахования (каждый из которых состоит из 30 страниц) займет около 16 человеко-лет, но система сделала это примерно за 4 человеко-месяца, сэкономив время и деньги клиента.

Примеры текущих проектов ЭИ систем для управления ресурсами

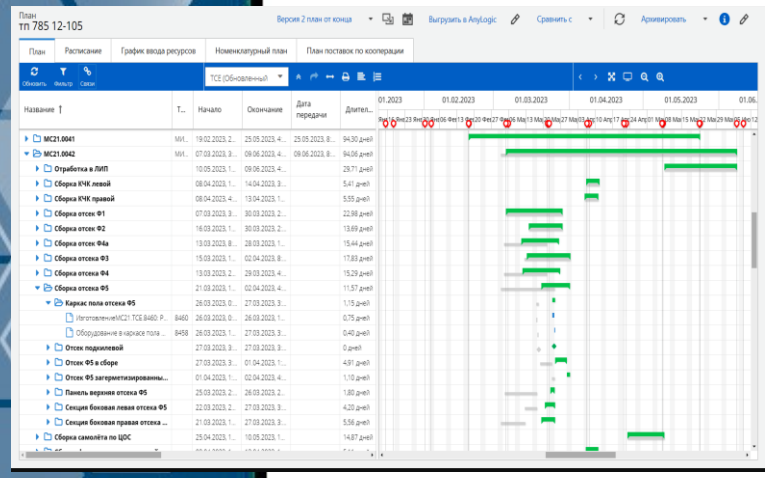
Управление проектами НИОКР для МАК «Вымпел»

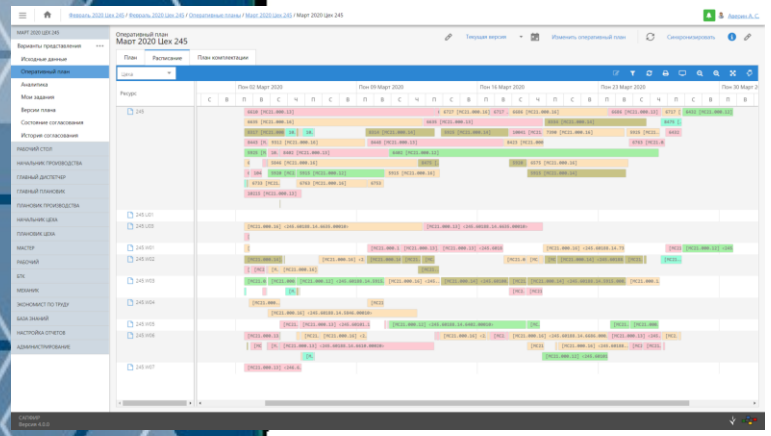




- В настоящий момент система проходит опытную эксплуатацию в КБ.
- В системе планируется более 50 проектов НИОКР общества.
- Система позволяет разрабатывать сетевые планы-графики, производить в автоматическом режиме балансировку загрузки подразделений, детализировать планы до уровня конструкторов и формировать оперативные планы работ подразделений.
- Система формирует и корректирует по событиям два вида планов:
  1) Долгосрочный план реализации программы НИОКР – до 3х лет, все СПГ в едином пуле трудовых ресурсов до уровня пропускной способности
  2) Оперативное планирование работы каждого подразделения до уровня конкретных сотрудников по заданиям из разных проектов.
- Планы синхронизируются между собой в случае событий 4-х типов.
- Среднее время на формирование планов:
  - Долгосрочный план – 1,5 часа (180 проектов, на горизонте 3 лет)
  - Оперативного плана подразделения – 8 минут (150 конструкторов, 2 тыс. задач на горизонт – три месяца).
  - Результат: повышение прозрачности планов, сокращения сложности и трудоемкости планирвания

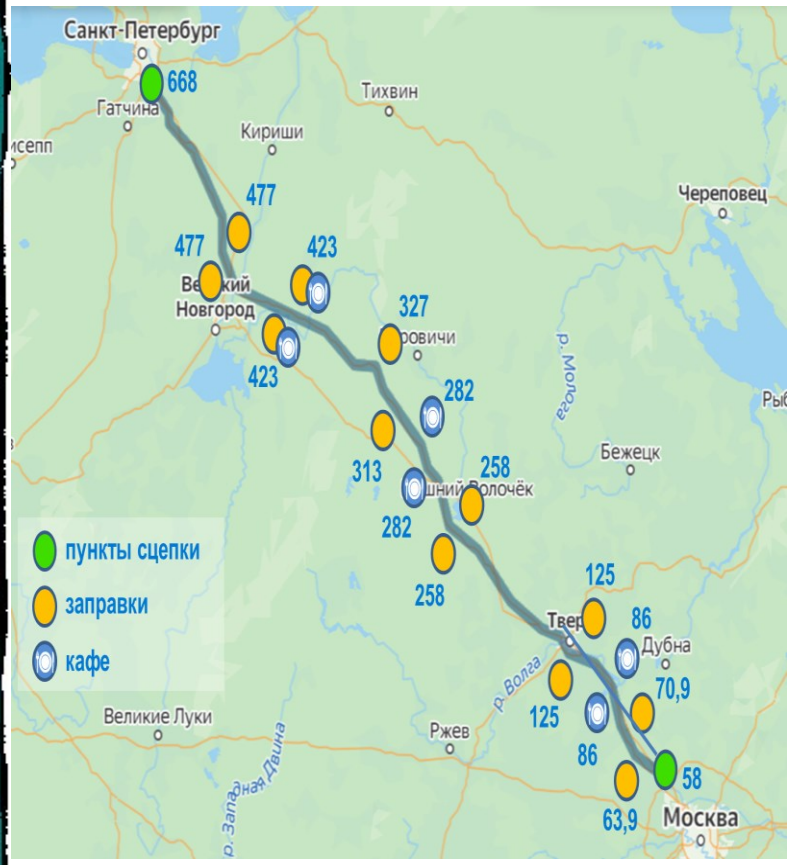
Управление сборкой самолетов МС-21 для Иркута





- В настоящий момент система переведена в штатную эксплуатацию на производстве в 5 цехах агрегатной и окончательной сборки.
- В системе планируется все рабочие и оборудование всей линии сборки (5 цехов х 250 чел.) конечных изделий - примерно 5 тыс. единиц ресурсов.
- Среднее время на формирование планов:
  - Стратегического плана – 3 часа (300 изделий на горизонте 5 лет)
  - Сквозного плана – 1 час (50 тыс. заказов на 6 месяцев)
  - Оперативного плана цеха – 15 минут (200 рабочих, 4 тыс. производственных операций на горизонт – один месяц).
- Время корректировки планов по событиям:
  - Стратегического и сквозного плана составляет в среднем от 5 до 45 минут,
  - Оперативного – от 1 до 5 минут.
- Первые результаты показали, что применение многоуровневого планирования позволяет сократить время разработки и согласования оперативных планов цехов на 75% по сравнению с планированием без учета вышестоящих планов и сокращает количество ресурсных конфликтов в 3-5 раз.

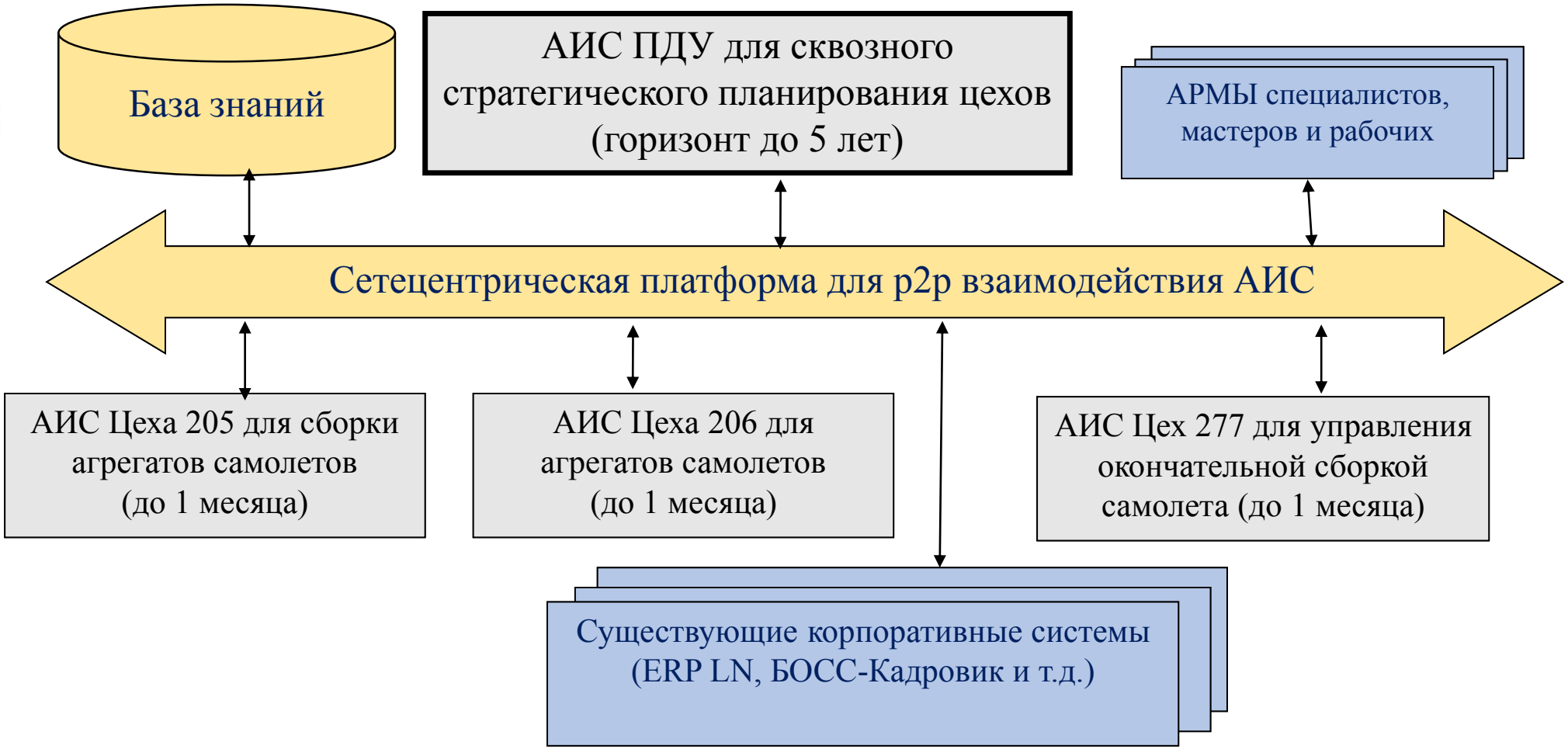
Управление беспилотными грузовиками Камаза на трассе Москва-Санкт Петербург (Нева-11)



- **В 2024 году 6 Высокоавтоматизированных Транспортных Средств (ВАТС), в 2025 году – 36 ВАТС (+ новые направления на Казань, Екатеринбург и др.)**
- **ИСУ ВАТС является автономной интеллектуальной системой:**
  - Получает заказы от Почты России, Пятерочки и Магнита и других клиентов;
  - Строит и оптимизирует планы ресурсов;
  - Ведет мониторинг и контроль планов
  - Адаптивно перестраивает планы по событиям, поступающим в непредвиденные моменты времени (новые заказы, отказ от заказа, поломки, задержки и т.д.)
  - Интегрирована с АСУД на борту грузовика
- **Учитываются многие параметры:** параметры заказов (типы, направление и временные окна), виды ВАТС, тарифы, численность, позиции и скорости ВАТС, объем бака топлива и нормы его потребления, граф дорог, выбранные места сцепки и расцепки, места заправок и отдыха водителей, требования к регламенту труда и отдыха водителей, погода и т.д.
- **Внедрение ИСУ ВАТС** призвано повышать эффективность использования дорогостоящих ВАТС, снижать сложность и трудоемкость работы менеджеров, диспетчеров и логистов, повысить оперативность и гибкость в реакции на события, обеспечить полную прозрачность и контроль использования ресурсов

Супер-ЭИ: Цифровая экосистема ЭИ на базе сетецентрической платформы масштаба предприятия и отрасли

Супер-ЭИ: Цифровая экосистема ЭИ предприятия на базе сетецентрической платформы



Супер-ЭИ: Цифровая экосистема ЭИ электротехнической отрасли на базе сетецентрической платформы

НОЦ ЦЕНТР РАЗВИТИЯ КОМПЕТЕНЦИЙ ИНЖЕНЕРИЯ БУДУЩЕГО

.. Задача: выполнить рочный заказ на производство ложного изделия А в объеме N штук

зчик

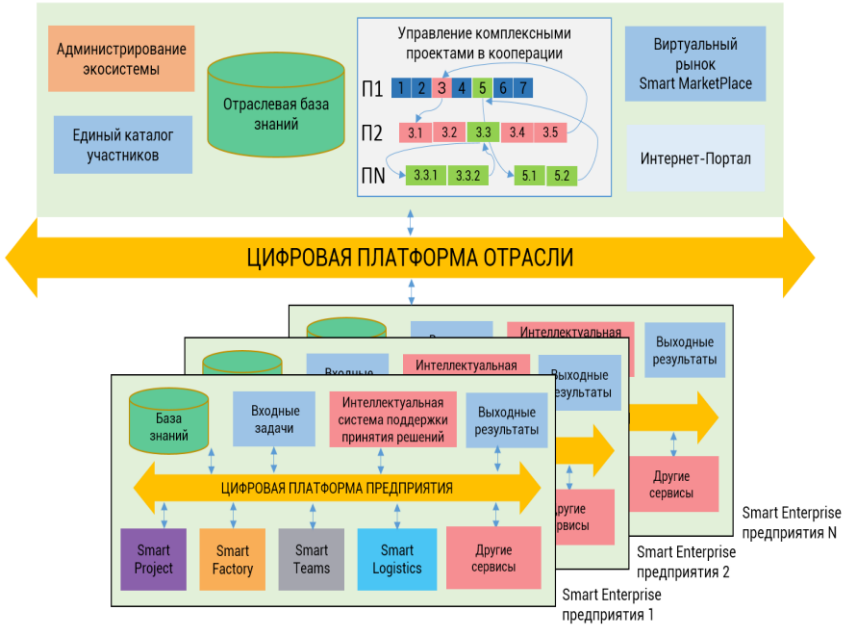
Исполнитель 1

Исполнитель 3

Исполнитель 2

2. Проблема: низкая маржинальность – ни один из поставщиков не может выполнить весь заказ целиком

3. Решение: Создание ИИ в качестве умного оператора по сборке цепочек коопераций предприятий, финансируемых на принципах солидарной экономики (уступи, где у тебя слабое место, и получили процент от общей прибыли по результату)



4. Результат: Переход от слишком жесткой кооперации или непродуктивной конкуренции - к кооперации и конкуренции (от англ. «coopetition» – от cooperation – конкуренция and competition – конкуренция) с выгодой для всех участников

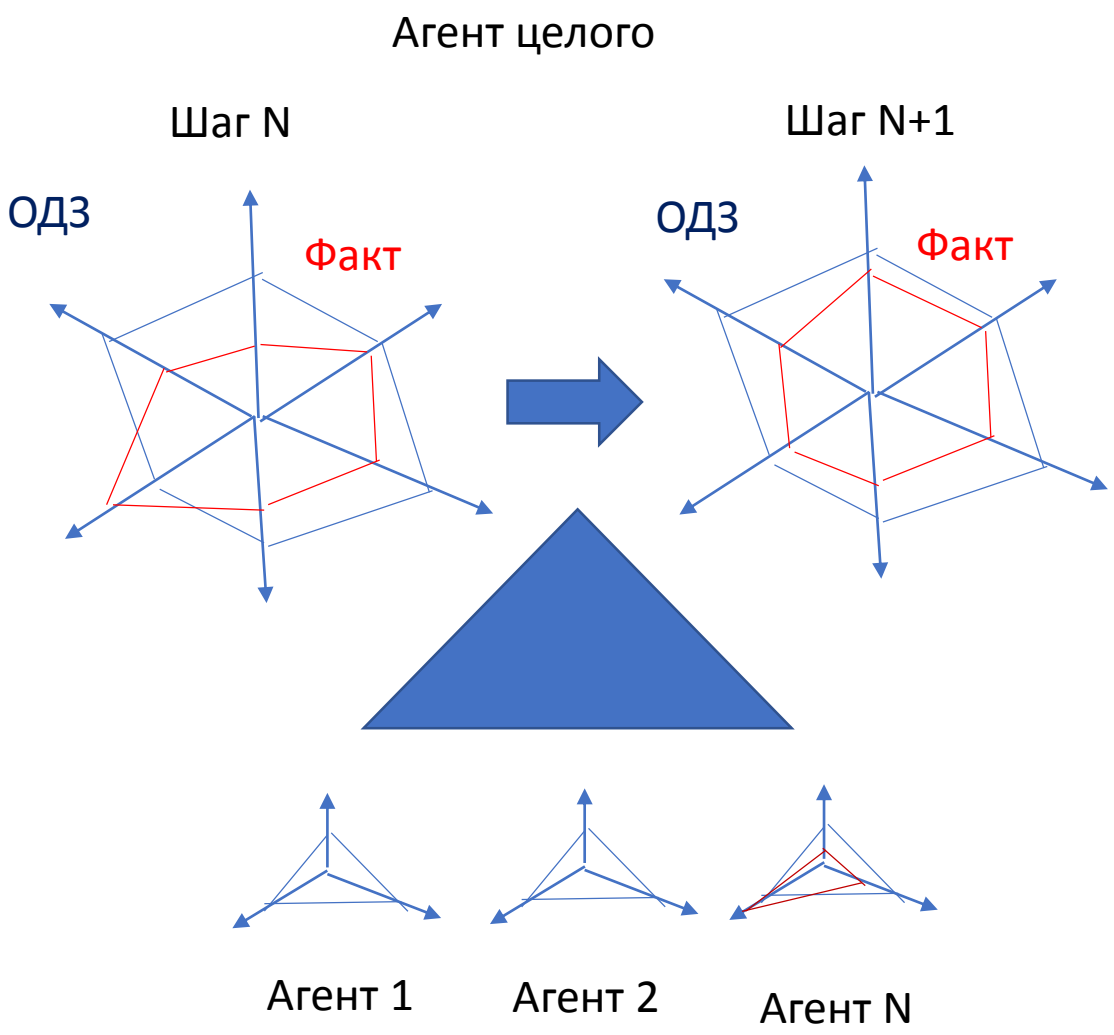
Сравнение ЭИ с другими ИИ технологиями

Классическая оптимизация		Нейронная сеть		База знаний и МАС	
плюсы	минусы	Плюсы	Минусы	Плюсы	Минусы
Достижение глобального оптимума по одной целевой функции	Ориентация на интересы центра – не подходит для учета и поиска баланса интересов (консенсуса)	Хорошо подходит для решения узких задач распознавания образов	Требует долгого обучения и полной выборки массивов тестовых данных	Решает сложные задачи управления ресурсами с конфликтами	Высокая сложность и трудоемкость разработки начального решения
Один хорошо изученный метод (алгоритм) для решения любых задач планирования и оптимизации ресурсов	Высокая вычислительная сложность комбинаторного перебора вариантов	Дает устойчивое решение при наличии ошибок в данных, помех и шумов	Зависит от ситуации во внешней среде и учителя: при изменении надо начинать заново	Возможность развития и учета индивидуальных особенностей заказов и ресурсов	При изменении модели предприятия во внешнем мире требует коррекции и базы знаний
Возможность купить готовый программный продукт на рынке	Не возможность работы по событиям в адаптивном режиме	Возможность купить готовый программный продукт на рынке	Не работает в адаптивном режиме по событиям	Работает в адаптивном режиме - быстрого ответа на событие	Усложнение диалога с пользователем (проактивность, может не согласиться и т.д.)
Легко вкладываются в существующие бизнес-процессы	Большая трудность настройки на решение практических задач	Позволяет использовать накопленные исторические данные предприятия	Большая трудность настройки на решение практических задач	Учет семантики предметной области в базе знаний	Трудности инновации и первопроходцев, смена бизнес-процессов

ВЫВОД: Технологии баз знаний и мультиагентных систем отличаются от других ИИ технологий для управления ресурсами в бизнесе возможностью решения сложных задач и адаптивностью работы в реальном времени

На пути к термодинамической модели ЭИ систем

Агент целостности: модель ЭИ с гомеостазом

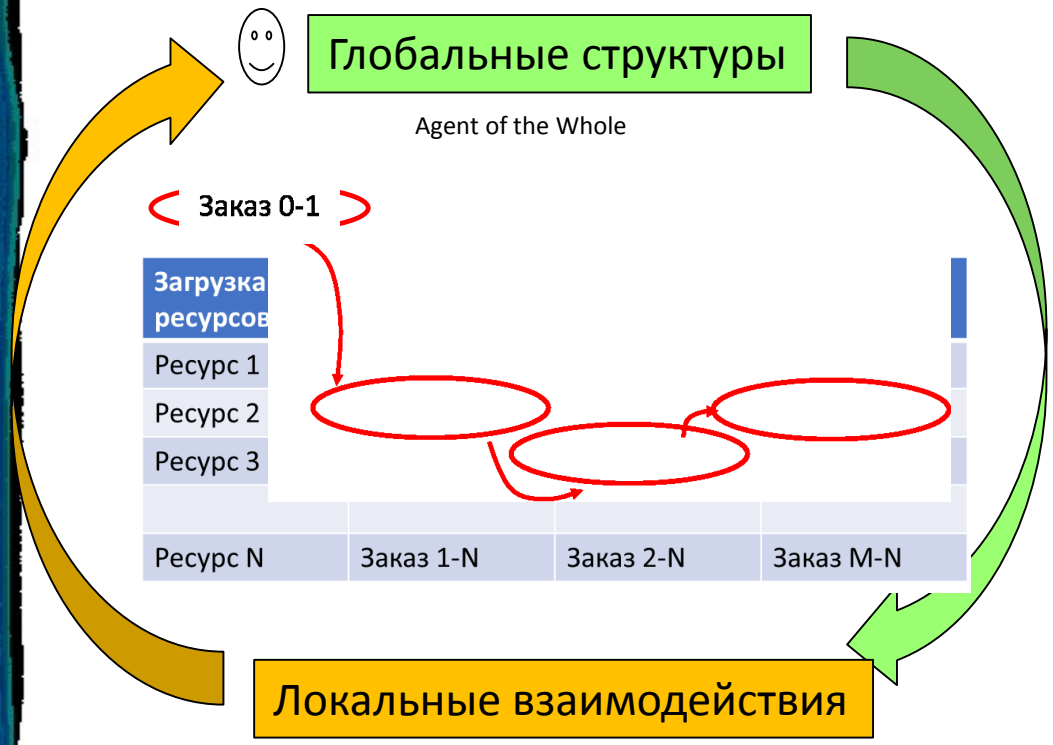


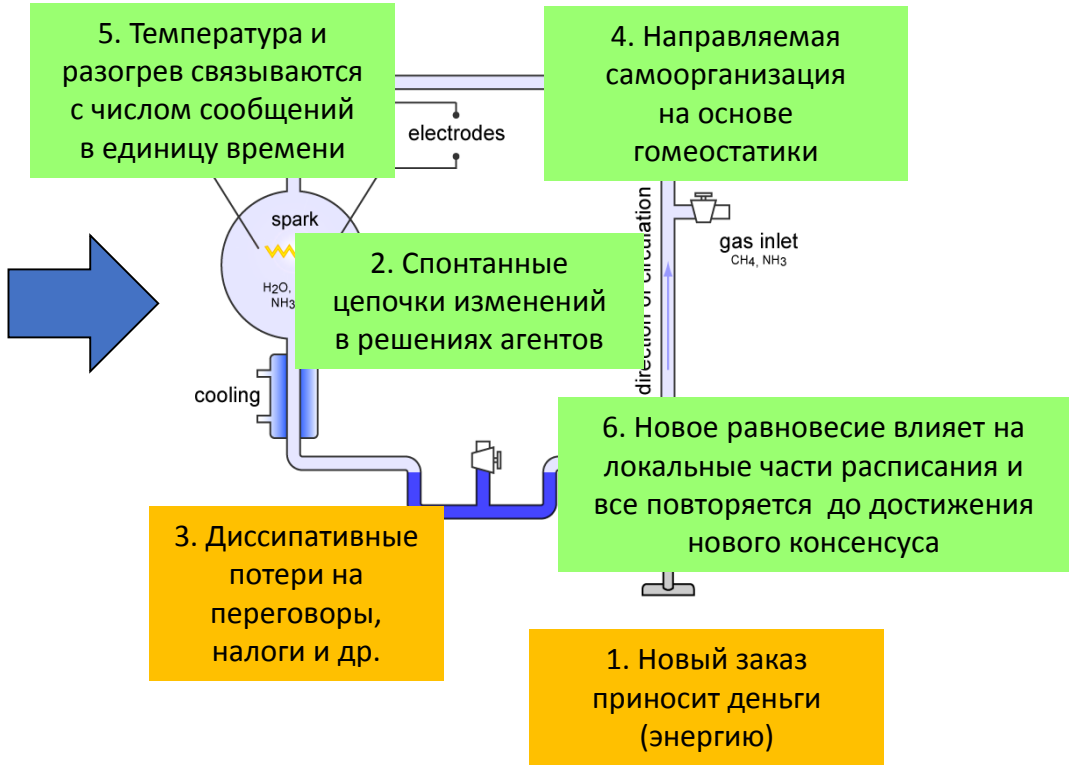
- В дополнение к виртуальному рынку вводится агент целосности
- Агент целого становится наблюдателем за формируемым результатом работы ПВ-сети
- При возникновении «узких мест» агент целого получается возможность найти проблемного агента и попытаться сделать «инвестиции» для улучшения его показателей
- В случае успеха новый результат перестроения расписания сохраняется
- В противном случае выбирается следующий агент или группа агентов для улучшения

. Термодинамическая интерпретация виртуального рынка

Prigogine (1977) & Kaufmann (1993): Emergence by Auto-Catalytic Reactions

Thermodynamic Interpretation of Emergent Intelligence (Rzevski-Skobelev, 2017)





1600 В.С.

Эмерджентный интеллект проявляет себя спонтанными и недетерминированными цепочками согласованно принимаемых агентами коллективных решений («вспыхи») – локальными взаимодействиями, которые рождают глобальные структуры, которые, в свою очередь, влияют на поведение образовавших их базовых элементов.

Это отвечает одной из древнейших пиктограмм человечества – змее, пожирающей свой хвост.

Выводы

дложено определение ЭИ – как формы коллективного интеллекта, возникающего в открытых ɔорганизующихся мультиагентных системах, работающих на протоке энергии

ами работы ЭИ являются цепочки коллективного согласованного принятия решений и енения состояний агентами, направленные на достижение «конкурентного равновесия» сенсуса) при разрешении конфликтов, переводящие систему из одного равновесного ояния – в другое

нейшими качествами ЭИ становятся многокритериальность в принятии решений и высокая тивность, остро востребованные в условиях неопределенности и турбулентности среды.

аботанный ЭИ подход может быть использован как универсальный для создания различных еллектуальных систем управления ресурсами, понимания текста, кластеризации, ектирования сложных систем и других.

т внедрения ЭИ систем для управления ресурсами показывает возможность прироста ективности бизнеса на 15-40%.

овременно, ЭИ – новое поле для научных исследований в области создания ɔорганизующихся и эволюционирующих систем сильного интеллекта будущего.

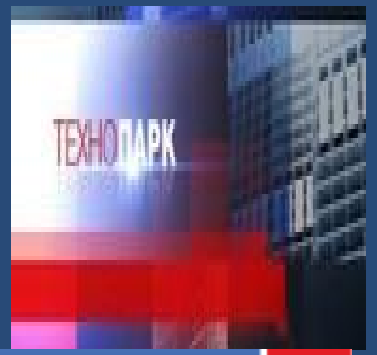
Наши публикации по теме

1. В.И. Городецкий, О.Н. Граничин, П.О. Скобелев. Децентрализация, самоорганизация и эмерджентный интеллект – цифровой взрыв умных технологий // Материалы общих заседаний 15-й Мультиконференции по проблемам управления, Санкт-Петербург, 04-06 октября 2022 г. – СПб.: АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2022. – С. 40-54.С.П.
2. С.П. Грачев, А.А. Жиляев, В.Б. Ларюхин, Д.Е. Новичков, В.А. Галузин, Е.В. Симонова, И.В. Майоров, П.О. Скобелев. Методы и средства построения интеллектуальных систем для решения сложных задач адаптивного управления ресурсами в реальном времени // Автоматика и телемеханика, 2021, № 11, С. 30-67.
3. Rzevski G., Skobelev P., Zhilyaev A. Emergent Intelligence in Smart Ecosystems: Conflicts Resolution by Reaching Consensus in Resource Management. // Mathematics, 2022, 10(11), pp. 1-24. – https://doi.org/10.3390/math10111923.
4. Galuzin V., Galitskaya A., Grachev S. Skobelev P., et al. Autonomous Digital Twin of Enterprise: Method and Toolset for Knowledge-Based Multi-Agent Adaptive Management of Tasks and Resources in Real Time. Mathematics 2022, 10, 1662. - https://doi.org/10.3390/math10101662.
5. Petr Skobelev, Elena Simonova, Sergey Grachev, Igor Mayorov. Adaptive Clustering through Multi-Agent Technology: Development and Perspectives - Mathematics, 2020, 8(10), 1664. – MDPI AG, Switzerland. - https://doi.org/10.3390/math81016642020
6. Rzevski, G.; Skobelev, P. Emergent Intelligence in Large Scale Multi-Agent Systems. Int. J. Educ. Inf. Technol. 2007, 1, pp. 64–71.

http://expert.ru/expert/2014/48/organizatsiya-myislyaschego-roya/

на

http://www.youtube.com/watch?v=qhCmbBU3jkU



РОССИЯ 24

ИНСТИТУТ РЕГИОНАЛЬНОГО РАЗВИТИЯ

НОЦ ИНЖЕНЕРИЯ БУДУЩЕГО

Ростех

РОСКОСМОС

РЖД