

УДК 550.834:004.9

От экспертного опыта к математическому проектированию: новая парадигма подготовки проектов 3D-сейсморазведки

■ Федоров А.Б., г. Москва.

Аннотация. Современные проекты 3D-сейсморазведки характеризуются высокой стоимостью, большим числом взаимосвязанных технологических параметров и возрастающими требованиями к эффективности использования оборудования. Несмотря на цифровизацию большинства производственных процессов, проектирование полевых работ во многих случаях по-прежнему остается экспертной задачей, основанной на ручных расчетах, электронных таблицах и практическом опыте специалистов.

В статье рассматривается переход к новой концепции математического проектирования, в которой выбор параметров работ осуществляется на основе автоматизированного анализа множества возможных сценариев. На примере программной экосистемы *Seismic Pro Dashboard* показано, каким образом современные вычислительные технологии позволяют объединить проектирование, оценку производительности, анализ качества и подготовку технического обоснования в единую цифровую среду.

Конец эпохи ручного проектирования

Любая технология проходит несколько этапов развития. Сначала решения определяются преимущественно опытом специалистов. Затем появляются методические рекомендации и нормативы, формируются расчетные подходы, а вслед за ними — программные средства, автоматизирующие отдельные операции. Сегодня сейсморазведка подошла к следующему этапу, когда автоматизации отдельных расчетов уже недостаточно и требуется переход к комплексному математическому проектированию.

Еще двадцать лет назад проект сейсморазведочных работ представлял собой сравнительно ограниченный набор параметров, которые опытный геофизик мог оценить вручную, порой интуитивно, на основании собственных представлений о рациональности. Современные проекты значительно сложнее. При их подготовке необходимо одновременно учитывать размеры площади, плотность системы наблюдений, производительность источников, количество доступного оборудования, характеристики реги-

стрирующего комплекса, логистические ограничения, календарные сроки, требования к качеству данных и экономические условия.

Все эти параметры тесно взаимосвязаны. Изменение шага наблюдений может повлиять на необходимое количество оборудования, длительность регистрации, схему перемещения полевых подразделений, стоимость проекта и качество получаемых данных. Поэтому проектирование уже нельзя рассматривать как последовательность отдельных инженерных расчетов. Оно становится задачей поиска оптимального решения в многомерном пространстве взаимозависимых вариантов.

Именно на этом уровне возможности традиционного экспертного подхода начинают сталкиваться с объективными ограничениями. Опыт геофизика не теряет своего значения, но уже не может оставаться единственным инструментом проектирования. Даже высококвалифицированный специалист способен подробно сравнить лишь ограниченное число сценариев, тогда как вычислительная система может за короткое время проа-



▲ Рис. 1. Переход в проектировании от опыта и интуиции к математической обоснованности решений.

нализировать сотни и тысячи комбинаций параметров.

При этом преимущество современных программных средств заключается не только в скорости расчетов. Главное — в возможности исследовать значительно более широкое пространство допустимых решений, выявлять скрытые взаимосвязи и находить варианты, которые сложно получить путем последовательного ручного подбора.

В этих условиях меняется и роль инженера. Раньше специалист самостоятельно выполнял основную часть расчетов и на их основе формировал проектное решение. Теперь он задает исходные ограничения и критерии оптимизации, анализирует предложенные системой сценарии, оценивает их технологическую реализуемость и принимает окончательное решение.

Таким образом, программный комплекс становится не заменой специалиста, а его интеллектуальным помощ-

ником. Он берет на себя трудоемкий перебор вариантов и математическую оценку решений, оставляя за инженером постановку задачи, профессиональную интерпретацию результатов и ответственность за выбор итоговой конфигурации проекта.

Именно этот переход — от ручного расчета отдельных параметров к системному математическому поиску оптимального решения — определяет начало новой эпохи проектирования сейсморазведочных работ.

Функциональная архитектура Seismic Pro Dashboard

В основе Seismic Pro Dashboard лежит принцип непрерывного проектирования, при котором весь процесс подготовки сейсморазведочных работ рассматривается как единая цепочка взаимосвязанных инженерных решений. В отличие от традиционного подхода, когда различные расчеты выполняются независимо

друг от друга в отдельных программах или электронных таблицах, система объединяет все этапы подготовки проекта в рамках единой математической модели. Это позволяет не только исключить повторное выполнение расчетов, но и обеспечить автоматическое распространение изменений по всей структуре проекта. Любое изменение исходных параметров немедленно отражается на производительности, потребности в оборудовании, качестве данных и итоговой эффективности проекта.

Функционально система состоит из четырех взаимосвязанных подсистем, каждая из которых отвечает за решение определенного класса инженерных задач.

Проектирование

Первым этапом является математическое проектирование полевых работ. На этой стадии система автоматически формирует и анализирует большое количество возможных вариантов организации съемки. Исходными данными служат геометрия площади, параметры системы наблюдений, ограничения по оборудованию, производительности и срокам выполнения проекта.

В отличие от традиционного последовательного подбора параметров, система одновременно рассматривает все допустимые комбинации и определяет оптимальное соотношение между производительностью работ, необходимым количеством оборудования, продолжительностью регистрации и объемом переключений. Одновременно рассчитывается полный состав оборудования, необходимого для реализации каждого варианта проекта, что позволяет уже на стадии проектирования объективно оценить потребность в материальных ресурсах и выбрать наиболее рациональную конфигурацию полевых работ.

Производительность

После определения возможных вариантов организации работ выполняется моделирование производительности проекта.

Специализированные модули рассчитывают циклограммы регистрации для различных технологий возбуждения, определяют ожидаемую суточную производительность, коэффициенты использования виброисточников и оптимальные параметры высокопроизводительных методов регистрации.

В результате проектировщик получает не экспертную оценку темпов выполнения работ, а количественный прогноз производительности для каждого рассматриваемого варианта. Это позволяет заранее определить наиболее эффективную организацию полевого процесса и оценить возможность выполнения проекта в заданные календарные сроки.

Контроль качества

Высокая производительность не является самоцелью, если достигается за счет ухудшения качества данных. Поэтому следующим этапом проектирования становится математическая оценка качества будущей регистрации.

Средства гармонического анализа позволяют исследовать вероятность возникновения интерференционных помех, определить безопасные режимы работы высокопроизводительных технологий возбуждения и оценить влияние выбранных параметров на отношение сигнал/шум. Фактически система переносит значительную часть контроля качества из полевых условий на этап проектирования, позволяя заранее выявить потенциально опасные режимы работы и исключить их еще до начала регистрации.

Такой подход существенно снижает вероятность возникновения полевого брака и уменьшает риск дорогостоящих повторных работ.

Аналитическое сопровождение проектных решений

Заключительным этапом становится комплексная оценка всех рассчитанных вариантов.

Каждый сценарий автоматически анализируется по совокупности геофизических, производственных, технологических и экономических показателей. Система выполняет сравнительный анализ альтернативных методик, формирует количественные критерии эффективности и автоматически подготавливает материалы технического обоснования проекта.

В результате инженер получает не отдельные результаты расчетов, а объективную картину преимуществ и ограниче-

ний каждого варианта, что существенно повышает обоснованность принимаемых решений и упрощает защиту выбранной технологии перед заказчиком.

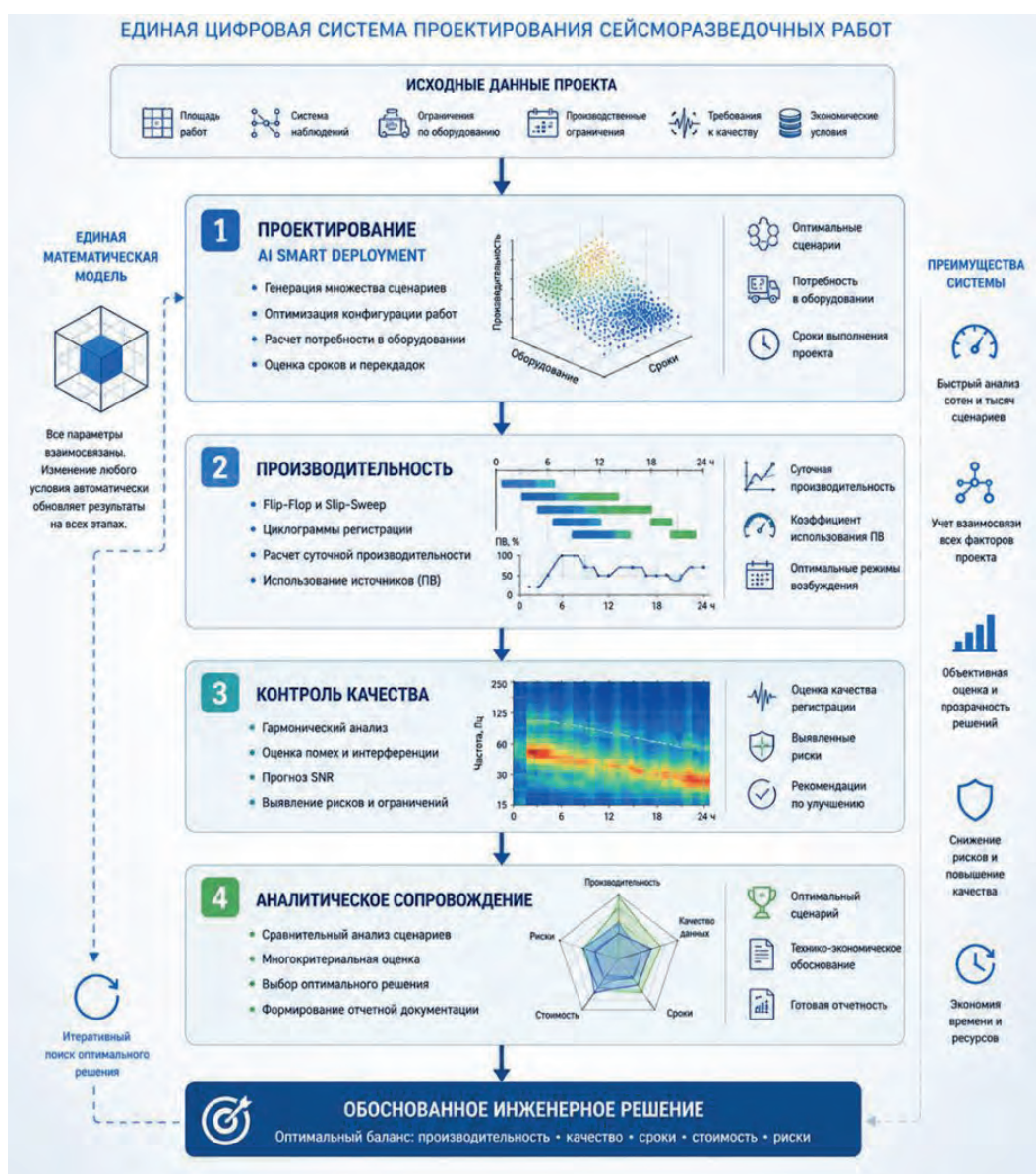
Единая цифровая модель проекта

Принципиальным отличием Seismic Pro Dashboard является тесная взаимосвязь всех перечисленных подсистем. Проектирование, моделирование производительности, прогноз качества и аналитическое сопровождение не являются самостоятельными расчетными модулями, а работают с общей цифровой моделью проекта.

Благодаря этому любое изменение исходных параметров автоматически при-

► Рис. 2.

Блок-схема
SEISMIC PRO
DASHBOARD.



водит к пересчету всех зависимых характеристик. Изменение плотности системы наблюдений влияет не только на потребность в оборудовании, но одновременно изменяет производительность, условия возбуждения, показатели качества регистрации и итоговую эффективность проекта. Проектировщик сразу видит последствия каждого принятого решения для всей технологической схемы, а не только для ее отдельного элемента.

Именно такая организация вычислительного процесса позволяет перейти от автоматизации отдельных инженерных расчетов к интеллектуальной системе поддержки проектирования, в которой все этапы подготовки проекта объединены общей математической моделью и работают как единый механизм поиска оптимального решения.

Интеллектуальное управление проектными рисками

По мере развития цифровых технологий проектирование перестает ограничиваться поиском оптимальных технических параметров. Не менее важной задачей становится объективная оценка рисков, способных повлиять на сроки, стоимость и качество выполнения проекта. Если сегодня анализ рисков в значительной степени основан на экспертных оценках, то в перспективе он станет неотъемлемой частью математической модели проекта.

Практически любое проектное решение связано с определенной степенью неопределенности. Производительность источников может отличаться от расчетной вследствие особенностей рельефа и грунтовых условий, логистика — зависеть от транспортной доступности и погодных факторов, а эффективность работ — определяться надежностью оборудования, квалификацией персонала, сезонными ограничениями и другими пара-

метрами, которые невозможно учесть с абсолютной точностью.

Современные вычислительные технологии позволяют перейти от качественной оценки подобных рисков к их количественному анализу. Для каждого варианта проекта рассчитываются вероятности возникновения неблагоприятных событий, степень их влияния на производительность, стоимость и календарные сроки. В результате проект характеризуется не только ожидаемыми технико-экономическими показателями, но и уровнем устойчивости к возможным отклонениям от расчетных условий.

Следующим этапом становится сценарное моделирование. Вместо единственного проектного решения система автоматически формирует несколько сценариев реализации — оптимистичный, наиболее вероятный и консервативный — оценивая последствия возникновения различных рисков событий. Это позволяет заранее определить наиболее уязвимые элементы проекта и оценить его устойчивость при изменении исходных условий.

Важнейшим элементом такого подхода становится предиктивный аналитический аудит качества данных. Инструменты математического моделирования, реализованные в Seismic Pro Dashboard, позволяют выполнять гармонический анализ еще на этапе офисного проектирования, выявлять потенциальные зоны интерференции гармоник, определять безопасные режимы применения высокопроизводительных технологий возбуждения и объективно сравнивать альтернативные методики по комплексу геофизических показателей, включая энергетический индекс SSE. В результате проектировщик получает не только оптимальный вариант, но и количественное обоснование его выбора, су-

щественно сокращая время подготовки и защиты проектных решений.

Следующим шагом станет автоматизированное формирование мероприятий по снижению выявленных рисков. Если система прогнозирует вероятность нарушения календарного графика, недостаточную производительность оборудования или повышенные технологические риски, она сможет предложить несколько альтернативных вариантов реагирования: изменение схемы выполнения работ, перераспределение оборудования, создание резервов ресурсов или корректировку производственного графика. Аналогичным образом могут анализироваться последствия отказов оборудования, неблагоприятных погодных условий, логистических ограничений и других факторов.

Таким образом, система переходит от простой регистрации рисков к интеллектуальному управлению ими. Проектировщик получает не только информацию о потенциальных угрозах, но и заранее рассчитанные сценарии их минимизации с оценкой влияния на стоимость, сроки и эффективность проекта.

Перспективным направлением является интеграция подобных моделей с экономическими механизмами управления рисками, включая страхование. Количественная оценка вероятности возникновения неблагоприятных событий и размера возможных потерь позволит математически обоснованно выбирать наиболее эффективную стратегию: изменить техническое решение, реализовать дополнительные организационные мероприятия, сформировать необходимые резервы или передать часть риска через страховые инструменты. Это дает возможность оценивать не только техническую, но и экономическую эффективность каждого варианта управления рисками.

Особую роль в дальнейшем развитии подобных систем будет играть искусственный интеллект. Используя статисти-

ку тысяч реализованных проектов, интеллектуальные алгоритмы смогут выявлять закономерности возникновения рисков, прогнозировать вероятность отклонений в конкретных природно-климатических условиях и рекомендовать наиболее эффективные меры их предупреждения.

При этом искусственный интеллект не рассматривается как средство автоматического принятия решений. Его задача заключается в интеллектуальной поддержке инженера: выявлении потенциальных угроз, анализе устойчивости проектных решений, оценке вероятности их успешной реализации и формировании альтернативных сценариев. Окончательный выбор стратегии управления рисками, как и принятие проектного решения в целом, остается за специалистом.

В результате системы нового поколения смогут одновременно оптимизировать конфигурацию проекта, прогнозировать последствия реализации различных рисков, оценивать устойчивость выбранных решений и формировать рекомендации по их минимизации. Такой подход знаменует переход от проектирования **оптимального** проекта к проектированию **надежного и устойчивого проекта**, способного сохранять эффективность в условиях неизбежной производственной неопределенности.

Технологическая платформа Seismic Pro Dashboard

Эффективность интеллектуального математического проектирования определяется не только используемыми алгоритмами, но и технологической платформой, обеспечивающей выполнение ресурсоемких вычислений, многовариантный анализ и интерактивную визуализацию результатов.

Вычислительное ядро **Seismic Pro Dashboard** реализовано на языке **Python**, являющемся одним из мировых стандартов научных и инженерных вычис-



▲ Рис. 3. Новая парадигма управления сейсморазведочными проектами.

лений. Пользовательский интерфейс построен на базе реактивного фреймворка **Streamlit**, а визуализация результатов выполняется с использованием библиотек **Altair** и **Matplotlib**, обеспечивающих наглядное представление результатов моделирования и оптимизации.

Комплекс имеет модульную архитектуру, в которой все расчетные подсистемы используют единую математическую модель проекта. Такой подход обеспечивает расширяемость системы и позволяет интегрировать новые алгоритмы оптимизации, оценки рисков и анализа данных без изменения базовой архитектуры.

Программный комплекс соответствует требованиям информационной безопасности нефтегазовой отрасли, поддерживает защищенное облачное развертывание (**Yandex Cloud**) и полностью автономную эксплуатацию внутри корпоративного контура (**On-Premise**). Наличие статуса отечественного программного обеспечения обеспечивает возможность его применения в проек-

тах, реализуемых в рамках политики технологического суверенитета.

Заключение

История развития сейсморазведки показывает, что ключевые изменения в отрасли происходят не только благодаря совершенствованию аппаратуры, но и вследствие появления новых методов организации и проектирования работ. Сегодня отрасль находится на пороге очередного такого этапа.

Проектирование, десятилетиями основанное на экспертном опыте и последовательном выполнении инженерных расчетов, постепенно превращается в процесс математической оптимизации, позволяющий объективно оценивать тысячи возможных сценариев и выбирать наиболее эффективное решение. При этом цифровые системы не заменяют инженера-геофизика, а становятся интеллектуальным инструментом поддержки принятия решений, существенно расширяя его аналитические возможности.

Появление программных комплексов

нового поколения, объединяющих математическое проектирование, моделирование производительности, прогноз качества и оценку рисков, свидетельствует о формировании новой парадигмы подготовки сейсморазведочных работ. Можно ожидать, что влияние этих технологий на организацию полевых исследований окажется сопоставимым с тем эффектом, который в свое время оказал переход от профильной 2D-сейсморазведки к пространственной 3D-сейсморазведке. Если 3D изменила качество геологической информации, то интеллектуальное математическое проектирование способно столь же радикально изменить качество подготовки самих сейсморазведочных проектов.

P.S. Автор приглашает к профессиональному обсуждению представленной концепции математического проектирования сейсморазведочных работ. Организации, заинтересованные в апробации программного комплекса Seismic Pro Dashboard на реальных производственных проектах, сравнении результатов с существующими подходами и участии в дальнейшем развитии системы, могут обращаться непосредственно к автору публикации.

<https://seismic-pro.ru>

Подробнее об авторе



Федоров
Андрей Борисович

г. Москва