

УДК 553.98:004.42

СОВРЕМЕННЫЕ ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ НЕФТЕГАЗОГЕОЛОГИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ*



Ю. В. НЕФЕДОВ,

доцент, канд. геол.-минерал. наук,
yurijnefedov@yandex.ru



Н. Н. ВОСТРИКОВ,

студент



М. А. ГРИБАНОВ,

студент



А. М. ЯШМОЛКИН,

студент

Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II,
Санкт-Петербург, Россия

Введение

До сегодняшнего дня основная часть рынка российского программного обеспечения (ПО) была представлена иностранными производителями. При этом наблюдается перелом данной тенденции. Согласно Указу Президента Российской Федерации № 204 «О национальных целях и стратегических задачах развития Российской Федерации на период до 2024 года» и Указу № 474 «О национальных целях развития Российской Федерации на период до 2030 года» от 21.07.2020 г. был создан национальный проект «Цифровая экономика» [1, 2]. В рамках законопроекта была поставлена задача к 2024 г. увеличить долю российского ПО до 70 % и более [3]. Это серьезно снижает возможности иностранных компаний, которые занимают лидирующие позиции в области программного обеспечения геологического моделирования залежей углеводородов, и открывает большие перспективы для российских разработчиков [4]. Компания «Роснефть» сообщила о планах по 100%-ному импортозамещению технологий и оборудования, в том числе программного обеспечения, в долгосрочной перспективе [5]. Потребность наполнения российскими разработками должна простимулировать российские компании, предоставляющие программное обеспечение, как минимум, достигнуть уровня, позволяющего создавать такие же

Приведен обзор современных программных средств геологического моделирования месторождений нефти и газа. Рассмотрены действия компаний-разработчиков в условиях жесткого цифрового регулирования последних лет на мировом рынке программного обеспечения. Уточнены конкурентоспособные преимущества передовых программных комплексов нефтегазгеологического моделирования, используемых в российских компаниях. Проанализированы и обобщены основные программные решения для проведения комплексного геологического моделирования. Рассмотрены пути адаптации компаний-разработчиков, предоставляющих программное обеспечение, в условиях жесткого цифрового регулирования. Дан прогноз их дальнейшего развития в условиях современного российского рынка и законодательства.

Ключевые слова: программное обеспечение, Petrel, tNavigator, DELFI, геологическое моделирование, Geoplat Pro, Rock Flow Dynamics, Schlumberger

DOI: 10.17580/gzh.2024.09.04

нефтесервисные решения, что и иностранные аналоги [6].

Отдельного внимания заслуживает рассмотрение применяемых иностранными компаниями-разработчиками ПО в области нефтегазгеологического моделирования путей адаптации под российское законодательство.

Целью работы является уточнение конкурентоспособных преимуществ передовых программных комплексов нефтегазгеологического моделирования, используемых в российских компаниях.

Обзор основных программных комплексов по нефтегазгеологическому моделированию

Программных комплексов для моделирования залежей и месторождений нефти и газа, представленных в России, не так уж и много. Современные условия открывают большие возможности для отечественных производителей программных комплексов за счет импортозамещения, дополнительных инвестиций и расширения сотрудничества с ведущими компаниями. Те же самые условия диктуют необходимость проявления гибкости для иностранных компаний для удержания на рынке [4].

Rock Flow Dynamics (RFD) – компания, основанная в 2005 г. и специализирующаяся на разработке ПО для комплексного геологического моделирования. В настоящее время tNavigator – это комплексная программа, построенная по модульному типу. Основные возможности позволяют осуществить полный цикл построения трехмерной модели месторождений нефти и газа и проведения совместных гидродинамических и геомеханических вычислений [7]. Одним из

*В подготовке статьи принимал участие аспирант Д. А. Грибанов (Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II).

текущих векторов развития Rock Flow Dynamics является разработка программного обеспечения для моделирования месторождений твердых полезных ископаемых. Так, в 2021 г. были добавлены дополнительные функции в tNavigator для рудного моделирования. В 2017 г. tNavigator добавлен в реестр российского ПО Министерства цифрового развития, связи и массовых коммуникаций Российской Федерации.

Старейшим представителем разработчиков ПО для нефтегазового рынка является международная нефтесервисная компания Schlumberger. С момента своего основания компания накопила богатый опыт создания программных комплексов. В компании делают упор на облачные технологии, применяемые для оптимизации производственного цикла от геофизики и геологии до разработки и обеспечения плановой добычи [8, 9].

Следует отметить, что доля именно IT-продуктов в общей структуре предложений компании Schlumberger невелика (менее 3 %), и компания, скорее, может быть отнесена к сервисным [10]. Ее самое известное предложение на рынке ПО – Petrel – реализует цикл моделирования «от сейсмики до разработки» и является одним из самых популярных продуктов для моделирования месторождений нефти и газа в России и мире в целом. В современных условиях компания приняла решение разработать отдельную линейку ПО – Petrel Russian Edition (рис. 1), ежегодно наращивая ее долю и функционал.

Другим игроком, имеющим серьезные амбиции на рынке, является развивающаяся отечественная компания «ГридПоинт Дайнамикс». На сегодняшний день в компании делают упор на использование алгоритмов машинного обучения и искусственного интеллекта (ИИ). Динамично совершенствующимся программным продуктом компании «ГридПоинт Дайнамикс» является программный комплекс Geoplat Pro, представленный в виде решений для сейсмической интерпретации и обработки, гидродинамического и геологического моделирования. Как и tNavigator, ПО «ГридПоинт Дайнамикс» входит в реестр российских разработок [11].

Сравнительный анализ основных программных комплексов по нефтегазогеологическому моделированию

С 2010 г. ПО для нефтегазогеологического моделирования развивается в тесной интеграции с IT-продуктами для геомеханического, гидродинамического моделирования [12]. Геологическую модель месторождения используют и уточняют на протяжении всего цикла разработки месторождения при решении задач, например гидроразрыва пласта или глушения скважин [13, 14]. При этом развитие технологий машинного обучения в геологии требует углубленных исследований [15]. В связи с этим особенно интересно рассмотреть некоторые уникальные особенности и преимущества ПО именно для геологического моделирования.

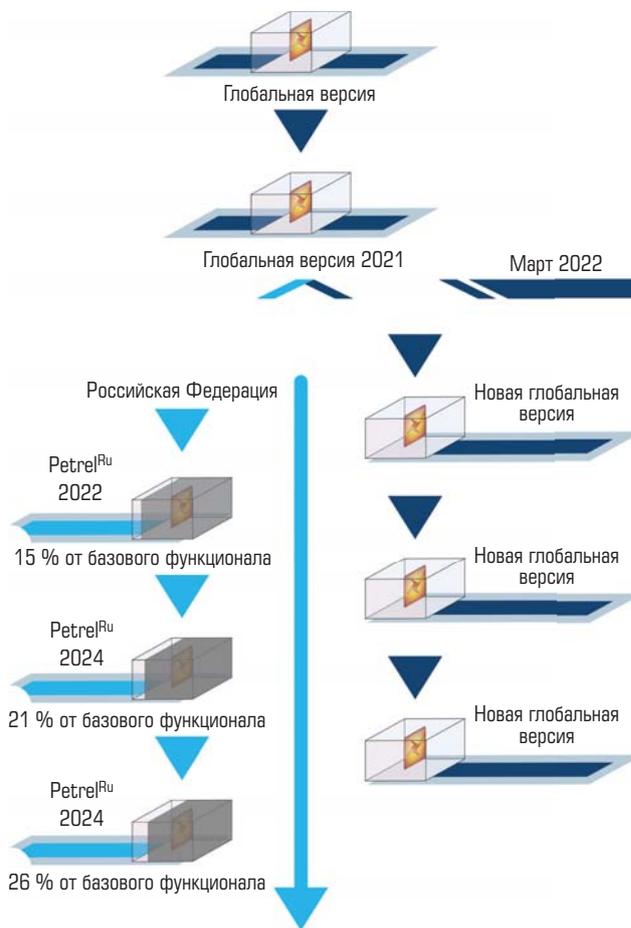


Рис. 1. Этапы развития ПО Petrel на российском рынке

Обзор конкурентных преимуществ Petrel

Компания Schlumberger делает серьезный упор на облачные технологии. Так, с недавнего времени платформу Petrel поставляют в рамках облачной среды DELFI [16], которая образует единую информационную экосистему путем слияния разработанных компанией Schlumberger программных комплексов для нефтегазодобычи (а не только для геологического моделирования) и внедрения расширенных возможностей по управлению информацией [17, 18]. Распределение данных от клиента на сервере компании избавляет пользователя от необходимости применения высокопроизводительных систем. Вычислительные мощности позволяют существенно конкурировать в вопросе быстродействия с кластерными решениями tNavigator.

В связи с необходимостью выполнения требований российского законодательства среда ruDELFI реализована путем взаимного сотрудничества компаний Schlumberger и Yandex.Cloud (входит в реестр российского ПО) [19]. Одним из ключевых достоинств ruDELFI, как и DELFI в целом, является заложенный в его основу высокопроизводительный вычислительный потенциал, в полной мере доступный даже на смартфонах.

Важно отметить, что большая часть функционала, связанного с нейронными сетями и машинным обучением, доступна преимущественно в облачном режиме. При этом в ruDELFI планируется введение более тысячи ядер для расчетов, расширенных средств для анализа многовариантности, дополнительных расчетов на Graphics Processing Unit (графическом процессоре) и т. д.

Для решения рутинных и трудоемких задач программный комплекс предлагает мощный инструмент-редактор workflow, который способен оптимизировать (более чем на 90 %) стадии виртуального построения моделей месторождений нефти и газа [20, 21].

В последние годы в Petrel вводят современные инструменты, связанные с использованием машинного обучения [22]. Стоит обратить внимание на преимущества использования систем ИИ в геологии [23]. Так, можно автоматически обнаруживать и интерпретировать трехмерные геометрические аномалии [24]. Одним из существенных достоинств ИИ является развитое понятие многовариантности, реализующее *n*-й набор (ограниченный пользовательскими требованиями) возможных соответствующих исходным данным результатов в относительно короткий срок [25]. Это особенно важно в условиях недостатка входных данных, а также для точного многопараметрического прогнозирования потенциальных ловушек (рис. 2). Интеграция такой возможности в программный комплекс способно значительно увеличить его конкурентоспособность. Точное прогнозирование особенно важно при проектировании и заложении скважин [26, 27].

На сегодняшний день обнаружение геологических тел по сейсмическим данным с использованием ИИ является активно развивающимся направлением исследований [28]. Так, Petrel реализует функционал полностью автоматической интерпретации разломов по сейсмическому кубу. Это большой шаг вперед в числе других уникальных инструментов для сейсмической корреляции, представленных в модуле Structural Interpretation (таких как Variance или запатентованная технология Schlumberger – Ant tracking) [29].

В 2021 г. были добавлены инструменты, основанные на методах ИИ, для автоматизации моделирования геостатических свойств природных резервуаров, что позволило перенаправить часть временных затрат с проведения собственного анализа входных данных и решения задач параметризации на принятие решений и оценку связанных с ними неопределенностей. Этап оценки неопределенностей является необходимым для высококачественного моделирования. Для этого в настоящее время в мире разрабатывают различные методики, например Geology-Driven Modeling (GDM), направленные на повышение эффективности и точности расчетов [30]. По полученным результатам можно с большей достоверностью оценить наличие коллектора [21].

Существенным конкурентоспособным преимуществом Petrel является наличие модуля объектно-ориентированного

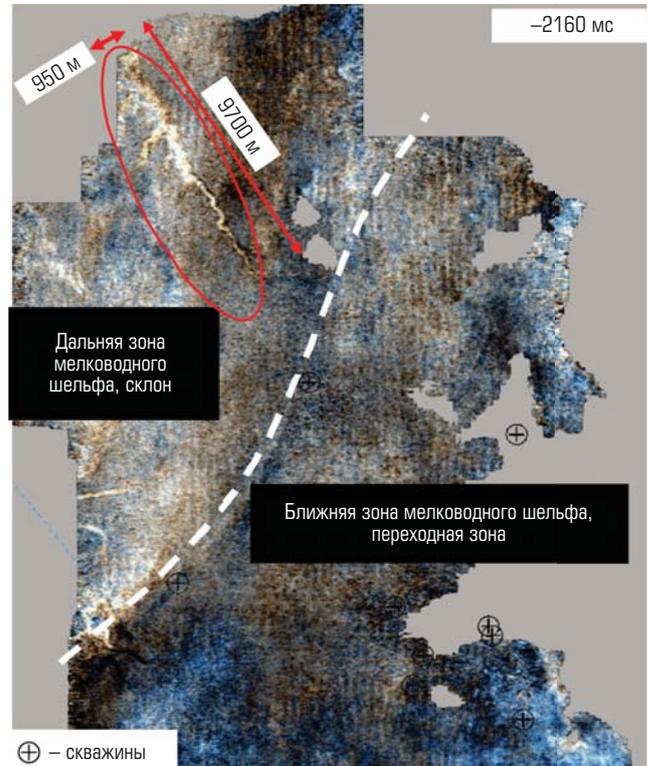


Рис. 2. Пример прогнозирования потенциальных ловушек Западно-Сибирской нефтегазоносной провинции, выполненный в программном комплексе Petrel

седиментационного моделирования Geological Process Modeling (GPM), введенного в 2017 г. [31]. В нем представлены широкие возможности, среди которых можно выделить моделирование динамических геологических объектов разных масштабов. Направление активно развивается, о чем свидетельствует существование ряда коммерческих специализированных программных пакетов других производителей. Однако в комплексе компании Schlumberger реализован наибольший функционал, позволяющий моделировать как терригенные, так и карбонатные массивы горных пород по различным схемам, учитывающим их специфику [32, 33]. Это дает большое преимущество при интерпретации сейсмических данных: повышается точность выделения геологического тела за счет динамической реконструкции его истории развития. Актуальной областью применения являются динамические объекты, например конусы выноса (рис. 3). Точное моделирование таких геологических тел является перспективным направлением, поскольку в них потенциально могут содержаться нефтегазоносные комплексы [34].

Применительно к версии Petrel для российского рынка можно отметить стратегию компании Schlumberger по обеспечению требований законодательства, согласно которому актуальная версия к 2025 г. будет состоять из российских

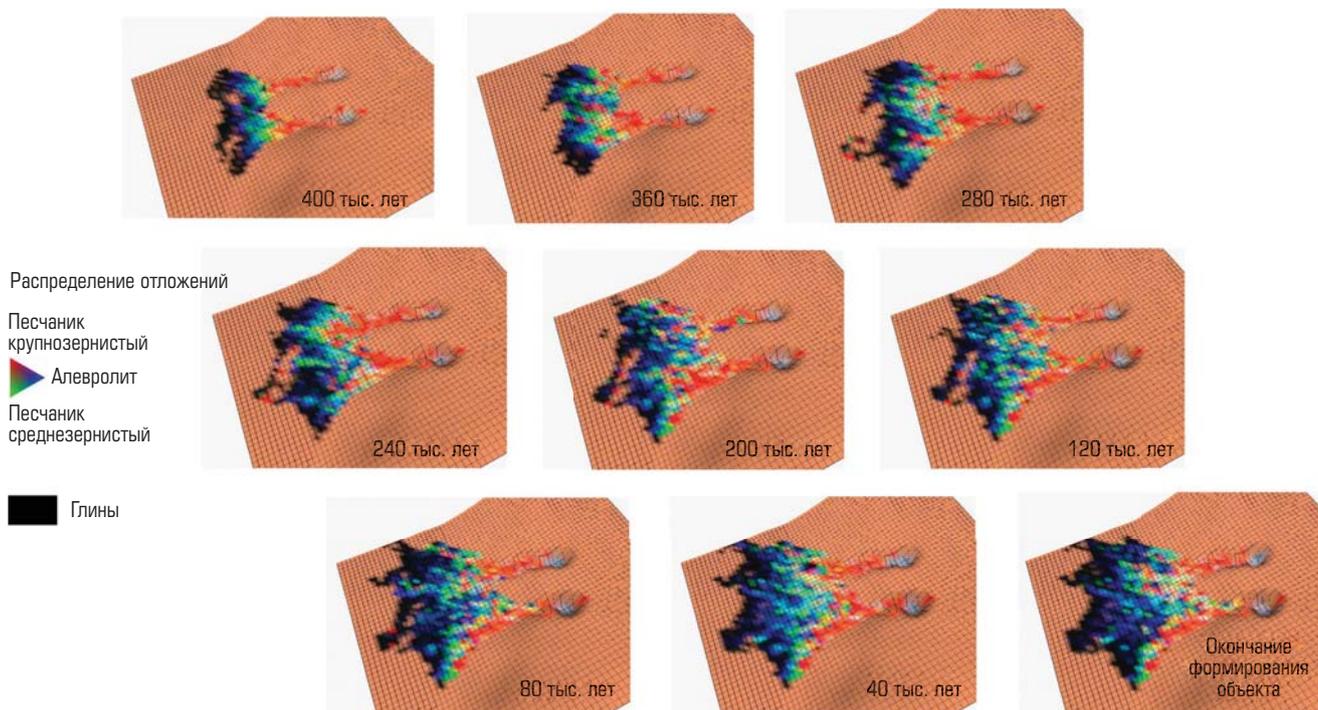


Рис. 3. Слайсы седиментационной модели, показывающие последовательное формирование системы конусов выноса ачимовских отложений

разработок на 70 % и более. Очевидно, грядут возможные изменения в структуре российской версии программных комплексов в течение ближайших лет, нацеленные на постепенное наращивание функционала с 15 % от базовой версии 2022 г. до 26 % базовой версии 2024 г. (см. рис. 1).

Тенденция к расширению функционала на ближайшие годы в программном комплексе для российского рынка наглядно продемонстрирована в планах по развитию версии PetrelRU, которые идут по пути все большей автоматизации и расширения возможностей для геологического моделирования и интерпретации сейсмических данных.

Обзор конкурентных преимуществ tNavigator

В основу создания tNavigator был заложен ряд конкурентоспособных принципов для оптимизации полного рабочего процесса создания модели месторождения. Часть из них наглядно демонстрируется на примере дружелюбного интерфейса. В нем реализована возможность удобного и структурированного представления данных, их фильтрации и группирования с помощью присвоения тегов отдельным объектам [7].

Тенденции развития tNavigator на российском рынке во многом связаны с клиентоориентированностью компании, предусматривающей создание адаптируемой среды для выполнения задач моделирования различных процессов и объектов. Учитывая, что сам программный комплекс реализуется на C++, компания Rock Flow Dynamics внедрила в tNavigator возможность существенного расширения

официального функционала за счет встроенной консоли для программирования на языке Python. Каждый объект из списка операций и доступный для workflow возможно модифицировать под собственные потребности. Написанные скрипты не требуют получения специальной лицензии для их использования в tNavigator, а потому открыто публикуются в свободном доступе. На текущий момент имеется большая библиотека готовых к использованию плагинов [7].

Одним из существенных конкурентоспособных преимуществ программного комплекса tNavigator является оптимизированная межскважинная корреляция, используемая для оценки потенциала нефтегазоносности и выделения наиболее перспективных геологических объектов [35]. К другому выраженному и значимому достоинству можно отнести присутствие встроенного уникального метода многовариантной интерполяции Amazonas (на текущий день является эксклюзивом только для данного ПО). Метод основан на машинном обучении, а его использование не требует наличия специальных знаний из области математической статистики [36]. Amazonas по своей сути намного универсальнее «стандартных» способов интерполяции, так как он уходит от привычных условий стационарности (однородности свойств в пространстве). При необходимости можно получать заведомо неограниченное число верных результатов интерполяции, соответствующих входным данным, обеспечивая проведение работ по геологическому моделированию в условиях нестационарного распределения [37].

Сравнительные данные программных комплексов

Критерий	Petrel	tNavigator	Geoplat Pro
Сейсмическая интерпретация	Широкий набор инструментов: Ant tracking, Variance, автоматическая интерпретация разломов, сейсмическое моделирование, анализ AVO/AVA, инверсия	Инструменты для интерпретации сейсмики, анализа сейсмических атрибутов, инверсия	Расширенный палеотектонический анализ, синтез 2,5D куба, седиментационный анализ, инструменты Geoplat AI (сейсмофациальная кластеризация, ИИ-дообработка, интерпретация горизонтов и разломов), инверсия
Геологическое моделирование	Geological Process Modeling (GPM) для седиментационного моделирования, построение структурных моделей, моделирование разломов	Гибкие инструменты для построения моделей, корреляции скважин, многовариантная интерполяция Amazonas, модуль рудного моделирования, стохастическое моделирование	Инструменты для построения моделей, корреляции скважин, расширение функционала с помощью языка Th, стохастическое моделирование
Гидродинамическое моделирование	Интеграция с INTERSECT и ECLIPSE (продукты Schlumberger)	Встроенный модуль tNav Flow, совместное моделирование с tNav GeoMech	Интеграция в единую платформу, универсальность, поддержка форматов
Искусственный интеллект	Активное внедрение ИИ в различные модули, включая автоматическую интерпретацию, моделирование свойств (реализовано преимущественно в облачной среде DELFI)	Активное внедрение ИИ в различные модули, интерпретация и атрибутивный анализ, анализ неопределенностей	Geoplat AI для обработки и интерпретации сейсмических данных, моделирования, составления прогнозных карт, дообучение выделения разломов, палеоканалов, соляных куполов
Сложность освоения	Может быть сложен для начинающих пользователей	Интуитивно понятный	Интуитивно понятный
Активность развития	Постоянное развитие и добавление новых функций, акцент на облачные технологии	Активное развитие и добавление новых функций, акцент на гибкость и расширяемость	Активное развитие и добавление новых функций, акцент на ИИ и доступность

Проекты по добыче полезных ископаемых можно осуществлять в очень сложных геологических условиях [38, 39]. Для минимизации рисков требуется комплексное геомоделирование. Сегодня в tNavigator реализован полноценный модуль для создания моделей рудных тел. В нем применяют вышерассмотренные методы и инструменты, такие как многовариантная интерполяция Amazonas и машинное обучение [7, 40, 41].

Следует отметить, что на момент своего релиза программный комплекс не обладал столь широким нефтегазгеологическим функционалом, а был задуман как модуль для гидродинамических построений. Успешность RFD на рынке ПО для геологического моделирования во многом была обусловлена стремительными темпами разработки tNavigator.

Обзор конкурентных преимуществ Geoplat Pro

Geoplat Pro-S позволяет выполнять операции с сейсмическими данными различных форматов. Среди значимых достоинств модуля можно выделить наличие встроенных обученных нейронных сетей для автовыделения разломов, помощи при структурной интерпретации и значительного улучшения качества сейсмических данных, возможность дообучения нейронных сетей, сейсмофациальный анализ методами кластеризации, расширенный палеотектонический анализ, возможность синтеза из двумерных профилей 2.5D сейсмокуба, а также седиментационного анализа по выбранному горизонту для расчета различных атрибутов и т. д. [11].

При обработке сейсмических данных часто возникают проблемы, связанные, например, с компенсацией приповерхностной неоднородности [42]. При невозможности проведения переобработки «ГридПоинт Дайнамикс» предлагает методы ИИ для решения подобных задач обработки путем дообработки. Опыт компании в области машинного обучения составляет более пяти лет, за которые были введены уникальные методики и решения Geoplat AI. Например, существует возможность реконструкции отсутствующих сейсмотрасс, автоматического подавления шумов, увеличения разрешающей способности, автоматизации интерпретации геологических тел и разломов и т. д.

В непосредственно геологическом модуле выделена такая уникальная возможность, как, например, расширение встроенного функционала автоматической межскважинной корреляции посредством встроенного языка программирования Th и пр. [11].

Таким образом, компания «ГридПоинт Дайнамикс» сегодня активно развивается, внедряя современные технологии в свой программный комплекс. Важно, что функционал нейронных сетей и машинного дообучения сейсмической интерпретации предоставлен внутри программных пакетов, что делает предложение уникальным на рынке. Особенно хорошо реализуется потенциал сейсмического модуля. Также немаловажным будет отметить, что существует возможность предоставления платформы Application Programming Interface (API) компании для коммерческой реализации собственных модулей [11].

Заключение

Рассмотрев основные программные комплексы для моделирования месторождений нефти и газа, можно дать положительный прогноз их дальнейшего развития в условиях современного российского рынка и законодательства.

Компания Rock Flow Dynamics проделала успешную работу, став крупным игроком в отрасли. Ярким результатом становления RFD на российском рынке можно считать успешную защиту в Государственной комиссии по запасам модели, построенной в tNavigator. При этом можно прогнозировать дальнейшую стимуляцию роста, обусловленную стратегиями национального развития России. Не меньшую активность проявляет российская компания «ГридПоинт Дайнамикс», весьма амбициозно укрепляя свои позиции в новых условиях, вводя технологии ИИ, создавая собственные методики решения производственных задач. Продукты отечественных компаний Rock Flow Dynamics и GridPointDynamics получают признание в России, Китае, Европе и США путем сотрудничества с ведущими нефтегазовыми предприятиями, включая Газпром, ЛУКОЙЛ, SAUDIARAMCO, PetroChina, ENI и др.

С точки зрения иностранных производителей, ожидаемые изменения, вносимые Schlumberger в комплекс Petrel, будут также способствовать разработке и совершенствованию российских технологий. При этом наблюдается уникальный путь развития компании, отличающийся от предыдущих лет в части максимально возможной реализации своих продуктов на платформе облачных технологий путем интеграции ПО в единую когнитивную среду DELFI. Сам Petrel трансформируется посредством автоматизации процессов и расширения функционала и адаптируется под современные российские

условия, продолжая предоставлять компаниям актуальные и проверенные временем решения для задач моделирования месторождений углеводородов. Schlumberger также сотрудничает с крупными компаниями, предоставляя лицензии по программе подписок.

Резюмируя результаты проведенного сравнительного анализа, рассмотренные в статье программные комплексы, можно охарактеризовать следующим образом (см. **таблицу**):

Petrel – мощное и функциональное решение, но дорогое и сложное в освоении, может быть использовано крупными компаниями с большим бюджетом и сложными задачами;

tNavigator – более доступное и user-friendly решение с уникальными возможностями, такими как многовариантная интерполяция Amazonas; предназначено для компаний, ищущих баланс между функциональностью и стоимостью, а также ценящих открытость и гибкость;

Geoplat Pro – развивающийся российский продукт с акцентом на ИИ и гибкостью в расширении функционала; интересен для компаний, реализующих уникальные российские разработки в плане ИИ.

Важно отметить, что рынок ПО для нефтегазогеологического моделирования динамично развивается, появляются новые игроки и решения. Рекомендуется проводить регулярный анализ рынка для выбора наиболее подходящего программного комплекса.

Библиографический список

См. англ. блок. 

«GORNYI ZHURNAL», 2024, № 9, pp. 27–33
DOI: 10.17580/gzh.2024.09.04

Recent trends in oil and gas geology software modeling

Information about authors

Yu. V. Nefedov¹, Associate Professor, Candidate of Geological and Mineralogical Sciences, yurijnefedov@yandex.ru

N. N. Vostrikov¹, Student

M. A. Gribanov¹, Student

A. M. Yashmolkin¹, Student

¹Empress Catherine II Saint-Petersburg Mining University, Saint-Petersburg, Russia

Abstract

The article reviews the range of advanced software systems used in geological modeling of oil and gas reservoirs. Particular attention is given to the strategies of software development companies under conditions of the stringent digital control on the global software market. The scope of the analysis embraces the competitive advantages of the best software systems Petrel, tNavigator and Geoplat Pro in application in Russia.

For instance, Rock Flow Dynamics' product tNavigator is a modular-sized package developed for the 3D modeling of oil and gas reservoirs, and for the hydrodynamic and geomechanical computations. Schlumberger develops Petrel platform integrated in cloud-based software environment DELFI, which provides extended computational

capabilities and allows access to various cloud functions. Artificial intelligence technologies are the critical component in prediction of properties of geological and seismic sections. GridPoint Dynamics has actualized advanced machine learning tools at a high level in product Geoplat Pro.

The cooperation of Schlumberger with Yandex.Cloud is discussed for the benefit of deployment of IT environment ruDELFI as per the Russian legislation. The forecast of the further development of the software system within the frames of the Russian market and law is made. The Russian companies are anticipated to progress dynamically, with introduction of innovative solutions and with pushing the range limits of product capabilities.

The authors discuss the ways of raising the competitive capacities of Russian software products through integration and adaptation of advanced technologies to the specifics of the Russian market. It is emphasized that development and application of domestic software ensures technological independence and improved ability of the oil and gas sector. The authors appreciate participation of D. A. Gribanov, Post-Graduate Student at the Empress Catherine II Saint-Petersburg Mining University in this paper preparation.

Keywords: software system, Petrel, tNavigator, DELFI, geological modeling, Geoplat Pro, Rock Flow Dynamics, Schlumberger.

References

1. Available at: <https://docs.cntd.ru/document/565341150> (accessed: 29.05.2024).
2. Available at: <https://docs.cntd.ru/document/557309575> (accessed: 29.05.2024).

3. Domestic software is to pervade 70 % of purchased IT products at public companies by 2024. 2021. Available at: <https://tass.ru/ekonomika/11705375> (accessed: 25.04.2024).
4. Chernova V. Yu., Zobov A. M., Starostin V. S., Butkovskaya G. V. Sustainable marketing communication strategies of Russian companies under the import substitution policy. *Entrepreneurship and Sustainability Issues*. 2017. Vol. 5, No. 2. pp. 223–230.
5. Rosneft is to discard import of technology in the long term. 2014. Available at: <https://tass.ru/ekonomika/1422831> (accessed: 25.04.2024).
6. Saakyan M. I., Zakrevskiy K. E., Gazizov R. K., Lepilin A. E., Ryzhikov E. A. The prospects of corporate geological modeling software creation. *Neftyanoe khozyaystvo*. 2019. No. 11. pp. 50–54.
7. Geological modeling. Rock Flow Dynamics, 2024. Available at: <https://rfdyn.ru> (accessed: 25.06.2024).
8. Mardashov D. V. Development of blocking compositions with a bridging agent for oil well killing in conditions of abnormally low formation pressure and carbonate reservoir rocks. *Journal of Mining Institute*. 2021. Vol. 251. pp. 617–626.
9. Mardashov D., Duryagin V., Islamov S. Technology for improving the efficiency of fractured reservoir development using gel-forming compositions. *Energies*. 2021. Vol. 14, Iss. 24. ID 8254.
10. Market of IT products for Russian oil and gas sector : Review. 2022. Available at: <sectormedia.ru/news/oborudovanie-neft-i-gaz/rynok-it-produktov-dlya-neftegazovogo-sektora-rossii-obzor/> (accessed: 25.06.2024).
11. Geoplat Geological Modeling. GridPoint Dynamics, 2021. Available at: <https://www.geoplat.pro/products/geoplat-g/> (accessed: 25.06.2024).
12. Zakrevskiy K. E., Popov V. L. The history of development of 3d geology modeling as a method for studying oil and gas reservoirs. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University, Geo Assets Engineering*. 2021. Vol. 332, No. 5. pp. 89–100.
13. Mardashov D. V., Bondarenko A. V., Raupov I. R. Technique for calculating technological parameters of non-Newtonian liquids injection into oil well during workover. *Journal of Mining Institute*. 2022. Vol. 258. pp. 881–894.
14. Mardashov D. V., Rogachev M. K., Zeigman Yu. V., Mukhametshin V. V. Well killing technology before workover operation in complicated conditions. *Energies*. 2021. Vol. 14, Iss. 3. ID 654.
15. Chen L., Wang L., Miao J., Gao H., Zhang Y. et al. Review of the application of big data and artificial intelligence in geology. *Journal of Physics: Conference Series*. 2020. Vol. 1684. ID 012007.
16. Kuang L., Liu H., Ren Y., Luo K., Shi M. et al. Application and development trend of artificial intelligence in petroleum exploration and development. *Petroleum Exploration and Development*. 2021. Vol. 48, Iss. 1. pp. 1–14.
17. Driving energy innovation. Schlumberger, 2024. Available at: <https://www.slb.com/driving-energy-innovation> (accessed: 25.04.2024).
18. Hassani H., Silva E. S. Big Data: A big opportunity for the petroleum and petrochemical industry. *OPEC Energy Review*. 2018. Vol. 42, Iss. 1. pp. 74–89.
19. Schlumberger and Yandex.Cloud open digital platform DELFI for users in Russia. 2021. Available at: <cloud.yandex.ru/blog/posts/2021/12/shlyumberzhe-and-yc> (accessed: 25.04.2024).
20. Nemes I. Applications of automated Petrel workflows in 3D reservoir geologic modelling—A case study. *Central European Geology*. 2022. Vol. 65, Iss. 2. pp. 122–136.
21. Petrel new features. Schlumberger, 2024. Available at: <software.slb.com/products/petrel/features> (accessed: 25.04.2024).
22. Santos A., Scanavini H. F. A., Pedrini H., Schiozer D. J., Munerato F. P. et al. An artificial intelligence method for improving upscaling in complex reservoirs. *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2022. Vol. 211. ID 110071.
23. Yao J., Liu Q., Liu W., Liu Y., Chen X. et al. 3D Reservoir geological modeling algorithm based on a deep feedforward neural network: A case study of the delta reservoir of Upper Urho Formation in the X Area of Karamay, Xinjiang, China. *Energies*. 2020. Vol. 13, Iss. 24. ID 6699.
24. Michalak M. P., Teper L., Wellmann F., Žaba J., Gaidzik K. et al. Clustering has a meaning: Optimization of angular similarity to detect 3D geometric anomalies in geological terrains. *Solid Earth*. 2022. Vol. 13, Iss. 11. pp. 1697–1720.
25. Podosenov A. E., Ladeyshchikov S. V., Azanova N. O., Soloveva M. A. Forecast of the geological structure based on the multivariate model of the Rostovitskoe oil field. *Neftepromyslovoe delo*. 2021. No. 11(635). pp. 5–13.
26. Marchesi V. R., Domingues D. L. P., Lopez A. G. T., da Fontoura S. A. B., Gonçalves C. J. et al. Geological-geomechanical modeling as a support for the design and monitoring of oil wells. *Proceedings of the ISRM Conference on Rock Mechanics for Natural Resources and Infrastructure*. Goiania, 2014.
27. Kozyaev A., Kurash T., Fazylov R., Korotysheva A., Onuchin S. Using 3D seismic data for well drilling support—Methodological features and practical examples. *Proceedings of the EAGE Saint Petersburg*. Saint-Petersburg, 2020. Vol. 2020. DOI: 10.3997/2214-4609.202053053
28. Pratama H., Latiff A. H. A. Automated geological features detection in 3D Seismic data using semi-supervised learning. *Applied Sciences*. 2022. Vol. 12, Iss. 13. ID 6723.
29. Hafiz I., Albesher Z., Kellogg J., Saeid E. Detecting the fault and fracture systems by using 3D seismic attribute—Ant Tracking algorithm. *Second International Meeting for Applied Geoscience & Energy*. Houston : Society of Exploration Geophysicists, 2022. pp. 1374–1379.
30. Madsen R. B., Høyer A.-S., Andersen L. T., Møller I., Hansen T. M. Geology-driven modeling: A new probabilistic approach for incorporating uncertain geological interpretations in 3D geological modeling. *Engineering Geology*. 2022. Vol. 309. ID 106833.
31. Otoo D., Hodgetts D. Porosity and permeability prediction through forward stratigraphic simulations using GPM™ and Petrel™: Application in shallow marine depositional settings. *Geoscientific Model Development*. 2021. Vol. 14, Iss. 4. pp. 2075–2095.
32. Olneva T. V., Zhukovskaya E. A. Sediment Modeling in Software System Petrel. Moscow : Izdatelstvo MAI, 2022. 216 p.
33. Prischepa O., Nefedov Yu., Nikiforova V., Ruiming X. Raw material base of Russia's unconventional oil and gas reserves (hydrocarbons shale strata). *Frontiers in Earth Science*. 2022. Vol. 10. DOI: 10.3389/feart.2022.958315
34. Petruk A. C., Rodionova I. I., Mukhametov A. R., Galeev E. R., Iskevich I. G. et al. Modeling experience of low-permeability reservoirs the case of license block of the Priobskoe field. *Ekspozitsiya Neft Gaz*. 2022. No. 3. pp. 18–20.
35. Prischepa O., Xu R., Martynov A., Ibatullin A., Krykova T. et al. Potential of high-carbon Domanik (Upper Devonian) Shale Deposits: Timan–Pechora oil and gas province assessment. *International Journal of Engineering, Transactions B: Applications*. 2024. Vol. 37, No. 8. pp. 1639–1657.
36. Degterev A. Yu. Correctness of multi-variate geological modeling under spatial nonstationarity of environment : Problem and solution. *GeoEurasia 2020. Recent Technologies of Subsoil Research and Development in Eurasia : III International Conference and Expo in Geology and Geophysics*. Tver : PoliPRESS, 2020. pp. 119–122.
37. Narygin E. I., Kovalenko A. P., Kuziv K. B. Experience in conducting multivariate calculations with an automated system for constructing a hydrodynamic model of the field. *Ekspozitsiya Neft Gaz*. 2022. No. 5. pp. 22–26.
38. Skublov S. G., Petrov D. A., Galankina O. L., Levashova E. V., Rogova I. V. Th-rich zircon from a pegmatite vein hosted in the wiborg rapakivi granite massif. *Geosciences*. 2023. Vol. 13, Iss. 12. ID 362.
39. Canhimbue L., Talovina I. Geochemical distribution of platinum metals, gold and silver in intrusive rocks of the Norilsk Region. *Minerals*. 2023. Vol. 13, Iss. 6. ID 719.
40. Deng H., Zheng Y., Chen J., Yu S., Xiao K. et al. Learning 3D mineral prospectivity from 3D geological models with convolutional neural networks: Application to a structurecontrolled hydrothermal gold deposit. *Computers & Geosciences*. 2022. Vol. 161. ID 105074.
41. Beloglavov I. I., Petrov P. A., Bazhin V. Yu. The concept of digital twins for tech operator training simulator design for mining and processing industry. *Eurasian Mining*. 2020. No. 2. pp. 50–54.
42. Sysyoev A. P., Gorelik G. D. Parametric method of compensation for near-surface heterogeneity in processing CDP data. *Russian Geology and Geophysics*. 2017. Vol. 58, No. 6. pp. 763–768.