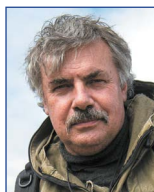


ПРИМЕНЕНИЕ ИИ-АГЕНТОВ И РАЗВИТИЕ НОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ НА РАННИХ СТАДИЯХ ГЕОЛОГО-ПОИСКОВЫХ РАБОТ: ФАНТАЗИИ И РЕАЛЬНОСТЬ



АГАПИТОВ Д.Д.
Исполнительный директор, ООО «ИГТ-сервис», канд. геол.-минерал. наук



ЧИТАЛИН А.Ф.
Главный геолог, заместитель генерального директора по науке, ООО «Институт геотехнологий», канд. геол.-минерал. наук

Давайте отложим в сторону гляцевые презентации со стрелками, уверенно бегущими вверх и демонстрирующими развитие геолого-разведочных и горнодобывающих технологий, и попробуем разобраться, что на самом деле происходит с отраслью. Она видела и золотую лихорадку девяностых с суматошным бурением по каждому намеку на золотоносный кварц, и штиль нулевых, когда бюджеты таяли быстрее, чем мартовские снежинки. И вот теперь мы оказались на пороге того, что модно называть цифровой трансформацией. Но если снять шелуху из красивых лозунгов и тезисов, то реальность выглядит довольно сухо.

КРИЗИС МИРОВОЙ ГЕОЛОГОРАЗВЕДКИ

Конфигурация мировых геолого-поисковых работ сегодня формируется под давлением целого ряда факторов, которые мы не можем игнорировать, даже если очень хочется. Те времена, когда открытие можно было совершить, буквально споткнувшись о выход рудного тела на дневной поверхности, безвозвратно ушли. Простые объекты в глобальном масштабе практически выбраны — хотя они и до того не были простыми. Каждое крупное месторождение не открывалось, а собиралось поколениями геологов по фрагментам данных, как сложный пазл.

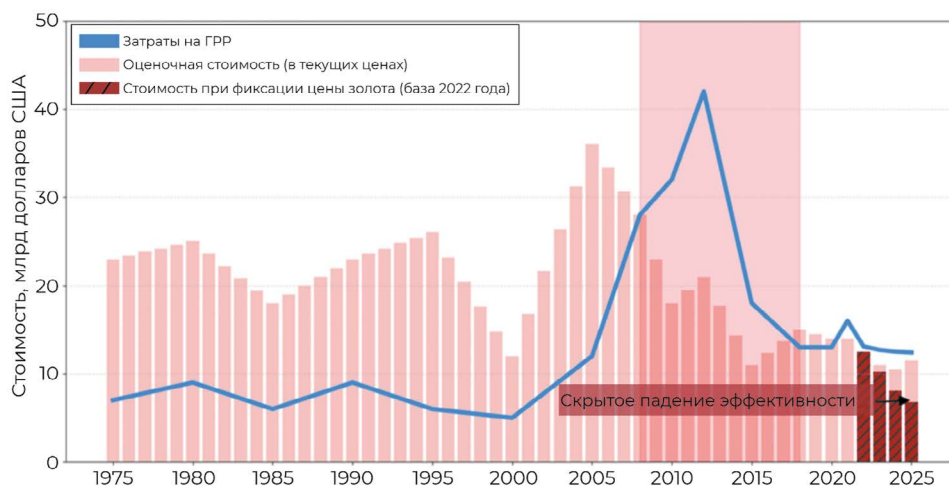
Сейчас мы видим, как среднее содержание полезных компонентов в рудах неуклонно ползет вниз, а глубина поисков, наоборот, уходит в такие горизонты, о которых наши учителя даже не задумывались. Если только не вспоминать роман Алексея Толстого с мечтой геолога Николая Манцева и инженера Петра Гарина вскрыть лазерным тепловым лучом оливинный пояс и залить все мировые рынки золотом. Но это и тогда, и сейчас

относится к фантастическим теориям. Реалии гораздо сложнее.

Возьмем ту же медь. За последние полтора десятилетия средняя глубина открытий запасов этого металла вплотную приблизилась к отметке в километр, и это не чья-то субъективная оценка на глаз, а жесткий тренд, зафиксированный в серьезных отраслевых обзорах.

Вместе с глубиной растет и сложность геологического строения: перекрывающие толщи становятся мощнее, структура — запутаннее, а пострудные процессы так маскируют первичную зональность, например эпитермальных объектов, что старые добрые поисковые модели начинают пробуксовывать. Геологоразведка превращается в невероятно капиталоемкое и, что самое неприятное, все менее предсказуемое занятие.

Здесь мы сталкиваемся с тем, что можно назвать парадоксом эффективности. Если посмотреть на цифры, то мы увидим фантазмагорическую картину: за десятилетие, с 2013 по 2023 год, инвестиции в разведку твердых полезных ископаемых в мире превысили 110 млрд долларов. Сумма астрономическая, но



Источники: материалы MinEx Consulting (Richard Schodde) — до 2021 года, аналитические отчеты S&P Global Market Intelligence — 2022–2025 годы.

Эффективность ГРП: влияние ценового ралли золота на оценку активов (1975–2025)

где результат? Месторождения мирового класса находят все реже, а количество новых объектов сократилось на 80–90 %. Кроме того, в восемь раз за последние 30 лет уменьшилось число крупных месторождений, разведанных на вложенный условный доллар. Получается, что «стоимость» каждого открытия выросла в разы.

Ситуация с рудными месторождениями золота также выглядит не особо оптимистично. Если проанализировать незамысловатый статистический график (см. рис.), то можно отметить переход отрасли от «золотого века» эффективности к затяжному кризису воспроизводства запасов.

В период эффективности (1975–2005) затраты на геолого-разведочные работы (ГРП) оставались относительно низкими (менее 10 млрд долларов), в то время как ценность открытых месторождений регулярно превышала вложения в два-три раза. Наглядно демонстрирует пик системного кризиса «красная зона» (2008–2018) — аномальный интервал, когда на фоне высоких цен на сырье бюджеты ГРП взлетели до исторического максимума (42 млрд долларов в 2012 году), но не принесли адекватного расходам прироста запасов.

Мы видим, как «ножницы» между затратами и результатом раскрылись максимально широко: бюджеты (синяя линия) стремительно взлетают вверх, а ценность

открытий (столбцы) стагнирует или падает. Агрессивное наращивание инвестиций в этот период не привело к сопоставимому росту активов. Это был момент окончательного перехода к поиску «слепых» и глубокозалегающих месторождений. Даже после обвала рынков в 2013–2014 годах эффективность разведки не вернулась к показателям «золотого века» (до 2005 года), что подтверждает структурный, а не временный характер кризиса.

На современном этапе (2021–2025) после пандемийного всплеска в 2021 году бюджеты стабилизировались на уровне 12,4–13,0 млрд долларов, при этом оценочная стоимость балансирует на грани самокупаемости. Кажется, что отрасль начинает восстанавливаться, и ценность новых объектов почти догоняет затраты. Но темно-красные заштрихованные столбцы — это реальный физический объем открытий, если «очистить» его от взрывного роста котировок золота. Получилось, что кризис просто замаскирован, поскольку при сохранении цен 2022 года стоимость найденных в 2025 году запасов упала бы до критических 6,8 млрд долларов, а это исторический минимум за последние 50 лет.

Фактически отрасль открывает все меньше и меньше металла. Видимость того, что ГРП приносит стоимость, создает только галопирующая цена золота.

Если она скорректируется, большинство текущих открытий мгновенно превратится в убыточные активы, так как их физические параметры (содержание, объем) не покрывают затрат на разведку и добычу.

Ричард Шодде в своих работах для MinEx Consulting пишет, что индустрия все чаще занимается «доразведкой известного» в старых рудных районах, вместо того чтобы открывать принципиально новые провинции. Если посмотреть на проблему со стороны, покажется, что геолого-разведочное сообщество просто топчется на месте, выжимая остатки из того, что нашли наши предшественники, и каждый метр бурения требует все больше оправданий перед акционерами и инвесторами, которые ждут отдачи, а не очердных «перспективных аномалий».

Доля разведки с нуля на новых площадях в 2025 году упала до наименьшего в истории наблюдений значения: 2,57 млрд долларов из общих «котловых» на ГРП в размере 12,4 млрд долларов (около 21 %). Компании предпочитают вкладывать деньги в доизучение уже известных месторождений, чтобы минимизировать риски.

За 25 лет индустрия потеряла более половины поисковой составляющей, когда каждый второй условный доллар шел на поиски. Сейчас — только каждый пятый. Новые районы почти не тестируются. Геологоразведка перестала быть поисковой по своей сути, никто не хочет рисковать.

ИИ КАК ПОТЕНЦИАЛЬНОЕ РЕШЕНИЕ

И вот здесь сама постановка задачи меняется коренным образом. Если раньше мы искали очевидные признаки — контрастные вторичные ореолы или отчетливые магнитные аномалии, которые буквально подавали о себе знаки практически с дневной поверхности, — то сегодня нам нужно научиться работать в «зоне слабых сигналов». Это когда аномалия едва превышает фон, когда данные зашумлены, а геологические признаки деградированы под толщей перекрывающих отложений или поздних тектонических событий. Именно этот тупик и породил острый запрос на новые инструменты, среди которых искусственный интеллект (ИИ) стал главной

надеждой и, пожалуй, главным отраслевым раздражителем.

Инвестиции в цифру в геологоразведке и горнодобывающей промышленности растут как на дрожжах. Отчеты Deloitte подтверждают: добытчики-гиганты заливают деньгами автоматизацию и машинное обучение, надеясь, что алгоритмы наконец-то сломают стену неопределенности. Но давайте зададимся вопросом: это действительно цифровая революция, или мы просто в очередной раз попали в цикл завышенных ожиданий, как было в свое время с геостатистикой, когда все ждали чуда от кригинга, а в итоге получили красивые карты, которые все равно приходилось править руками?

Чтобы понять это, необходимо вспомнить базу нашей профессии. Открытие месторождения — не внезапное озарение у костра после удачного дня в поле, а длинная и сложная цепочка последовательно сужающихся решений, та самая «воронка».

Из сотни идей, рожденных на региональной стадии по косвенным признакам и геофизическим съемкам, до детальной оценки доживают в лучшем случае тридцать, до технико-экономического обоснования доходят единицы, а реальными рудниками становятся дватри проекта. И эта «воронка» держится не только на качестве данных, но прежде всего на качестве гипотез — тех самых, что рождаются в голове геолога, когда он стоит на обнажении и пытается как-то связать видимое с тем, что залегает на глубине. И вот здесь кроется самый тонкий момент в работе с ИИ.

Современные алгоритмы, какими бы мощными они ни были, работают прежде всего с корреляциями. Программы блестяще находят статистические закономерности в огромных массивах данных, видят нетривиальные связи между медью и каким-нибудь экзотическим элементом-спутником или едва заметным изгибом изолиний на геофизической карте. Но, и это критически важно, ИИ не понимает геологической причинности. Он не знает, что такое минеральная система в понимании геолога, не видит процесса в динамике: как шел флюид, где он охлаждался, почему формирование рудного тела произошло именно здесь, а не в соседнем блоке, где, казалось бы, те же условия. Машина ловит отражения,

но не чувствует причин, и в этом главная граница ее возможностей.

Конечно, прогресс не стоит на месте. Сейчас в Австралии, Канаде, Китае, России, США и других странах десятки компаний пытаются превратить ИИ в рабочий инструмент для снижения рисков. Мы видим целую россыпь стартапов разной степени успешности: OreFox, Datarock, Earth AI, Mira Geoscience, VerAI Discoveries в Австралии, DroneDeploy, Windfall Geotek и знаменитая KoBold Metals в Канаде. Даже IBM Watson подключали к задачам Goldcorp в США. В России «Группа ИГТ» развивает GeoTarget Pro, в Индии есть Aganitha Cognitive Solutions.

Однако если заглянуть «под капот», мы увидим огромный объем ручного труда. Это не те автономные системы из фантастических фильмов, которые сканируют планету из космоса и ставят крестик «бури здесь». Это инструменты, требующие постоянного присмотра человека, от подготовки данных до финальной интерпретации, когда геологу приходится вручную отсеивать артефакты и корректировать модель, чтобы она не ушла в сторону от реальной геологии.

Почему же ИИ до сих пор не завалил нас открытиями гигантских месторождений? На это можно ответить встречным вопросом: а мы с вами часто находим «гигантов»? Большинство геологов за всю карьеру ни разу не сталкиваются с месторождением мирового класса, и причины такой пробуксовки системные.

Во-первых, у нас есть тяжелое «наследие» в виде данных. По оценкам того же Deloitte, более половины всей геолого-разведочной информации — это хаос. Старые архивные отчеты, отсканированные вкривь и вкось, базы данных по пробам в несовместимых форматах, отсутствие единой системы координат — все это делает машинную обработку практически невозможной. ИИ не умеет «догадываться», что в отчете 1974 года и в цифровой базе 2024 года речь идет об одном и том же объекте, если они не приведены к единому стандарту. Алгоритм не исправляет плохие данные — он их масштабирует. Если у тебя на входе мусор, то на выходе получишь высокотехнологичный мусор, упакованный в красивую 3D-модель, которая бу-

дет выглядеть убедительно на слайде, но приведет к пустой скважине или фатальному результату всего проекта в поле.

Во-вторых, существует проблема обучающих выборок. Самый удачный опыт использования ИИ — в медицине, где у него есть миллионы снимков рентгена, чтобы научиться выявлять опухоль. И самое важное, что медицинское сообщество делится обучающими выборками. В геологии крупные месторождения — это штучный товар, каждое из них уникально по-своему, со своей историей флюидного потока и структурного контроля. У нас просто нет достаточного количества примеров, чтобы машина могла корректно обучиться на разнообразии, а не на случайных совпадениях. К тому же имеющиеся массивы данных и даже датасеты для потенциального обучения компании упорно прячут друг от друга.

И наконец, пресловутый разрыв между дисциплинами. Математики и квази-программисты, использующие языковые модели для вайб-кодинга¹, обычно не знают разницы между базальтом и габбро, а геологи старой закалки не могут формализовать свои знания в виде четких параметров, понятных компьютеру. В итоге модель формально работает, выдает какие-то результаты, но они не имеют ничего общего с реальной геологической логикой — той самой, что рождается из многолетнего опыта чтения обнажений и керна.

Самый болезненный вопрос здесь — это чистота первичных данных. Любая ошибка при отборе проб, любая путаница с навесками в лаборатории или кривая привязка точек на местности при использовании ИИ превращается в системную катастрофу. Машина воспринимает эти ошибки как истинные закономерности и начинает находить фантомные рудные тела там, где их никогда не было.

Именно поэтому мы убеждены: эффективность ИИ в нашей профессии определяется не сложностью нейросети, а качеством ее интеграции с живой геологической экспертизой. Геолог был и остается центральной фигурой. Он — архитектор модели. Только человек может сформулировать вменяемую гипотезу и решить, какие признаки действительно важны, а какие — просто шум,

¹ Подход в программировании, при котором код вместо разработчика пишут ИИ-агенты. — Прим. ред.

рожденный поздними геологическими процессами или погрешностью съемки.

Есть задачи, где без геолога вообще никак. Попробуйте доверить машине интерпретацию эпитеpmальной золото-серебряной системы, где все завязано на тончайшие структурные нюансы и изменение состава окolorудных пород, на те самые прожилки, которые вы видите только в свежем керне под лупой. Или анализ слабые геофизических аномалий, которые могут указывать на слепое рудное тело на глубине 500 м, а могут быть просто особенностью состава перекрывающих рыхлых отложений. Тут нужно комплексное понимание физики и химии процесса, а не просто поиск совпадений признаков в базе данных.

Однако сегменты, где ИИ уже сегодня приносит реальную пользу, существуют. Прежде всего это автоматизация рутины. Когда необходимо проанализировать тысячи погонных метров керна, искусственный интеллект с компьютерным зрением справляется быстрее и объективнее человека, не уставая к концу смены и не пропуская из-за этого мелкие текстурные детали. Другая область — первичная сортировка участков и автоматизация литологического картирования по данным дистанционного зондирования, когда алгоритмы помогают выделить перспективные зоны среди тысяч квадратных километров, сокращая время на полевые маршруты. Наиболее перспективно выглядят гибридные подходы: берем классическую геологическую модель минеральной системы и докручиваем ее методами машинного обучения. Таким образом компенсируются слабости обоих подходов: мы даем компьютеру логическую структуру, а он нам — новые, неочевидные взаимосвязи внутри нее, которые человеческий глаз мог бы и не заметить в океане цифр.

Роль геолога при этом не исчезает, она эволюционирует. Он уже не просто полевик с геологическим молотком и горным компасом, а инженер данных, который должен понимать, как работает цифровой ассистент, как калибровать его под конкретный рудный район и как

не дать ему уйти в математические фантазии. При этом в поле геологи по-прежнему незаменимы — никакая цифровая камера не компенсирует «чувства породы» на обнажении, когда проводишь рукой по поверхности и ощущаешь, как меняется ее рисунок, или осмотра свежего керна, текстура и цвет которого говорят иногда больше, чем любая спектрометрия.

ПРОГНОЗ

Не будем создавать конкуренцию легендарному Рэю Курцвейлу² в технологическом прогнозировании, но если заглянуть в ближайшее будущее, на горизонт от одного до трех лет, то главным прорывом станет даже не ИИ сам по себе, а наведение порядка в данных и их стандартизация. Без этого фундамента любые вложения в нейросети — это деньги на ветер, которые уйдут в красивые дашборды без практической отдачи. Параллельно мы увидим расцвет компьютерного зрения: автоматическое спектральное распознавание минералов и структурных элементов с лидаром³ станет стандартом в документации, освобождая время для настоящей интерпретации.

К 2030 году мы, скорее всего, придем к полной автоматизации сбора данных в поле. Дроны с гиперспектральными сенсорами и лидарами уже сегодня позволяют строить детализированные цифровые модели обнажений, а портативные анализаторы делают химический анализ в режиме реального времени прямо на месте. Вся информация будет стекаться в облачные платформы, формируя так называемые цифровые двойники месторождений. Это уже будет не статичная картинка, а живая, постоянно обновляемая репрезентация, где каждая новая проба мгновенно меняет контуры прогнозных зон, а геолог может оперативно корректировать гипотезу, не дожидаясь конца сезона.

Станут доступными полуавтономные буровые установки малого диаметра, управляемые ИИ, которые будут сразу сканировать керн гиперспектральными камерами. Бурение станет не только

² Американский изобретатель и футуролог, известный своими прогнозами о развитии ИИ и технологий. — Прим. авт.

³ Датчик, использующий лазерные импульсы для сканирования пространства и создания высокоточных 3D-моделей окружения. — Прим. ред.

источником материала, но и онлайн-потока данных для уточнения модели участка, сокращая количество пустых скважин и ускоряя цикл от идеи к проверке.

Геолог — оператор дронов будет управлять роем воздушных и наземных аппаратов, планируя маршруты и интерпретируя первые данные на лету. Куратор цифровых двойников займется актуализацией 3D-модели участка, обеспечивая, чтобы она отражала реальность, а не только алгоритмические предположения. Появится профессия геолога-валидатора, проверяющего корректность гипотез ИИ-агентов и их интерпретаций, того самого человека, который ставит финальную точку, опираясь на свой многолетний опыт.

К 2035 году нам грозит практическое воплощение концепции Geoscience 4.0 — полной интеграции ИИ, интернета вещей и робототехники. Гиперспектральная разведка нового поколения даст возможность строить 3D-карты подповерхностного пространства с тепловыми следами флюидных потоков в реальном масштабе. Будут созданы автоматизированные геохимические «нанолaborатории», способные выдавать данные прямо в поле. ИИ-агенты, основанные на больших языковых моделях, научатся не просто извлекать информацию, но и понимать ее контекст, одновременно обрабатывая текст архивных отчетов, оптические и спектральные изображения ядра, таблицы анализов и графы геофизики.

К 2040 году квантовые вычисления откроют дверь к моделированию рудообразующих систем на атомарном уровне: миграции насыщенных минералами флюидов, поведения изотопов, термодинамики в сложных многокомпонентных средах, где классические суперкомпьютеры пасуют перед объемом расчетов. В теории такая система сможет самостоятельно выдвигать гипотезы и даже планировать заверочное бурение, но на практике ответственность за принятие решения и интерпретацию останется на человеке — потому что природа все равно найдет способ нас удивить, а ошибка в модели будет стоить компании десятки и сотни миллионов денежных единиц.

Мы увидим серьезное расслоение отрасли: те компании, которые смогут выстроить мостик между классической геологией и миром данных, уйдут далеко

вперед, открывая новые провинции там, где другие видят только белые пятна. Остальные будут тратить миллионы на пустые скважины, списывая неудачи на геологический риск.

Наш прогноз: в обозримой перспективе искусственный интеллект не заменит геолога. Это просто очень мощный, очень чувствительный инструмент, который требует ювелирной настройки, постоянного обучения и калибровки под конкретный объект. Если вы пытаетесь разработать и внедрить ИИ-агента без участия сильной геологической службы, вы просто выбрасываете деньги инвестора в цифровую бездну, кормя разработчиков абстрактных программ.

Реальный успех возможен только при наличии верифицированных и стандартизированных данных, обоснованной геологической гипотезы и корректно выбранного алгоритма. В этом треугольнике вероятность открытия действительно возрастает — не магически, не «в один клик», но вполне ощутимо для бизнеса, когда каждый новый сезон приносит не просто цифры, а знания.

Да, вероятно, к 2030 году искусственный интеллект будет участвовать в большом количестве открытий (есть прогнозы, что к этому времени ИИ-агенты станут «соучастниками» до 50 % открытий месторождений), но именно как ассистент, как цифровой усилитель наших знаний, который берет на себя однообразные задачи и подсвечивает то, что мы могли пропустить.

Профессия меняется, рутина уходит под автоматизацию, но суть поиска остается прежней: это всегда состояние человеческого ума с природой, которая умеет прятать свои сокровища за тысячами метров пород и миллионами лет истории.

Ключевая ошибка сегодня — это ожидание «чуда из коробки». Его не будет. Есть итерационный процесс, дисциплина в обращении с информацией и четкая постановка задачи, когда геолог определяет рамки, а ИИ их заполняет.

Если убрать маркетинговую пену, ИИ в геологоразведке — это не фантазия, но и не панацея. Это новая реальность, в которой нам с вами предстоит работать, сочетая привычное «чувство породы» с новыми цифровыми инструментами. Все остальное — от лукавого. 