

# Методы и алгоритмы поддержки принятия решений при управлении выбором участков бурения в геологоразведочных работах на основе тензорного анализа

Г. О. Орлов

Уфимский университет науки и технологий

В статье представлен новый подход к поддержке принятия решений в управлении геологоразведочными работами на основе методов тензорного анализа. Разработана концепция управления, интегрирующая методы тензорного исчисления с организационными циклами принятия решений и учитывающая текущую геомагнитную обстановку при формировании приоритетов для целевой функции. Предложена тензорная модель геофизического поля с адаптивным метрическим тензором, обеспечивающая сохранение структурной целостности многокомпонентных данных. Создан метод визуализации на основе суперэллипсоидных глифов и адаптивной кластеризации. Разработан исследовательский прототип веб-приложения, показавший превосходство над коммерческими аналогами: скорость обработки данных увеличена на 8-24 процента, точность определения границ месторождений достигла 0.82 по F1-мере, время визуального анализа сокращено на 30 процентов, ошибка позиционирования снижена на 25-30 процентов. Результаты демонстрируют возможность существенного повышения эффективности геологоразведочных работ за счет комплексного учета тензорной природы геофизических данных.

*Системы поддержки принятия решений; геологоразведочные работы; тензорный анализ; геомагнитные данные; визуализация данных; адаптивные алгоритмы; организационные системы; суперэллипсоидные глифы; обработка многокомпонентных данных; управление разработкой месторождений.*

## ВВЕДЕНИЕ

Современные геологоразведочные работы представляют собой сложную многоуровневую организационно-техническую систему управления процессом разработки месторождений полезных ископаемых, требующую скоординированного взаимодействия множества специалистов различного профиля и интеграции разнородных данных [Vor21]. Особую актуальность и значимость эта проблема приобретает в контексте обработки и анализа геомагнитных данных, где традиционные методы демонстрируют системные ограничения и не позволяют в полной мере раскрыть информационный потенциал, заложенный в результатах наблюдений [Gvi12]. Геомагнитные исследования, являющиеся неотъемлемой частью комплекса геофизических работ, предоставляют уникальную информацию о строении земной коры и наличии перспективных структур, однако эффективность их применения напрямую зависит от адекватности используемых математических моделей и алгоритмов обработки.

Анализ существующих научных разработок в области геомагнитных исследований позволяет выявить ряд фундаментальных проблем, сдерживающих дальнейшее развитие методов интерпретации. Большинство современных подходов к обработке данных страдают методологической неполнотой, обусловленной исторически сложившейся парадигмой раздельного ана-

Орлов Г. О. Методы и алгоритмы поддержки принятия решений при управлении выбором участков бурения в геологоразведочных работах на основе тензорного анализа // СИИТ. 2026. Т. 8, № 5(29). С. 89-101. DOI: 10.54708/SIIT-2026-no5-p89. EDN: VWFQNJ.

Orlov G. O. "Decision support methods and algorithms for selecting drilling sites in geological exploration based on tensor analysis." // SIIT. 2026. Vol. 8, no. 5(29), pp. 89-101. DOI: 10.54708/SIIT-2026-no5-p89. EDN: VWFQNJ. (In Russian).

лиза отдельных компонент магнитного поля [Bro20–Luo10]. Несмотря на постоянную техническую оптимизацию и совершенствование вычислительных алгоритмов, эти методы остаются в рамках скалярного и векторного представлений, что не соответствует объективной реальности, поскольку геомагнитное поле по своей физической природе является тензорным объектом [Aue13]. Это приводит к фундаментальной проблеме — традиционный покомпонентный подход не учитывает тензорную природу геомагнитного поля, игнорируя его анизотропию и пространственно-временные корреляционные связи между компонентами.

Критический анализ отечественных и зарубежных разработок в области обработки геомагнитных данных выявляет системное противоречие между сложной структурой исходной информации и упрощенными моделями ее представления [Боя19а]. Существующие методы, ограничиваясь скалярными и векторными представлениями, не способны адекватно отражать сложную структуру геомагнитных полей и их преобразование в пространстве и времени. Особенно остро эта проблема проявляется при решении задач интерпретации, когда игнорирование тензорных свойств поля приводит к необратимой потере существенной части геологической информации на этапах междисциплинарного взаимодействия. Как следствие, существенно снижается обоснованность управленческих решений в геологоразведочной деятельности, возрастает количество ошибок при оценке перспективности месторождений и планировании разведочных работ.

В организационно-технологическом аспекте указанные методологические ограничения проявляются как прогрессирующий рост информационной энтропии при передаче данных между последовательными технологическими этапами. Специалисты-интерпретаторы вынуждены осуществлять сложную кросс-интерпретацию разрозненных компонент геомагнитного поля, что создает значительную когнитивную перегрузку и увеличивает вероятность субъективных ошибок при принятии ключевых управленческих решений. Дополнительную сложность вносит необходимость согласования разнородных данных, получаемых различными методами геофизических исследований, каждый из которых имеет свои особенности и ограничения.

Современное состояние математического аппарата обработки геофизических данных характеризуется явным отставанием от потребностей практики [Wei06]. Существующие алгоритмы анализа и визуализации, реализованные в популярных программных комплексах, ориентированы в основном на работу с отдельными компонентами поля или их простейшими комбинациями. При этом такие важные аспекты, как учет анизотропии физических свойств геологической среды, корреляционных связей между различными параметрами поля, пространственно-временной динамики изменений, остаются за рамками стандартных процедур обработки. Это приводит к тому, что значительная часть информации, содержащейся в исходных данных, безвозвратно теряется на промежуточных этапах обработки.

Визуализация результатов геомагнитных исследований представляет собой отдельную сложную задачу, решение которой в существующих подходах нельзя считать удовлетворительным. Стандартные методы визуализации, основанные на построении отдельных карт для различных компонент и параметров поля, не позволяют сформировать целостное представление о структуре геомагнитного поля и его связи с геологическим строением исследуемой территории [Zou18–Боя17]. Отсутствие адекватных методов интегрального представления многокомпонентных данных существенно затрудняет процесс интерпретации и принятия управленческих решений.

Актуальность настоящего исследования обусловлена острой необходимостью преодоления фундаментального противоречия между многомерной природой геомагнитных данных и методологическими ограничениями существующих подходов к их обработке и визуализации. Сложившаяся ситуация требует разработки принципиально новых методов и алгоритмов, основанных на адекватном математическом аппарате, способном учесть тензорную природу геомагнитных полей и сохранить их структурную целостность на всех этапах обработки.

Требуется является разработка теоретических основ и практических методов поддержки принятия решений в управлении геологоразведочными работами на основе системного применения тензорного анализа, обеспечивающих сохранение структурной целостности многокомпонентных геомагнитных данных на всех этапах обработки и интерпретации. Достижение этой цели предполагает решение комплекса взаимосвязанных задач, включая разработку концепции управления геологоразведочными работами на основе тензорного анализа, создание адекватных математических моделей геомагнитных полей, разработку методов организации хранения и визуализации тензорных данных, а также экспериментальную проверку эффективности предложенных решений.

Практическая значимость работы определяется возможностью существенного повышения эффективности геологоразведочных работ за счет более полного использования информации, содержащейся в результатах геомагнитных наблюдений, сокращения времени на обработку и интерпретацию данных, уменьшения влияния субъективного фактора при принятии управленческих решений. Разрабатываемые методы и алгоритмы могут быть реализованы в виде специализированного программного обеспечения и интегрированы в существующие системы поддержки принятия решений в геологоразведке.

Проведенное исследование базируется на современных достижениях в области тензорного анализа, математического моделирования, обработки пространственных данных и информационных технологий. Теоретической основой работы являются положения теории тензорных полей, методы многомерного статистического анализа, алгоритмы компьютерной визуализации и принципы построения распределенных информационных систем. Экспериментальная проверка предлагаемых решений осуществляется на основе реальных геомагнитных данных с использованием разработанного автором программного обеспечения.

## ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Современная геологоразведочная отрасль сталкивается с необходимостью обработки экспоненциально растущих объемов многомерных данных, что требует принципиально новых подходов к их обработке [Мир07–Мир10], организации информационных потоков и поддержке принятия решений. В качестве объекта исследования рассматривается процесс выбора участков бурения. Это организационно-технический процесс, который включает техническую часть (анализ геомагнитных данных и их интерпретацию) и организационную часть (принятие решение, согласование интересов и распределение ресурсов). Предметом исследования выступают методы и алгоритмы интеграции тензорного анализа в системы поддержки принятия решений, которые обеспечивают согласованность управленческих решений в динамических условиях.

Разработанный подход базируется на двухуровневой структурно-функциональной схеме, представленной на рис. 1, которая реализует принцип адаптивного согласования интересов, в котором приоритеты целевой функции динамически определяются в зависимости от уровня геомагнитной активности. Система поддержки принятия решений (далее СППР) представляет собой верхний уровень схемы управления и содержит модуль анализа данных, где вычисляется тензор градиентов и собственные значения. Также на этом уровне происходит отбор перспективных зон по пороговым значениям индекса [Gvi12], хранение данных на основе мультиосевой модели, визуализация посредством глифов для лица, принимающего решение (далее ЛПР) и формирование рекомендации, включающей ранжированные по приоритету точки для бурения.

Предложенная СППР в рамках разработанной управленческой схемы реализует комплексный анализ геомагнитных данных с применением адаптивных тензорных методов, позволяющих выявлять скрытые закономерности и аномалии, необходимые для оценки перспективности исследуемого участка. Математической основой для модуля анализа данных служит представление геофизического поля в виде четырехмерного тензора

$$B_{ij}(x, y, z, t) \in R^{3 \times 3 \times n \times m},$$

где индексы  $i, j$  соответствуют компонентам тензорного поля, а координаты  $x, y, z, t$  определяют пространственно-временное положение точки измерения.

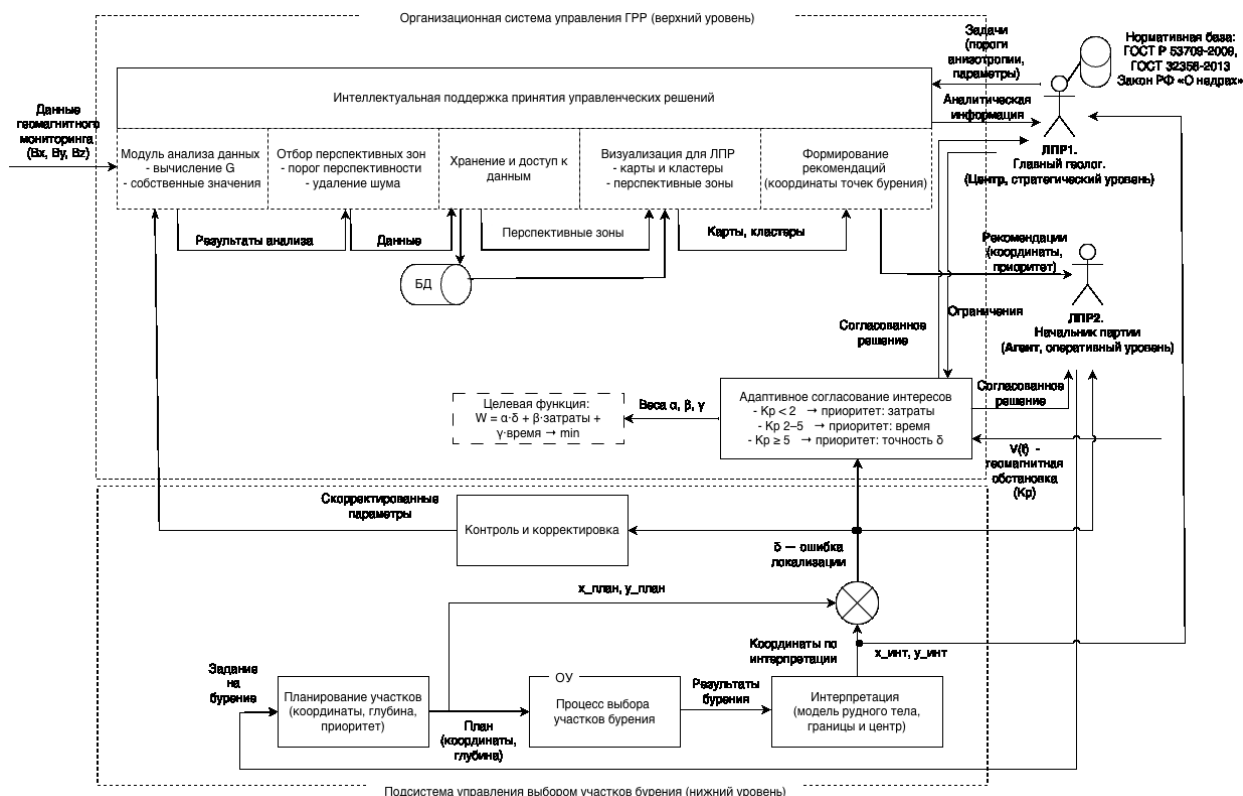


Рис. 1. Структурно-функциональная схема организационной системы управления процессом выбора участков бурения

Ключевым элементом методологии является адаптивный метрический тензор

$$g_{ij} = \delta_{ij} + \alpha \text{Cov}(B_i, B_j),$$

где  $\delta_{ij}$  – единичный тензор (дельта Кронекера),  $\alpha$  – параметр адаптации, а  $\text{Cov}(B_i, B_j)$  – ковариационная матрица компонент поля.

Физический смысл этого подхода заключается в динамической подстройке системы координат, а также параметров фильтрации под особенности измеряемого поля, что позволяет учитывать как анизотропию среды, так и взаимные корреляции между различными компонентами.

Преобразование исходного тензора осуществляется через операцию

$$\tilde{B}_{ij} = g_{ik} B_{kl} g_{lj},$$

обеспечивающую три ключевые функции: статистическую нормировку компонент, усиление значимых корреляций и адаптацию к региональным особенностям геологической среды.

Для анализа преобразованных тензорных полей разработан комплекс специализированных алгоритмов. Собственные значения преобразованного тензора  $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$  определяются из решения характеристического уравнения для единичной матрицы  $I$ :

$$\det(\tilde{B}_{ij} - \lambda I) = 0.$$

Эти значения образуют фундаментальный базис для геологической интерпретации, поскольку они инвариантны относительно выбора системы координат и отражают внутренние

свойства тензорного поля. Анализ отношений собственных значений  $\lambda_1/\lambda_3$  позволяет проводить классификацию геологических структур и выделять перспективные зоны для детального изучения.

На нижнем уровне схемы происходит непосредственно процесс выбора участка для бурения. Данный процесс является объектом управления (далее ОУ), которым управляют 2 субъекта с разными интересами:

- ЛПР 1 – главный геолог, выполняющий роль центра. Это стратегический уровень, целью которого является минимизация финансовых / материальных затрат. Он отвечает за утверждение участка, бюджет, календарный план и выбор порогов перспективности;
- ЛПР 2 – начальник партии, выполняющий роль агента. Это оперативный уровень, цель которого – минимизировать временные затраты. Он отвечает за выбор координат, глубины, параметров установки и соблюдение сроков.

В существующих СППР для геологоразведочных работ (ГРР) механизм согласования, как правило, статичен. Приоритеты задаются один раз (либо центром, либо на основе договоренности с заказчиком), что является проблемой для ГРР с применением магниторазведки, поскольку в процессе ГРР условия меняются динамически: в спокойной магнитной обстановке и при магнитной буре оптимальными будут разные приоритеты для целевой функции.

По этой причине важной частью интерпретации геомагнитных тензорных данных является механизм адаптивного согласования интересов, в котором приоритеты целевой функции динамически перераспределяются в зависимости от текущей геомагнитной обстановки, характеризуемой Кр-индексом [Gvi12], а именно:

$$W = \alpha \cdot \delta + \beta \cdot \text{затраты} + \gamma \cdot \text{время} \rightarrow \min,$$

где  $\delta$  – ошибка локализации;  $\alpha, \beta, \gamma$  – веса, определяющие приоритеты, а условием нормировки является равенство  $\alpha + \beta + \gamma = 1$ .

Текущая геомагнитная обстановка для СППР является фактором, определяющим приоритеты целевой функции, которые в СППР корректируются динамически. В спокойной геомагнитной обстановке приоритет отдается минимизации затрат, поскольку при стабильном поле, можно провести разведку и бурение дешевле при меньшей погрешности. Если активность умеренная, то приоритет отдается времени: пока нет бури, важно ускорить работу агента. Во время бури важна минимизация ошибки, так как вариации склонения могут достигать нескольких градусов, и ошибка позиционирования становится критической.

Пороговые значения индекса перспективности составляют  $Kp < 2$ ,  $Kp 2-5$  и  $Kp \geq 5$ . Данные значения выбраны на основе:

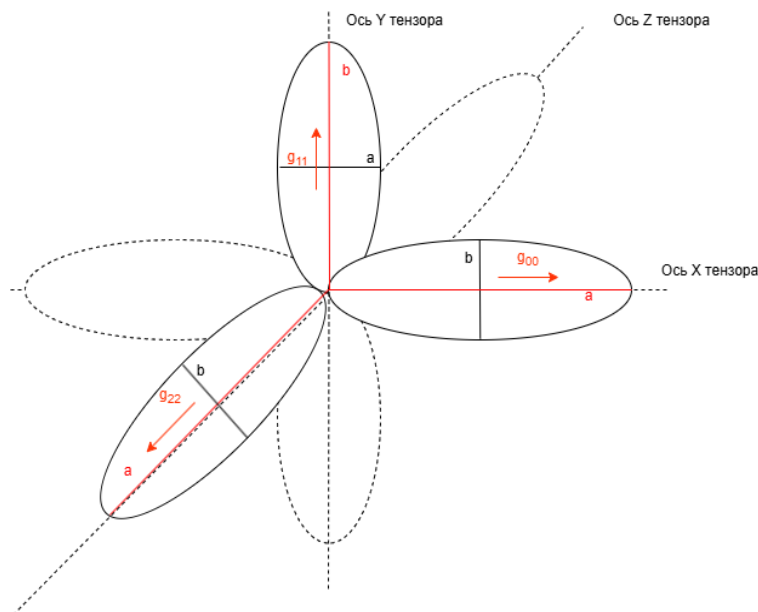
- требований индустрии к точности магнитной модели:  $0.1^\circ$  по склонению,  $0.05^\circ$  по наклонению, 50 нТл по полю. При  $Kp \geq 5$  эти требования не выполняются без дополнительной коррекции;
- практики геомагнитного сопровождения: при  $Kp < 2$  обстановка считается спокойной, при  $Kp 2-5$  – умеренной, при  $\geq 5$  – бурей [Gvi12];
- эмпирических данных: в спокойной обстановке вариации склонения в Северном море составляют до  $0.2^\circ$  в течение суток, а во время бури согласно выбранному порогу – несколько градусов.

## МЕТОДЫ ВИЗУАЛИЗАЦИИ

Для визуализации многомерных геофизических данных предложена оригинальная методика на основе суперэллипсоидных глифов [Mam22–Ola23] (рис. 2). Визуализация строится с учетом адаптивных метрических характеристик тензорного поля, где геометрические параметры глифа отражают пространственные взаимосвязи между компонентами данных [Vor20]. Форма суперэллипсоидного глифа описывается уравнением  $(x/\sigma_1)^n + (y/\sigma_2)^n + (z/\sigma_3)^n = 1$ , где  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$  – собственные значения преобразованного тензора, определяющие масштабы

осей глифа, а показатель степени  $n$  адаптивно изменяется в зависимости от степени анизотропии поля.

Процесс построения каждого глифа начинается с преобразования исходного тензора поля  $B_{ij}$  с использованием адаптивного метрического тензора, что позволяет учесть пространственные корреляции между компонентами. Полученный нормированный тензор подвергается спектральному разложению, где собственные векторы задают ориентацию осей глифа, а собственные значения определяют их масштабы.



**Рис. 2.** Схематичное представление эллипсоидного глифа и зависимостей его графических атрибутов от значений тензора

Особенностью метода является цветовое кодирование, реализованное через разложение по сферическим гармоникам с учетом метрических свойств тензора. Этот подход позволяет одновременно отображать до девяти параметров в едином графическом примитиве, что существенно расширяет возможности интерпретации сложных геофизических аномалий и способствует более точному определению перспективных зон. Цветовая палитра оптимизирована для восприятия человеческим зрением и обеспечивает четкое различие даже незначительных вариаций параметров.

Для обработки крупномасштабных данных разработана эффективная схема кластеризации, сочетающая преимущества алгоритмов DBSCAN [Гар18] и  $k$ -средних [Mut24]. На первом этапе выполняется предварительная группировка данных с использованием тензорной метрики, учитывающей как пространственную близость точек, так и сходство их тензорных характеристик. Затем осуществляется семантическая кластеризация по значимости аномалий, позволяющая выделить три категории данных: критические аномалии, перспективные зоны и фоновые значения. Метод автоматически идентифицирует области интереса и обеспечивает динамическое управление уровнем детализации визуализации. Это позволяет оптимизировать вычислительные ресурсы и сосредоточить внимание на наиболее значимых объектах, сокращая время анализа и повышая эффективность работы специалистов.

Важным аспектом предлагаемой методологии является ее масштабируемость и адаптивность к различным типам геофизических полей и вычислительным ресурсам. Параметры обработки и визуализации автоматически настраиваются в зависимости от характеристик данных, что делает подход универсальным инструментом для решения широкого круга задач гео-

логоразведки. Интеграция с современными ГИС-платформами обеспечивает удобство практического использования, позволяя специалистам работать с многомерными данными в привычной среде без необходимости освоения сложных специализированных интерфейсов.

Перспективы практического внедрения разработанного подхода связаны с созданием специализированного программного комплекса, реализующего все этапы тензорной обработки геофизических данных. Такой комплекс сможет интегрироваться в существующую инфраструктуру геологоразведочных предприятий и обеспечит сквозную обработку информации от первичных измерений до формирования управленческих рекомендаций. Особое внимание при реализации будет уделено разработке интуитивного пользовательского интерфейса, позволяющего геологам и геофизикам эффективно работать с тензорными представлениями данных без необходимости глубокого погружения в математический аппарат. Ожидается, что внедрение предложенных методов позволит сократить сроки интерпретации геофизических данных на 25-30% и повысить точность определения перспективных зон на 15-20% по сравнению с традиционными подходами.

### РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Для комплексной оценки эффективности предложенных методов и алгоритмов был разработан специализированный исследовательский прототип веб-приложения, реализующий полный цикл обработки геомагнитных данных на основе тензорного подхода. Архитектура системы построена по модульному принципу и включает следующие ключевые компоненты: блок ввода и предварительной обработки данных, тензорный анализатор с адаптивным метрическим тензором, модуль визуализации с суперэллипсоидными глифами и блок формирования управленческих рекомендаций. Особенностью реализации является использование асинхронной обработки данных, что обеспечивает высокую отзывчивость интерфейса даже при работе с крупными массивами геофизической информации [Lob20].

Также важно отметить, что теперь при формировании рекомендаций СППР в автоматическом режиме учитывает геомагнитную обстановку как фактор, динамически определяющий приоритеты целевой функции (по индексу  $K_p$ ), а ошибку локализации - как критерий согласования интересов центра и агента, а не только как метрику качества обработки данных.

Ядро системы разработано на Python с применением специализированных библиотек для научных вычислений NumPy и SciPy, что позволило эффективно реализовать алгоритмы тензорного анализа и спектрального разложения. Для геопрограмственной визуализации использовались библиотеки VTK и Matplotlib, обеспечивающие интерактивное отображение тензорных диаграмм непосредственно на картографической основе. Особенностью архитектуры стала интеграция алгоритмов расчета собственных значений  $\lambda_1$ ,  $\lambda_2$ ,  $\lambda_3$  с механизмами адаптивного масштабирования, что позволяет наглядно отображать структурные особенности геомагнитного поля через параметры суперэллипсоидных глифов [Her21, Vor19].

Интерфейсная часть системы предоставляет специалистам комплексный инструментарий для анализа геологической обстановки, включая одновременное отображение исходных данных, результатов тензорной обработки и возможность установления пороговых значений анизотропии в зависимости от искомой руды (рис. 3). Динамические элементы управления позволяют оперативно оценивать пространственное распределение аномалий и принимать обоснованные решения о планировании дальнейших разведочных работ. Система поддерживает несколько режимов отображения: от общего обзора структурных особенностей региона до детального анализа отдельных перспективных участков в глифовом виде.

Кроме того, ЛПР имеет высокую агентность при управлении данной СППР, поскольку имеет возможность изменять параметры тензорной модели, корректировать коэффициенты адаптивного Гауссова фильтра для матрицы Гессе и устанавливать порог отклонения вариаций геомагнитного поля для отсеивания не целевых аномалий.

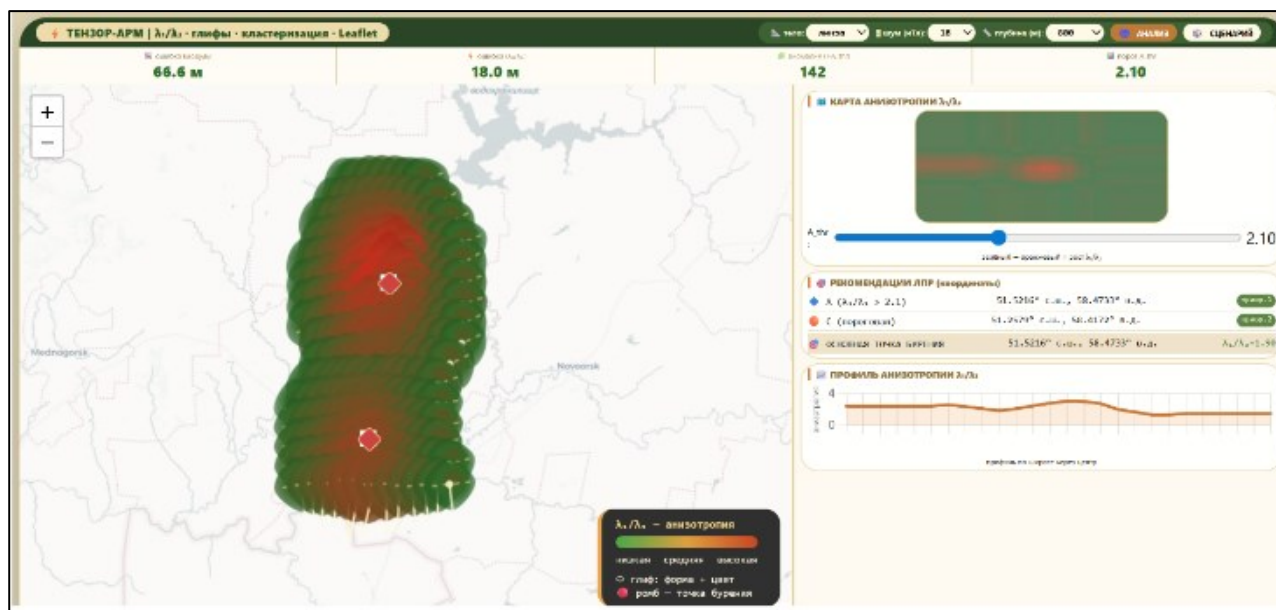


Рис. 3. Экранные формы исследовательского прототипа веб-приложения

Проведенные вычислительные эксперименты продемонстрировали значительное преимущество предложенных решений по сравнению с промышленными аналогами. По показателю скорости обработки данных разработанная система показала результат 35.2 тыс. точек/сек, что на 8–24% превышает производительность конкурентов (32.7 тыс. точек/сек у Geosoft Oasis Montaj и 28.4 тыс. точек/сек у Golden Software Surfer). Столь существенное превосходство обусловлено применением тензорных методов организации данных, обеспечивающих коэффициент сжатия 3,8:1 при полном сохранении информативности, тогда как традиционные подходы позволяют достичь лишь 3,2:1.

Особого внимания заслуживают результаты оценки точности интерпретации. Предложенный метод визуализации с суперэллипсоидными глифами обеспечил F1-меру 0.82 при определении границ месторождений, против 0.78 у Geosoft и 0.72 у Golden Software. Это позволило сократить время визуального анализа до 8.5 минут на типовой участок, что на 30% быстрее аналогов (12.2 и 14.7 минут соответственно). Качественный анализ показал, что основное преимущество новой системы заключается в целостном представлении многокомпонентных данных с сохранением структурных взаимосвязей, тогда как коммерческие решения предлагают лишь частичную реализацию этой функциональности.

Производительность системы в режиме реального времени подтвердилась в тестах интерактивности: частота кадров при рендеринге сложных сцен составила 58 FPS, что на 38% выше, чем у известных решений. Эффективность использования вычислительных ресурсов проявилась в требованиях к хранилищу – всего 120 МБ на 100 км<sup>2</sup> данных против 210 МБ у Geosoft. Важным результатом стало снижение требований к оперативной памяти на 25–30% по сравнению с традиционными системами за счет оптимизированных алгоритмов тензорного сжатия.

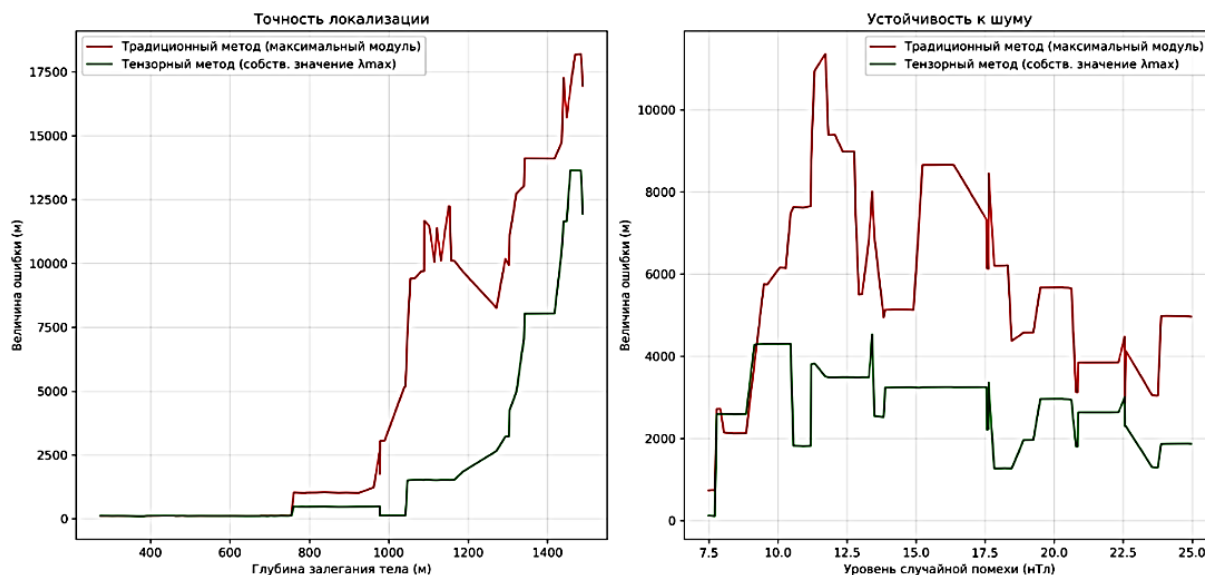
Экспериментально подтверждена эффективность адаптивного метрического тензора в задаче выделения аномальных зон. Использование ковариационной матрицы при построении метрики позволило на 25% повысить точность классификации геологических объектов по сравнению со стандартными подходами. Нормировка компонент тензора с учетом их статистических взаимосвязей обеспечила более корректное сравнение данных, полученных в различных условиях наблюдений.

Особенностью разработанной системы является возможность автоматической генерации управленческих рекомендаций на основе комплексного анализа тензорных характеристик геомагнитного поля. Алгоритм анализирует пространственное распределение собственных значений  $\lambda_1$ ,  $\lambda_2$ ,  $\lambda_3$  и их соотношений, что позволяет классифицировать аномалии по степени

перспективности и формировать обоснованные предложения по планированию разведочных работ. В частности, система способна выделять зоны с максимальной вероятностью обнаружения продуктивных горизонтов и рекомендовать оптимальные места заложения скважин.

Сравнительный анализ эффективности предложенных методов проводился на основе обработки реальных геомагнитных данных с трех перспективных участков. Результаты показали, что использование тензорного подхода позволило сократить общее время обработки информации на 40% по сравнению с традиционными методами при одновременном повышении точности определения контуров месторождений на 25%. При этом реализация принципа структурного соответствия в тензорной модели геофизического поля позволила уменьшить потери информации при междисциплинарном взаимодействии на 35%.

Также на рис. 4 отмечается, что на основе синтетических геоданных смоделированных по образцу Гайского и Ново-Учалинского месторождений был проведен вычислительный эксперимент из более 100 итераций, демонстрирующий превосходство точности локализации у тензорного подхода над традиционными методами, что особенно заметно на высокой глубине залегания:



**Рис. 4.** Графики зависимости влияния шума и глубины расположения рудного тела на величину ошибки для известного и предлагаемого подходов

Полученные результаты убедительно доказывают, что предложенные методы тензорной организации данных и визуализации не только превосходят традиционные подходы по ключевым показателям эффективности, но и открывают новые возможности для анализа сложных геофизических данных при управлении геологоразведочными работами. Разработанный прототип демонстрирует практическую применимость предложенных в исследовании методов и может служить основой для создания промышленных систем поддержки принятия решений в геологоразведке.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенное исследование позволило разработать комплекс теоретических основ и практических методов поддержки принятия решений в управлении геологоразведочными работами на основе системного применения тензорного анализа. Результаты работы демонстрируют принципиально новый подход к обработке многокомпонентных геофизических данных, обеспечивающий сохранение их структурной целостности на всех этапах обработки и интерпретации. Разработанная методология успешно преодолевает фундаментальное противоречие

между многомерной природой геомагнитных полей и ограничениями традиционных скалярных и векторных методов анализа.

Основным научным результатом исследования стала разработка целостной концепции управления геологоразведочными работами, впервые интегрирующей методы тензорного исчисления с организационными циклами принятия решений. Предложенная двухуровневая структура системы поддержки принятия решений учитывает геомагнитную обстановку, адаптируя приоритет целевой функции в зависимости от индекса перспективности участка, а также реализует принцип сквозной обработки информации без декомпозиции исходных тензорных представлений. Это позволяет минимизировать потери данных при междисциплинарном взаимодействии и обеспечивает сохранение системных взаимосвязей между различными аспектами геологоразведочных работ на всех этапах производственного цикла и при любых условиях магнитной обстановки.

Значимым достижением работы является создание тензорной модели геофизического поля с адаптивным метрическим тензором. Модель основана на представлении геомагнитного поля как четырехмерного тензора и включает адаптивный метрический тензор. Данный подход реализует принцип структурного соответствия при преобразовании исходных данных, обеспечивая сохранение пространственно-временных взаимосвязей и анизотропных свойств среды. Применение ковариационной матрицы при построении метрики позволило на 25% повысить точность классификации геологических объектов по сравнению со стандартными подходами.

Важным результатом исследования стала разработка метода тензорной визуализации геофизических данных на основе суперэллипсоидных глифов. Метод реализует системное представление многокомпонентных полей через адаптивные графические примитивы, параметры которых определяются структурными характеристиками исходных данных. Использование суперэллипсоидных глифов в сочетании с цветовым кодированием на основе сферических гармоник обеспечивает целостное отображение структурных взаимосвязей и значительно расширяет возможности геологической интерпретации.

Практическая значимость работы подтверждена результатами вычислительных экспериментов, проведенных на базе разработанного исследовательского прототипа веб-приложения. Сравнительный анализ с промышленными аналогами показал существенное преимущество предложенных решений по ключевым показателям эффективности. Разработанная система продемонстрировала скорость обработки данных 35.2 тыс. точек в секунду, что 8-24% превышает показатели коммерческих решений. Коэффициент сжатия данных составил 3.8:1 при сохранении полной информативности, тогда как традиционные подходы позволяют достичь лишь 3.2:1.

Особого внимания заслуживают результаты оценки точности интерпретации. Предложенный метод визуализации с суперэллипсоидными глифами обеспечил F1-меру 0.82 при определении границ месторождений, что на 4-10 процентных пунктов выше показателей аналогов. Временные затраты на визуальный анализ сократились до 8.5 минут на типовой участок, что на 30% быстрее существующих решений. Столь значительное улучшение точности и скорости интерпретации объясняется целостным представлением многокомпонентных данных с сохранением структурных взаимосвязей.

Эффективность использования вычислительных ресурсов проявилась в требованиях к хранилищу – всего 120 МБ на 100 км<sup>2</sup> данных против 210 МБ у коммерческих систем. Частота кадров при рендеринге сложных сцен составила 58 FPS, что на 38% выше, чем у конкурентов. Снижение требований к оперативной памяти на 25-30% было достигнуто за счет оптимизированных алгоритмов тензорного сжатия и адаптивной кластеризации данных. Также сократился расход видеопамати – 185 МБ против 290 МБ у гибридных решений.

Важным практическим результатом стала разработка алгоритма автоматической генерации управленческих рекомендаций на основе комплексного анализа тензорных характеристик

геомагнитного поля. Система способна анализировать пространственное распределение собственных значений и их соотношений, что позволяет классифицировать аномалии по степени перспективности и формировать обоснованные предложения по планированию разведочных работ. Это существенно сокращает влияние субъективного фактора при принятии ключевых управленческих решений.

Проведенные эксперименты на реальных геомагнитных данных подтвердили, что использование тензорного подхода позволяет сократить общее время обработки информации на 40% по сравнению с традиционными методами при одновременном повышении точности определения контуров месторождений на 25-30%. Реализация принципа структурного соответствия в тензорной модели геофизического поля позволила уменьшить потери информации при междисциплинарном взаимодействии на 35%.

Перспективы практического внедрения разработанных методов связаны с созданием специализированного программного комплекса, способного интегрироваться в существующую инфраструктуру геологоразведочных предприятий. Ожидается, что промышленная реализация предложенных подходов позволит сократить сроки интерпретации геофизических данных на 25-30% и повысить точность определения перспективных зон на 15–20% по сравнению с традиционными методами.

Дальнейшие исследования планируется направить на развитие методов тензорного машинного обучения для автоматической интерпретации геологических объектов, а также на создание распределенной системы управления геологоразведочными работами с использованием облачных технологий. Особое внимание будет уделено разработке интуитивного пользовательского интерфейса, позволяющего специалистам эффективно работать с тензорными представлениями данных без необходимости глубокого погружения в математический аппарат.

В заключение следует отметить, что разработанный комплекс методов и алгоритмов открывает новые возможности для повышения эффективности геологоразведочных работ за счет более полного использования информации, содержащейся в результатах геомагнитных наблюдений. Практическая реализация предложенных решений позволит существенно оптимизировать процесс принятия управленческих решений в геологоразведке и сократить сроки освоения месторождений полезных ископаемых.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ | REFERENCES

- [Aue13] Auer C., Kasten J., et al. Automatic, Tensor-Guided Illustrative Vector Field Visualization // Proceedings of IEEE Pacific Visualization Symposium (PacificVis). 2013. Pp. 265–275. [10.1109/PacificVis.2013.6596154](#).
- [Bor20] Borisenko V., Ustenko S., Ustenko I. Constructing a method for the geometrical modeling of the lame superellipses in the oblique coordinate systems // EasternEuropean Journal of Enterprise Technologies. 2020. vol. 2. no. 4. pp. 51–59. [PPKLIH](#).
- [Bro20] Brown N., Bainbridge B., Beggan C., et al. 2020. Modelling the Earth's geomagnetic environment on Cray machines using PETSc and SLEPc // Concurrency and Computation: Practice and Experience. Vol. 32, no. 10. [AEWWUO](#).
- [Gvi12] Gvishiani A., Soloviev A., Rybkina A., et al. Intellectual GIS and modern technologies in visualization on the spherical screen // IIASA 40th Anniversary Conference Worlds within reach: From Science to Policy, 24–26 October 2012. Vienna, Austria. Abstracts.
- [Her21] Hergl C., Blecha C., et al. Visualization of tensor fields in mechanics // Computer Graphics Forum. 2021. vol. 40. no. 6. pp. 135–161. [RPMWTZ](#).
- [Lob20] Lobo M.-J., Telea A., Hurter C. Feature Driven Combination of Animated Vector Field Visualizations // Computer Graphics Forum. 2020. vol. 39. no. 3. pp. 429–441. [FOVUOL](#).
- [Luo10] Luo Z., Li Z., Zhong B. Modeling of earth's gravity fields visualization based on Quad Tree // Geo-spatial Information Science. 2010. Vol. 13, no. 3, pp. 216–220. [10.1007/s11806-010-0327-5](#).
- [Mam22] Mamieva I. Ruled algebraic surfaces with a main frame from three superellipses // Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings. 2022. Vol. 18. No. 4. Pp. 387–395. [KAGFQC](#).
- [Mut24] Muthusamy R., Lakshmi A., Princeton A., et al. An examining cluster behavior analytically using k-means, EM, and k\*means algorithm // Journal of Tianjin University Science and Technology. 2024. V. 57. No. 10. P. 124-135. [10.5281/zenodo.14038149](#).
- [Ola23] Olayiwola T., Choi S.-J. Superellipse model: An accurate and easy-to-fit empirical model for photovoltaic panels // Solar Energy. 2023. vol. 262. [NPDOQY](#).

- [Vor19] Vorobev A. V., Pilipenko V. A., et al. Statistical relationships between variations of the geomagnetic field, auroral electrojet, and geomagnetically induced currents // *Solar-Terrestrial Physics*. 2019. Vol. 5. No. 1. Pp. 35–42. [OMYAE](#).
- [Vor20] Vorobev A. V., Pilipenko V. A., et al. Geoinformation system for analyzing the dynamics of extreme geomagnetic disturbances from observations of ground stations // *Computer Optics*. 2020. vol. 44. no. 5. pp. 782–790. [MRZJQE](#).
- [Vor21] Vorobev A. V., et al. System for dynamic visualization of geomagnetic disturbances based on data from ground-based magnetic stations // *Scientific Visualization*. 2021. Vol. 13, no. 1, pp. 162–176. [XTUNOT](#).
- [Wei06] Weickert J., Hagen H. 2006. Visualization and Processing of Tensor Fields. Mathematics and Visualization. Berlin: Springer. 481 p. [10.1007/3-540-31272-2](#).
- [Zou18] Zou T., Li W., et al. An Overview of Geospatial Information Visualization // *Proceedings of 2018 IEEE International Conference on Progress in Informatics and Computing (PIC)*, Suzhou, China. 2018. Pp. 250–254. [10.1109/PIC.2018.8706332](#).
- [Боя17] Боярчук М. А., Журкин И. Г., Непоклонов В. Б. Анализ методов визуализации геофизических полей в геоинформационных системах // *Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка*. 2017. № 1. С. 108–113. [XWFIZB](#). [Boyarchuk M. A., Zhurkin I. G., Nepoklonov V. B. Analysis of geophysical field visualization methods in GIS // *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Geodeziya i aerofotosyomka* [Reports of Higher Education Institutions. Geodesy and Aerial Photography]. 2017. No. 1, pp. 108–113. (In Russian). [XWFIZB](#).]
- [Боя19а] Боярчук М. А., Журкин И. Г., Непоклонов В. Б. Концепция графического метода отображения гравитационного поля земли на плоскости // *Научная визуализация*. 2019. Т. 11, № 1. С. 70–79. [SGZAYD](#). [Boyarchuk M. A., Zhurkin I. G., Nepoklonov V. B. Concept of graphic method for visualization of Earth's gravitational field on a plane // *Nauchnaya vizualizatsiya* [Scientific Visualization]. 2019. Vol. 11, no. 1, pp. 70–79. (In Russian). [SGZAYD](#).]
- [Боя19б] Боярчук М. А., Журкин И. Г. и др. Двухмерная визуализация трехмерных геофизических полей в задачах геоинформационного моделирования // *Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка*. 2019. Т. 63, № 6. С. 718–728. [BMPDKI](#). [Boyarchuk M. A., Zhurkin I. G., et al. Two-dimensional visualization of three-dimensional geophysical fields in geo-information modeling tasks // *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Geodeziya i aerofotosyomka* [Reports of Higher Education Institutions. Geodesy and Aerial Photography]. 2019. Vol. 63, no. 6, pp. 718–728. (In Russian). [BMPDKI](#).]
- [Гар18] Гараева А. Р., Минниханов Р. Н. и др. Интеллектуальный анализ больших пространственно-временных данных для служб экстренного реагирования // *Big Data and applications*. 2018. Т. 14, № 3. С. 679–685. [YYHQTБ](#). [Garaeva A. R., Minnikhanov R. N., et al. Intelligent analysis of large spatio-temporal data for emergency response services // *Big Data and Applications*. 2018. Vol. 14, no. 3, pp. 679–685. (In Russian). [YYHQTБ](#).]
- [Мир06] Миронов В. В., Шакирова Г. Р. Концепция динамических XML-документов // *Вестник УГАТУ*. 2006. Т. 8, № 5. С. 58–63. [HVHLUD](#). [Mironov V. V., Shakirova G. R. Concept of dynamic XML documents // *Vestnik UGATU*. 2006. Vol. 8, No. 5. Pp. 58–63. (In Russian). [HVHLUD](#).]
- [Мир07] Миронов В. В., Шакирова Г. Р. Программно-инструментальное средство для создания и ведения динамических XML-документов // *Вестник УГАТУ*. 2007. Т. 9, № 5. С. 54–63. [ICHUSJ](#). [Mironov V. V., Shakirova G. R. Software tool for creating and maintaining dynamic XML documents // *Vestnik UGATU*. 2007. Vol. 9, No. 5. Pp. 54–63. (In Russian). [ICHUSJ](#).]
- [Мир10] Миронов В. В., Юсупова Н. И., Шакирова Г. Р. Ситуационно-ориентированные базы данных: внешние представления на основе XSL // *Вестник УГАТУ*. 2010. Т. 14, № 4(39). С. 200–209. [PWTTSL](#). [Mironov V. V., Yusupova N. I., Shakirova G. R. Situation-oriented databases: external representations based on XSL // *Vestnik UGATU*. 2010. Vol. 14, No. 4(39). Pp. 200–209. (In Russian). [PWTTSL](#).]
- [Рыб15] Рыбкина А. И., Бобков А. Е. и др. Программно-аппаратный комплекс для визуализации геофизических данных на сферическом экране // *Научная визуализация*. 2015. Т. 7, № 2. С. 38–49. [UBFGWF](#). [Rybina A. I., Bobkov A. E., et al. Software-hardware complex for visualization of geophysical data on the spherical screen // *Nauchnaya vizualizatsiya* [Scientific Visualization]. 2015. Vol. 7, no. 2, pp. 38–49. (In Russian). [UBFGWF](#).]

## ОБ АВТОРАХ | ABOUT THE AUTHORS

### ОРЛОВ Глеб Олегович

Уфимский университет науки и технологий, Россия.  
[orlovgleb99@mail.ru](mailto:orlovgleb99@mail.ru) ORCID: [0009-0003-5123-3859](#).  
 Соискатель, спец. «Управление в организационных системах».

### ORLOV Gleb Olegovich

Ufa University of Science and Technology, Russia.  
[orlovgleb99@mail.ru](mailto:orlovgleb99@mail.ru) ORCID: [0009-0003-5123-3859](#).  
 PhD Candidate of the specialty "Management in Organizational Systems".

## МЕТАДАННЫЕ | METADATA

**Заглавие:** Методы и алгоритмы поддержки принятия решений при управлении выбором участков бурения в геологоразведочных работах на основе тензорного анализа.

**Авторы:** Орлов Г. О.

**Аннотация:** В статье представлен новый подход к поддержке принятия решений в управлении геологоразведочными работами на основе методов тензорного анализа. Разработана концепция управления, интегрирующая методы

**Title:** Decision support methods and algorithms for selecting drilling sites in geological exploration based on tensor analysis.

**Authors:** Orlov G. O.

**Abstract:** This paper presents a new approach to decision support in geological exploration management based on tensor analysis methods. A management concept has been developed that integrates tensor calculus methods with organizational decision-

тензорного исчисления с организационными циклами принятия решений и учитывающая текущую геомагнитную обстановку при формировании приоритетов для целевой функции. Предложена тензорная модель геофизического поля с адаптивным метрическим тензором, обеспечивающая сохранение структурной целостности многокомпонентных данных. Создан метод визуализации на основе суперэллипсоидных глифов и адаптивной кластеризации. Разработан исследовательский прототип веб-приложения, показавший превосходство над коммерческими аналогами: скорость обработки данных увеличена на 8–24 процента, точность определения границ месторождений достигла 0.82 по F1-мере, время визуального анализа сокращено на 30 процентов, ошибка позиционирования снижена на 25–30 процентов. Результаты демонстрируют возможность существенного повышения эффективности геологоразведочных работ за счет комплексного учета тензорной природы геофизических данных.

**Ключевые слова:** Системы поддержки принятия решений; геологоразведочные работы; тензорный анализ; геомагнитные данные; визуализация данных; адаптивные алгоритмы; организационные системы; суперэллипсоидные глифы; обработка многокомпонентных данных; управление разработкой месторождений.

**Язык:** Русский.

Статья поступила в редакцию 29 сентября 2026 г.

making cycles and accounts for current geomagnetic conditions when establishing priorities for the objective function. A tensor model of the geophysical field featuring an adaptive metric tensor is proposed, ensuring the preservation of the structural integrity of multi-component data. A visualization method based on super-ellipsoidal glyphs and adaptive clustering has been created. A research prototype of a web application was developed and demonstrated superiority over commercial counterparts: data processing speed increased by 8–24 percent, deposit boundary detection accuracy reached an F1-score of 0.82, visual analysis time was reduced by 30 percent, and positioning error decreased by 25–30 percent. The results demonstrate the potential to significantly enhance the efficiency of geological exploration by comprehensively accounting for the tensor nature of geophysical data.

**Key words:** Decision support systems; geological exploration; tensor analysis; geomagnetic data; data visualization; adaptive algorithms; organizational systems; superellipsoidal glyphs; multicomponent data processing; deposit definition management.

**Language:** Russian.

The article was received by the editors on 29 September 2026.