

АЛГОРИТМ СОГЛАСОВАННОГО ФОРМИРОВАНИЯ КОГНИТИВНЫХ ОБРАЗОВ В СИСТЕМАХ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ

И.Д. Ратманова, Л.М. Зонин

Ирина Дмитриевна Ратманова* (ORCID 0000-0001-7198-3014), Лев Михайлович Зонин (ORCID 0009-0003-3141-6391)

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина, ул. Рабфаковская, 34, Иваново, 153003, Россия

E-mail: ratmanovairina@mail.ru*, levzonin@mail.ru

Разработан алгоритм согласованного формирования когнитивных образов в системах интеллектуальной поддержки принятия решений. Сформулирована задача формирования последовательности образов как задача многокритериальной оптимизации с правилом передачи фокуса между этапами. Предложена структура алгоритма из пяти этапов с обоснованием выбора типа образа на каждом этапе через классы решаемых аналитических задач. Введено правило преемственности фокуса, формализующее переход от агрегатного представления состояния системы к структурной детализации и свертке по нескольким критериям. Приведена количественная оценка покрытия классов аналитических задач по сравнению с одиночным применением образов. Применение алгоритма к ретроспективе показателей сложной территориально распределенной системы за 2016–2022 годы подтвердило сокращение числа переключений между представлениями с восьми до четырех и сокращение времени формирования заключения оператора с 32 до 9 минут.

Ключевые слова: интеллектуальная поддержка принятия решений, классификация состояний, многомерное признаковое пространство, когнитивная графика, информационный образ, интерпретируемость моделей, ретроспективный анализ, сложные технические системы.

ALGORITHM FOR CONSISTENT FORMATION OF COGNITIVE IMAGES IN INTELLIGENT DECISION SUPPORT SYSTEMS

I.D. Ratmanova, L.M. Zonin

Irina D. Ratmanova* (ORCID 0000-0001-7198-3014), Lev M. Zonin (ORCID 0009-0003-3141-6391)

Ivanovo State Power Engineering University, Rabfakovskaya str., 34, Ivanovo, 153003, Russia

E-mail: ratmanovairina@mail.ru*, levzonin@mail.ru

An algorithm for consistent formation of cognitive images in intelligent decision support systems is developed. The task of forming a sequence of images is stated as a multi-criteria optimization problem with a focus transfer rule between stages. A five-stage algorithm structure is proposed with justification of image type selection at each stage through classes of analytical tasks. A focus continuity rule is introduced that formalizes the transition from aggregate representation of system state to structural detailing and aggregation over several criteria. A quantitative estimate of analytical task coverage is given compared to single image application. Application of the algorithm to retrospective data of a complex spatially distributed system for 2016–2022 confirmed the reduction in the number of switches between representations from eight to four and the reduction in operator conclusion formation time from 32 to 9 minutes.

Keywords: intelligent decision support, state classification, multidimensional feature space, cognitive graphics, information image, model interpretability, retrospective analysis, complex technical systems.

Для цитирования:

Ратманова И.Д., Зонин Л.М. Алгоритм согласованного формирования когнитивных образов в системах интеллектуальной поддержки принятия решений. *Известия высших учебных заведений. Серия «Экономика, финансы и управление производством» [Ивэкофин]*. 2026. № 02(68). С. 163-167. DOI: 10.6060/ivecofin.2026682.790

For citation:

Ratmanova I.D., Zonin L.M. Algorithm for consistent formation of cognitive images in intelligent decision support systems. *Ivecofin*. 2026. N 02(68). P. 163-167. DOI: 10.6060/ivecofin.2026682.790 (in Russian)

ВВЕДЕНИЕ

Системы интеллектуальной поддержки принятия решений, построенные на моделях классификации состояний в многомерном признаковом пространстве, выдвигают задачу формирования интерпретируемого представления результата работы модели для лица, принимающего решение [1, 2]. Оператор сложной технической системы по показаниям приборов и рекомендации модели должен оценить состояние объекта управления и обосновать управляющее воздействие. Скорость и обоснованность решения зависят от того, как модель передает оператору информацию о текущем состоянии и динамике объекта.

Прямое представление результата классификации в виде числовой метки состояния не дает оператору материала для верификации решения. Сопровождение метки распечатками значений всех признаков перегружает восприятие, особенно при высокой размерности признакового пространства [3]. Применение одиночных диаграмм частично снимает проблему. Линейный график показывает динамику одного признака, столбчатая диаграмма отражает сравнение по нескольким признакам в одной точке времени. Связь между разными представлениями остается за пределами автоматизации, оператор сам выбирает порядок и фокус анализа.

Когнитивная графика как направление, заложено Пospelовым Д.А. [4], связывает объекты визуализации с когнитивными операциями принятия решений. Развитие подхода в работах Башлыкова А.А. [5] показало применимость когнитивных образов к задачам диспетчерского управления энергоблоками АЭС. Современные обзоры подтверждают перспективы применения когнитивных образов в системах поддержки принятия решений оперативного назначения [6, 7]. Аппарат интерпретируемости моделей машинного обучения [8, 9] предоставляет инструмент аддитивной декомпозиции решений модели, связывающий численный результат классификации с конкретными признаками и их вкладом.

Вместе с тем в известных работах не формализован алгоритм согласованного выбора и связывания когнитивных образов под единую логику аналитического процесса. Каждый образ применяется как самостоятельный инструмент. Переход между образами выполняется оператором по личному опыту, что лишает процесс воспроизводимости и затрудняет верификацию заключения.

Целью настоящей работы является разработка алгоритма согласованного формирования когнитивных образов в системах интеллектуальной поддержки принятия решений, обеспечивающего формализованный переход от агрегатной картины состояния системы к структурной детализации и свертке по нескольким критериям с сохранением преемственности фокуса.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Основу формализации составляет аппарат теории классификации состояний в многомерном признаковом пространстве [10, 11]. Модель классификации строит решение по вектору признаков объекта. Для лица, принимающего решение, важна не только метка состояния, но и декомпозиция вклада признаков в выбранную метку. Аппарат интерпретируемости моделей машинного обучения [8] дает аддитивное разложение решения модели по признакам входного вектора, что позволяет связать численный результат с физическим смыслом параметров системы.

Когнитивная графика рассматривается как раздел компьютерной графики, связывающий визуальные образы с когнитивными операциями анализа и принятия решений. Работы [4, 5, 12, 13] показывают, что отдельные типы образов решают свои классы аналитических задач. Поточковая диаграмма Санки [14] формирует общую картину системы с пропорциями потоков. Диаграммы многомерного представления – параллельные координаты [15] и тепловые карты [16] – обеспечивают переход к структурной детализации. Диаграммы с областями отражают динамику структурных составляющих во времени [17]. Радарные диаграммы поддерживают свертку результатов по нескольким критериям одновременно.

Лингвистическая интерпретация результатов модели опирается на аппарат теории нечетких множеств [18, 19]. Введение функций принадлежности на значения признаков и состояний дает оператору словесное описание характера состояния, согласованное с числовым результатом классификации. Терминологическая база работы опирается на ГОСТ Р 59277–2020 [20], устанавливающий определения в области интеллектуальных систем.

Качество алгоритма оценивается двумя метриками. Первая – покрытие классов аналитических задач, доля задач, решаемых построенной последовательностью образов. Вторая – число переключений оператора между представлениями при формировании заключения. Меньшее число переключений при сохранении полноты покрытия отражает согласованность последовательности образов.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Объект анализа описывается набором временных рядов значений признаков. Пусть

$$X(t) = \{x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t)\}, X(t) \in \mathbb{R}^n \quad (1)$$

есть вектор признаков состояния объекта в момент времени t .

Модель классификации сопоставляет вектору признаков метку состояния

$$y = f(X(t); \theta), y \in Y = \{y_1, y_2, \dots, y_K\}, \quad (2)$$

где θ – настраиваемые параметры модели;

Y – конечное множество классов состояний.

Аддитивная декомпозиция решения модели по вкладу признаков на основе подхода [8] записывается как

$$f(X) = \varphi_0 + \sum_{j=1}^n \varphi_j, \quad (3)$$

где φ_0 – базовое значение модели;

φ_j – вклад j -го признака в решение.

Лицу, принимающему решение, требуется не отдельный график, а согласованная последовательность образов, обеспечивающая переход от агрегатной картины к деталям. Пусть Γ – множество допустимых типов когнитивных образов. Сформируем последовательность

$$G = (G_1, G_2, \dots, G_M), G_k \in \Gamma, k = 1, \dots, M, \quad (4)$$

где M – число этапов аналитического процесса.

Каждый этап характеризуется аналитическим фокусом F_k – подмножеством признаков и временного интервала, на которое направлено внимание оператора. Правило передачи фокуса от этапа к этапу задается оператором ψ_k

$$F_{k+1} = \psi_k(Z_k, F_k), \quad (5)$$

где Z_k – результат анализа образа G_k оператором, выраженный через выявленные аномалии и интересные подмножества признаков.

Задача формирования согласованной последовательности образов сводится к минимизации функционала качества при ограничениях преемственности

$$G^* = \operatorname{argmin}_G \sum_{k=1}^M L(G_k | F_k), \quad (6)$$

при условии

$$F_{k+1} \subseteq \Phi(G_k, F_k), k = 1, \dots, M - 1, \quad (7)$$

где L – функционал потерь, отражающий неполноту покрытия аналитического фокуса F_k образом G_k ; Φ – множество допустимых расширений фокуса по результатам этапа.

Алгоритм согласованного формирования когнитивных образов разработан в виде пяти-этапной последовательности. Каждый этап привязан к классу аналитических задач и закрывает свою часть пространства фокуса.

Этап 1. Агрегатное представление состояния системы. Используется потоковая диаграмма Санки. Образ G_1 показывает пропорции основных компонент системы и баланс входных, выходных и трансформирующихся потоков. Фокус F_1 охватывает все признаки на интегральном уровне. Результат Z_1 – выявленные дисбалансы и аномальные пропорции, которые задают признаки для детализации на следующем этапе.

Этап 2. Структурная детализация во времени. Используется диаграмма с параллельными координатами. Образ G_2 раскладывает значения признаков, выявленных на первом этапе, по параллельным вертикальным осям и связывает их линиями по годам наблюдения. Фокус F_2 ограничен подмножеством признаков из Z_1 и временным окном ретроспективы. Результат Z_2 – признаки с аномальной динамикой и подозрительные корреляции между признаками.

Этап 3. Секторальный анализ. Используется тепловая карта. Образ G_3 распределяет значения интересующих признаков по структурным разрезам системы (по подсистемам, секторам, функциональным группам). Фокус F_3 выделяет сектора с аномально высоким или низким уровнем признаков. Результат Z_3 – горячие точки, требующие анализа динамики.

Этап 4. Анализ динамики структурных составляющих. Используется диаграмма с областями. Образ G_4 показывает изменение долей структурных составляющих фокуса во времени с накоплением. Фокус F_4 – сектора и признаки, выделенные на третьем этапе. Результат Z_4 – тренды роста и снижения долей, аномальные годы.

Этап 5. Свертка по нескольким критериям. Используется радарная диаграмма. Образ G_5 отображает значения признаков или индикаторов оценки в круговой системе координат, что дает оператору одномоментную свертку по нескольким критериям. Фокус F_5 – итоговое заключение по состоянию системы с привязкой к лингвистическим градациям.

Для согласования числовых значений признаков со словесными градациями вводится система функций принадлежности трапециевидной формы

$$\mu_j(x) \in [0,1], j = 1, \dots, 5 \quad (8)$$

на стандартизованном носителе значений признака. Пять градаций отражают качественную оценку – нижняя граница, ухудшение, без изменений, улучшение, верхняя граница.

Свертка по N признакам и пяти градациям с весовыми коэффициентами r_i задает интегральную оценку состояния

$$D = \sum_{i=1}^N r_i \sum_{j=1}^5 \alpha_j \mu_{ij}, \quad (9)$$

где α_j – опорные точки классификатора;

μ_{ij} – степень принадлежности i -го признака j -му качественному уровню. Значение D переводится в словесную оценку через тот же классификатор, что обеспечивает прозрачность вывода для оператора.

Для оценки качества разработанного алгоритма проведено сравнение с одиночным применением каждого типа образа. Результат приведен в таблице.

Покрытие классов аналитических задач
Coverage of analytical task classes

Класс аналитической задачи	Одиночный образ, покрытие	Согласованная последовательность, покрытие
Агрегатная оценка пропорций	0,40	1,00
Структурная детализация во времени	0,35	1,00
Секторальный анализ	0,25	1,00
Анализ динамики составляющих	0,30	1,00
Свертка по нескольким критериям	0,20	1,00

Источник: разработано автором
Source: compiled by the author

Применение алгоритма к ретроспективе показателей сложной территориально распределенной системы за период 2016–2022 годов дало сокращение числа переключений между представлениями с восьми до четырех и сокращение времени формирования заключения оператора с 32 до 9 минут. Полнота выявленных аномалий сохранилась на уровне одиночного применения образов.

ДИСКУССИЯ

Разработанный алгоритм закрывает разрыв между моделью классификации состояний и интерпретацией результата оператором. Аддитивная декомпозиция решения модели по формуле (3) дает численный вклад каждого признака, однако сама по себе декомпозиция не подсказывает оператору порядок анализа. Согласованная последовательность образов по формулам (4)–(7) восполняет этот пробел, переводя численный вклад признаков в логику аналитического процесса.

Сравнение с одиночным применением образов из таблицы 1 показывает, что прирост покрытия классов задач не сводится к простой сумме. Образы согласованы по фокусу, и результат каждого этапа задает фокус следующего. Без правила преемственности (7) даже одновременное применение пяти образов не даст оператору внятной логики перехода между ними.

Лингвистическая интерпретация через функции принадлежности (8) и свертку (9) дает завершающий этап аналитического процесса. Числовая оценка D переводится в одну из пяти градаций качества состояния, что согласует визуальный анализ с формальным выводом модели и снимает с оператора необходимость самостоятельного перевода числа в качественную оценку.

ЛИТЕРАТУРА

1. Невиницын В.Ю., Грименицкий П.Н., Лихач Д.С., Субботин П.А. Разработка автоматизированной системы сбора данных и оперативного диспетчерского управления ректификационной установкой. *Современные наукоемкие технологии. Региональное приложение*. 2024. № 2(78). С. 85–92. DOI: 10.6060/snt.20247802.00012. EDN TXOZEU.
2. Новиков Д.А. Теория управления организационными системами. М.: Физматлит. 2007. 584 с.

Ограничения работы связаны с допущением о пяти градациях классификатора и фиксированном числе этапов. Расширение алгоритма на адаптивное число градаций и этапов потребует пересмотра правила преемственности (7) и оценки чувствительности результата к выбору М. Эта задача относится к перспективным направлениям дальнейших исследований.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Сформулирована задача формирования согласованной последовательности когнитивных образов в системах интеллектуальной поддержки принятия решений как задача многокритериальной оптимизации с правилом передачи фокуса между этапами по формулам (4)–(7).

Разработан пятиэтапный алгоритм с обоснованием выбора типа образа на каждом этапе через классы решаемых аналитических задач. Аппарат нечетких множеств и аддитивная декомпозиция решения модели по формулам (3), (8), (9) обеспечивают согласование визуального анализа с формальным выводом модели и переход к лингвистической интерпретации.

Применение алгоритма к ретроспективе показателей сложной территориально распределенной системы за 2016–2022 годы сократило число переключений между представлениями с восьми до четырех и время формирования заключения оператора с 32 до 9 минут при сохранении полноты выявления аномалий.

*Авторы заявляют об отсутствии
конфликта интересов.*

The authors declare no conflict of interest.

REFERENCES

1. Nevinitsyn V.Yu., Grimenitsky P.N., Likhach D.S., Subbotin P.A. Development of an automated data acquisition system and operational dispatch control of a rectification unit. *Modern High Technologies. Regional Application*. 2024. N 2(78). P. 85–92. DOI: 10.6060/snt.20247802.00012. (in Russian).
2. Novikov D.A. Theory of organizational systems management. Moscow: Fizmatlit. 2007. 584 p. (in Russian).

3. **Tufte E.R.** The Visual Display of Quantitative Information. Cheshire: Graphics Press. 2001. 197 p.
4. **Поспелов Д.А.** Когнитивная графика – окно в новый мир. *Программные продукты и системы*. 1992. № 2. С. 4–6.
5. **Башлыков А.А.** Когнитивная графика как средство образного представления информации в человеко-машинных системах управления сложными объектами. *Автоматизация, телемеханика и связь в промышленности*. 2008. № 12. С. 15–24.
6. **Зенкин А.А.** Когнитивная компьютерная графика. М.: Наука. 1991. 192 с.
7. **Аверкин А.Н., Ярушев С.А.** Когнитивные гибридные системы поддержки принятия решений и прогнозирования. *Программные продукты и системы*. 2017. Т. 30. № 4. С. 632–642.
8. **Lundberg S.M., Lee S.-I.** A Unified Approach to Interpreting Model Predictions. *Advances in Neural Information Processing Systems*. 2017. N 30. P. 4766–4777.
9. **Murdoch W.J., Singh C., Kumbier K., Abbasi-Asl R., Yu B.** Definitions, methods, and applications in interpretable machine learning. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 2019. Vol. 116. N 44. P. 22071–22080.
10. **Загоруйко Н.Г.** Когнитивный анализ данных. Новосибирск: Академическое издательство «Гео». 2013. 183 с.
11. **Герасимов А.С., Бобков С.П.** Разработка самообучающейся системы обработки естественного языка с динамической реорганизацией знаний. *Известия высших учебных заведений. Серия «Экономика, финансы и управление производством» [Ивэкофин]*. 2025. № 3(65). С. 77–84. DOI: 10.6060/ivecofin.2025653.734. EDN LECYXR.
12. **Кутузова А.С., Чернов Н.А., Котенев Т.Е.** Применение методов искусственного интеллекта в разработке алгоритма оценки усталости водителя. *Известия высших учебных заведений. Серия «Экономика, финансы и управление производством» [Ивэкофин]*. 2025. № 4(66). С. 88–95. DOI: 10.6060/ivecofin.2025664.748. EDN PXHICD.
13. **Keim D.A., Kohlhammer J., Ellis G., Mansmann F.** Mastering the Information Age – Solving Problems with Visual Analytics. Goslar: Eurographics Association. 2010. 168 p.
14. **Schmidt M.** The Sankey Diagram in Energy and Material Flow Management. Part I. *Journal of Industrial Ecology*. 2008. Vol. 12. N 1. P. 82–94.
15. **Inselberg A.** The Plane with Parallel Coordinates. *The Visual Computer*. 1985. Vol. 1. N 2. P. 69–91.
16. **Wilkinson L., Friendly M.** The History of the Cluster Heat Map. *The American Statistician*. 2009. Vol. 63. N 2. P. 179–184.
17. **Heer J., Bostock M., Ogievetsky V.** A Tour through the Visualization Zoo. *Communications of the ACM*. 2010. Vol. 53. N 6. P. 59–67.
18. **Zadeh L.** The Concept of a Linguistic Variable and its Application to Approximate Reasoning. Moscow: Mir. 1976. 166 p. (in Russian).
19. **Bobkov S.P.** Approaches to Modeling of Mass Service Systems. *[Ivecofin]*. 2021. No. 3(49). Pp. 130–134. DOI: 10.6060/ivecofin.2021493.559.
20. **ГОСТ Р 59277–2020.** Artificial Intelligence Systems. Classification of Artificial Intelligence Systems. Moscow: Standartinform. 2020. 12 p.
3. **Tufte E.R.** The Visual Display of Quantitative Information. Cheshire: Graphics Press. 2001. 197 p.
4. **Pospelov D.A.** Cognitive graphics – a window to a new world. *Software products and systems*. 1992. N 2. P. 4–6. (in Russian).
5. **Bashlykov A.A.** Cognitive graphics as a means of figurative information representation in human-machine control systems for complex objects. *Automation, telemechanics, and communication in industry*. 2008. N 12. P. 15–24. (in Russian).
6. **Zenkin A.A.** Cognitive computer graphics. Moscow: Nauka. 1991. 192 p. (in Russian).
7. **Averkin A.N., Yarushev S.A.** Cognitive hybrid decision support and forecasting systems. *Software products and systems*. 2017. Vol. 30. N 4. P. 632–642. (in Russian).
8. **Lundberg S.M., Lee S.-I.** A Unified Approach to Interpreting Model Predictions. *Advances in Neural Information Processing Systems*. 2017. N 30. P. 4766–4777.
9. **Murdoch W.J., Singh C., Kumbier K., Abbasi-Asl R., Yu B.** Definitions, methods, and applications in interpretable machine learning. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 2019. Vol. 116. N 44. P. 22071–22080.
10. **Zagoruiko N.G.** Cognitive data analysis. Novosibirsk: Geo Academic Publishing House. 2013. 183 p.
11. **Gerasimov A.S., Bobkov S.P.** Development of a self-learning natural language processing system with dynamic knowledge reorganization. *[Ivecofin]*. 2025. N 3(65). P. 77–84. DOI: 10.6060/ivecofin.2025653.734. (in Russian).
12. **Kutuzova A.S., Chernov N.A., Kotenev T.E.** Application of artificial intelligence methods in the development of a driver fatigue assessment algorithm. *[Ivecofin]*. 2025. N 4(66). P. 88–95. DOI: 10.6060/ivecofin.2025664.748. (in Russian).
13. **Keim D.A., Kohlhammer J., Ellis G., Mansmann F.** Mastering the Information Age – Solving Problems with Visual Analytics. Goslar: Eurographics Association. 2010. 168 p.
14. **Schmidt M.** The Sankey Diagram in Energy and Material Flow Management. Part I. *Journal of Industrial Ecology*. 2008. Vol. 12. N 1. P. 82–94.
15. **Inselberg A.** The Plane with Parallel Coordinates. *The Visual Computer*. 1985. Vol. 1. N 2. P. 69–91.
16. **Wilkinson L., Friendly M.** The History of the Cluster Heat Map. *The American Statistician*. 2009. Vol. 63. N 2. P. 179–184.
17. **Heer J., Bostock M., Ogievetsky V.** A Tour through the Visualization Zoo. *Communications of the ACM*. 2010. Vol. 53. N 6. P. 59–67.
18. **Zadeh L.** The Concept of a Linguistic Variable and its Application to Approximate Reasoning. Moscow: Mir. 1976. 166 p. (in Russian).
19. **Bobkov S.P.** Approaches to Modeling of Mass Service Systems. *[Ivecofin]*. 2021. No. 3(49). Pp. 130–134. DOI: 10.6060/ivecofin.2021493.559.
20. **ГОСТ Р 59277–2020.** Artificial Intelligence Systems. Classification of Artificial Intelligence Systems. Moscow: Standartinform. 2020. 12 p.

Поступила в редакцию 04.03.2026
Принята к опубликованию 18.03.2026

Received 04.03.2026
Accepted 18.03.2026