

Как искусственный интеллект видит будущее в интерпретации данных сейсморазведки

- Обзор, подготовленный с использованием технологий ИИ на основе промта, сформулированного Старобинцем Альфредом Евгеньевичем (seismic-info.ru).

Введение

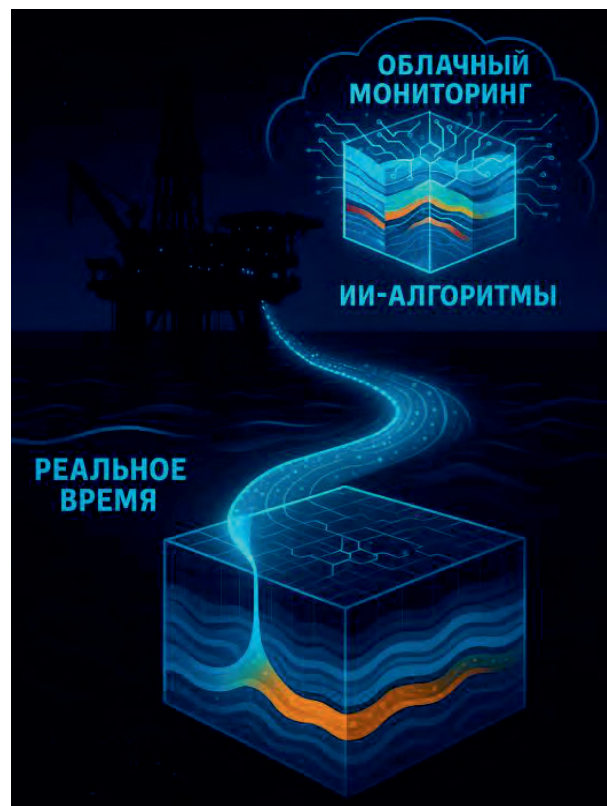
Сейсморазведка вступила в эпоху цифровой трансформации. Рост объёмов данных, развитие машинного обучения, облачных сервисов и распределённых сенсорных систем радикально изменили подход к интерпретации. Сегодня она перестаёт быть завершающим этапом обработки — становится непрерывным, интеллектуализированным процессом, объединяющим геофизику, геологию и анализ данных.

Главный вызов современной отрасли — не просто накопление информации, а умение управлять её качеством и смыслом. Человеческий фактор остаётся важен, но без автоматизации и интеллектуальных инструментов невозможно оперативно анализировать терабайты сейсмических массивов. Искусственный интеллект (ИИ) становится не заменой интерпретатора, а его партнёром: помогает ускорять рутинные операции, выявлять закономерности и снижать неопределённость решений.

Облачные технологии и организация данных

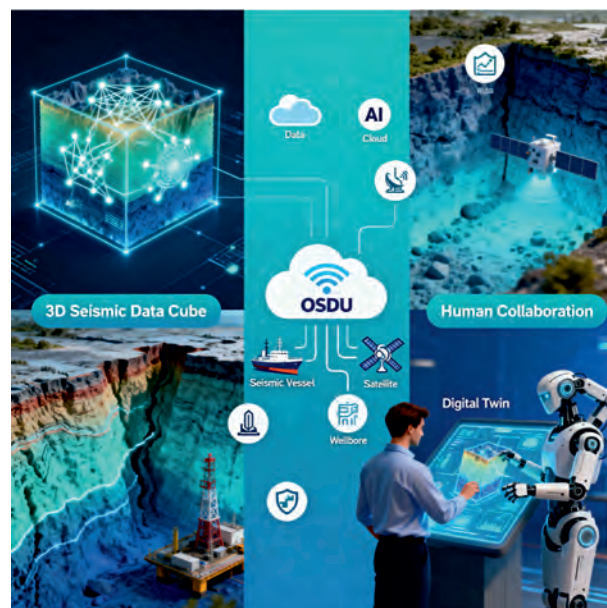
Современная интерпретация опирается на концепцию единого информационного пространства. Облачные платформы, такие как **OSDU**, **IVAAP** и **Opendtect Cloud**, решают проблему фрагментации данных, обеспечивая совместную работу геофизиков и инженеров из разных подразделений.

Облачная инфраструктура даёт масштабируемость, прозрачность и возможность интеграции с ИИ-модулями. Появляется единый «источник истины» —



централизованное хранилище, где все изменения отслеживаются и доступны в реальном времени.

Такая модель повышает скорость принятия решений и делает интерпретацию коллективным, итерационным



процессом, где данные, модели и результаты находятся в постоянном диалоге.

Автоматизация и машинное обучение

Машинное обучение стало одним из ключевых инструментов современной интерпретации. Алгоритмы способны автоматически выделять горизонты, разломы, фациальные зоны и прогнозировать физические свойства пород.



Используются как классические методы (Random Forest, SVM), так и глубокие нейронные сети (CNN, U-Net, 3D-ResNet). Особое направление — **физически информированное машинное обучение (Physics-Informed ML)**, где модели обучаются с учётом физических закономерностей распространения сейсмических волн. Такие подходы позволяют достигать высокой точности при меньших вычислительных затратах. Однако человек по-прежнему играет центральную роль: он проверяет и уточняет результаты, формируя контур взаимодействия «человек — ИИ» (Human-in-the-Loop).

Совмещение физики и ИИ

Одной из наиболее перспективных технологий остаётся **инверсия полного волнового фронта (FWI)** — метод, использующий всю форму сейсмической волны для построения детальных скоростных моделей. Его эффективность значительно возрастает при сочетании с нейросетевыми алгоритмами.

Физически информированные модели (PIML) интегрируют уравнения физики прямо в процесс обучения, что делает результаты более устойчивыми к шуму и снижает риск некорректных решений. Такие гибридные схемы успешно применяются в крупных международных компаниях — TotalEnergies, Shell, Equinor — и позволяют ускорить расчёты в десятки раз без потери точности.

Гибридные AI-методы и классическая интерпретация

Искусственный интеллект не вытесняет традиционные методы, а усиливает их. Классические приёмы — атрибутивный анализ, инверсия, фациальная классификация — получают новое развитие благодаря автоматическому выявлению закономерностей.

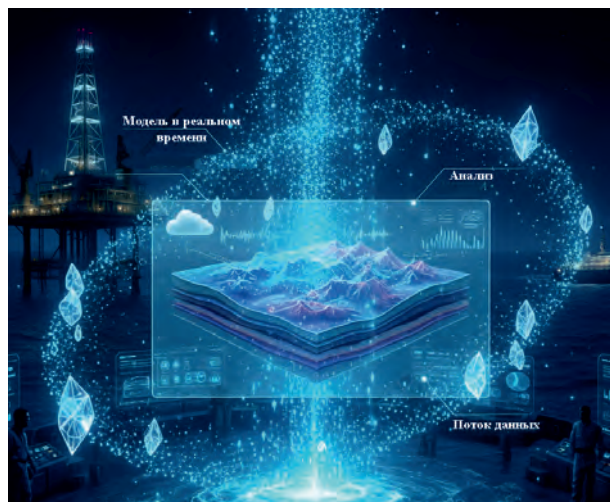
Гибридные системы, такие как **Petrel AI, Paradigm EPOS, OpendText ML Toolkit**, сочетают алгоритмы машинного обучения с физически обоснованными моделями. Это позволяет получать не только карты структур и свойств, но и оценку достоверности — вероятностные карты, показывающие степень уверенности в каждом участке интерпретации.

Такой подход делает процесс не просто быстрее, но и прозрачнее, позволяя учитывать риски при принятии решений.

4D-сейсморазведка и мониторинг CO₂-хранилищ

Современная сейсморазведка всё чаще выходит за рамки трёх измерений. **4D-сейсмика** (или time-lapse-сейсмика) добавляет временной фактор, позволяя наблюдать, как изменяются свойства недр в процессе разработки месторождения или закачки CO₂.

ИИ-алгоритмы значительно упрощают обработку таких данных: автоматизируют совмещение съёмок, устраняют шумы

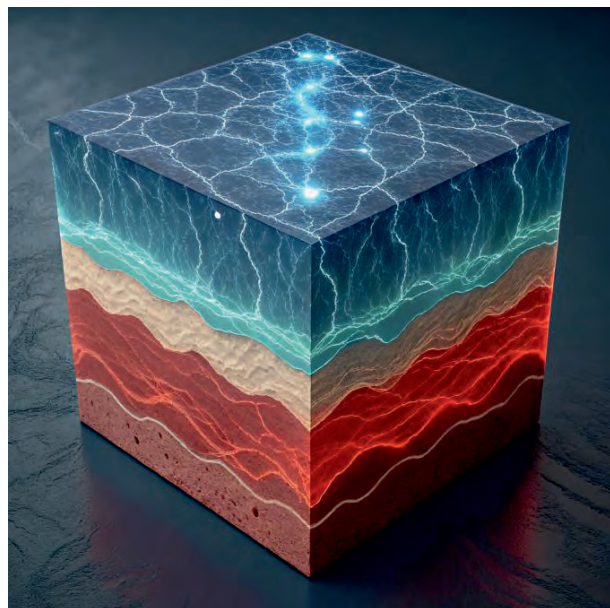


и выделяют реальные изменения физических свойств.

В сочетании с распределёнными оптоволоконными системами 4D-наблюдения превращаются в инструмент постоянного мониторинга, дающий возможность управлять процессами под поверхностью в реальном времени.

Оптоволоконные системы DAS и DTS

Распределённые сенсорные технологии — DAS (Distributed Acoustic Sensing) и DTS (Distributed Temperature Sensing) — создают непрерывное «ухо» и «глаз» под землёй. Они регистрируют акустические и температурные изменения вдоль скважин, трубопроводов и горных выра-



боток, обеспечивая потоковое наблюдение за состоянием недр. Анализ таких массивов данных невозможен без ИИ: нейросетевые модели (CNN, LSTM, автоэнкодеры) выделяют значимые сигналы, фильтруют шум и классифицируют события. DAS и DTS открывают путь к непрерывной цифровой сейсморазведке, где обновление данных происходит почти в реальном времени.

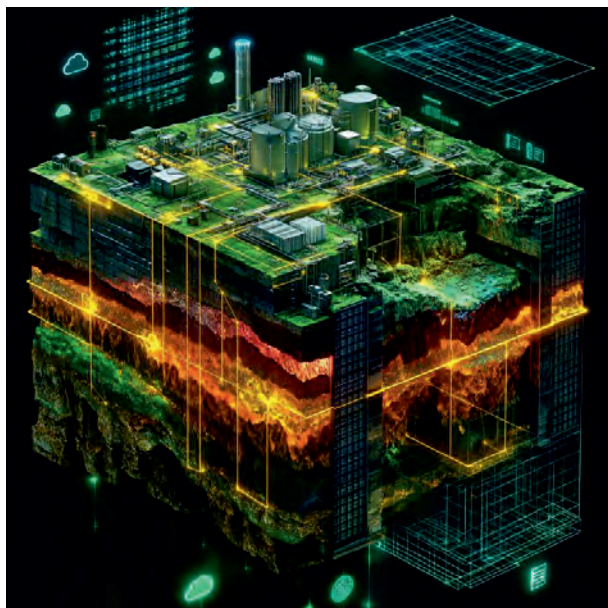
Роль человека и подход Human-in-the-Loop

Появление ИИ не отменяет человеческое участие, а делает его более осмысленным. В рамках подхода **Human-in-the-Loop** интерпретатор становится наставником для нейросети: корректирует результаты, обучает систему на своих примерах и контролирует качество моделей.



Такое взаимодействие реализовано в Petrel AI Assist, OpendText AI Trainer и других инструментах, где правки эксперта используются для переобучения сети. В итоге знания геофизиков становятся частью алгоритма, а алгоритм — помощником в поиске новых закономерностей.

Мультимодальные данные и цифровые двойники



Объединение разнородных источников данных — сейсмики, каротажа, бурения, микросейсмики, DAS/DTS — привело к появлению **цифровых двойников** недр (Digital Twin).

Эти динамические модели отражают состояние пласта в реальном времени и позволяют прогнозировать его поведение. Искусственный интеллект связывает разнородные данные в единую структуру, выявляя корреляции, незаметные при раздельном анализе.

Такие системы активно развиваются в рамках корпоративных экосистем **DELFI**, **GeoAI**, **OSDU**, формируя основу для «умных» месторождений и интегрированного управления недрами.

Explainable AI и доверие к результатам

Одним из главных вопросов остаётся доверие к решениям, полученным ИИ. Для его повышения внедряются методы **Explainable AI (XAI)**, позволяющие понять, какие признаки и участки данных влияли на итоговый результат.

Инструменты Grad-CAM, SHAP, Attention-механизмы делают процесс интерпретации прозрачным. В сочета-

нии с **Байесовскими нейросетями (BNN)** это даёт возможность формировать вероятностные оценки и управлять неопределённостью.

Таким образом, ИИ не просто прогнозирует, но и объясняет, почему он принял то или иное решение — что особенно важно для промышленной геофизики.

Перспективы квантовых вычислений

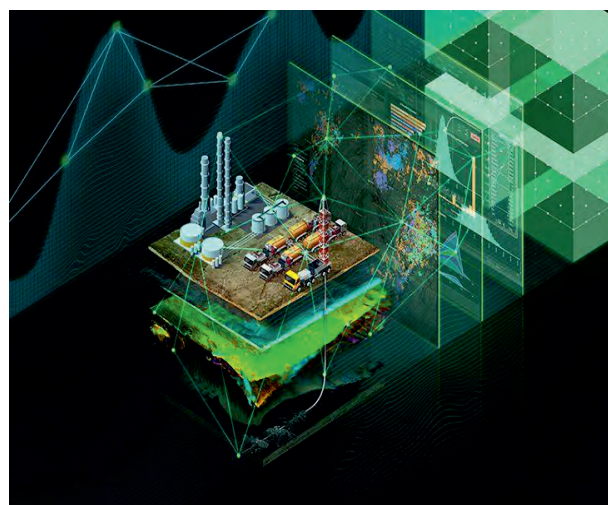
Сложность современных моделей требует огромных вычислительных ресурсов, и именно здесь появляются **квантовые технологии**. Квантовые алгоритмы (HHL, QAOA, Quantum Monte Carlo) потенциально способны многократно ускорить инверсию и оптимизацию.

Ведущие компании — IBM, Schlumberger, TotalEnergies, Сколтех — уже проводят пилотные проекты, демонстрирующие преимущества гибридных квантово-классических схем.

В перспективе именно квантовые вычисления позволят реализовать полностью интерактивную интерпретацию и создавать глобальные цифровые двойники недр в реальном времени.

Заключение

Интерпретация данных сейсморазведки переживает переход от ручных методов к интеллектуализированным и гибридным системам.



Главные тенденции — автоматизация, интеграция ИИ с физикой, развитие облачных платформ, 4D-мониторинг, цифровые двойники и квантовые вычисления.

Человек остаётся ключевым элементом этого процесса, превращаясь из исполнителя в куратора знаний и стратегического аналитика.

Будущее интерпретации — в симбиозе человеческой интуиции и машинного анализа, где искусственный интеллект становится не соперником, а надёжным партнёром, расширяющим границы понимания подповерхностного мира.

Список использованных источников

Зарубежные источники

1. Zhang, Y., Alkhalifah, T. (2023). Physics-informed neural networks for seismic full-waveform inversion. *Geophysics*, 88(3), WA43–WA57. DOI: 10.1190/geo2022-0553.1

2. Kaur, G., Innanen, K. (2024). Hybrid inversion workflows combining deep learning and physical modeling. *First Break*, 42(1), 45–53. DOI: 10.3997/1365-2397.fb2024016

3. Mosser, L., Dubrule, O., Blunt, M. (2023). Bayesian deep learning for seismic inversion with uncertainty quantification. *Geophysical Prospecting*, 71(4), 711–728. DOI: 10.1111/1365-2478.13306

4. Wu, R., Fomel, S. (2023). Explainable AI in seismic fault detection using Grad-CAM visualization. *Interpretation*, 11(2), T345–T358. DOI: 10.1190/INT-2022-0107.1

5. Wrona, T., et al. (2024). Multimodal digital twins of the subsurface: From data lakes to real-time interpretation. *Computers & Geosciences*, 184, 105385. DOI: 10.1016/j.cageo.2024.105385

6. Shell AI Lab (2024). OSDU Data Platform for Subsurface Integration.

<https://community.opengroup.org/osdu/platform>

7. Equinor Digital Subsurface Twin Project (2024). Azure-based integration of seismic, production, and CO₂ monitoring data. <https://www.equinor.com>

8. Brossier, R., Operto, S., Virieux, J. (2023). Full waveform inversion in the cloud: computational and algorithmic advances. *Geophysical Journal International*, 234(1), 251–276. DOI: 10.1093/gji/ggad115

9. Huang, J., Li, Z., Zhang, D. (2025). Quantum machine learning for seismic facies classification. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 63, 41021–41033. DOI: 10.1109/TGRS.2025.3321485

10. INT Inc. (2024). IVAAP and OpendTect Cloud: Interactive Visualization for Energy Data. <https://www.int.com/ivaap>

11. Pasqal & TotalEnergies (2025). Hybrid quantum-classical inversion for seismic imaging. <https://www.pasqal.com/case-studies>

12. Geoteric AI (2024). AI Seismic Interpretation and Cognitive Workflows. <https://www.geoteric.com>

Российские источники

1. Левин, Б. В., Губайдуллин, А. А., Иванов, В. П. (2024). Применение нейросетевых технологий в задачах интерпретации сейсмических данных. *Геофизика*, № 3, 12–23. DOI: 10.25206/2310-9793-2024-3-12-23

2. Шумилов, А. И., Козлова, Е. Г. (2023). Развитие цифровых двойников в геолого-геофизическом моделировании. *Нефтегазовая геология. Теория и практика*, 18(2), 45–59. DOI: 10.17353/2070-5379.2023.2.4

3. Исаев, В. И., Богданов, К. А. (2023). Физически информированные модели в сейсмической инверсии. *Известия вузов.*

Геология и разведка, 6, 72–84.
<https://www.geolrazvedka.ru>

4. Нечаев, Д. С., Салихов, М. Ф. (2024). Автоматизация сейсмической интерпретации с применением методов машинного обучения. Геоинформатика, № 1, 5–15. DOI: 10.18303/2311-7447-2024-1-5-15

5. Калугин, А. И., Чижова, М. В. (2025). Применение распределённых волоконно-оптических систем (DAS, DTS) в мониторинге геологических процессов. Геофизические технологии, № 2, 27–38. <https://geotechjournal.ru>

6. Прохоров, П. Н., Станкевич, С. Н. (2025). Квантовые вычисления и перспективы их применения в геофизике. Вычислительные методы и программирование, 26(1), 104–118. DOI: 10.26089/NumMetProc2025-26-1-104

7. Газпром нефть, Центр цифровых инноваций (2025). Платформа GeoAI: интеграция машинного обучения и геомоделирования. <https://gazprom-neft.ru/geoai>

8. НИПИ Нефтегаз, Сколтех (2024). Применение методов глубинного обучения для выделения разломов и горизонтов на сейсмических данных Западной Сибири. Отчёт по проекту, Москва.

Подробнее об авторах



Старобинц
Альфред Евгеньевич



ИИ -
Искусственный
интеллект