

Программное обеспечение на основе веб-технологий для геонавигации нефтегазовых скважин

К. Н. Даниловский¹, А. Р. Дудаев^{1,2}, В. Н. Глинских¹⁻³
М. Н. Никитенко¹, И. А. Москаев^{1,2}

¹ Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН

² Новосибирский государственный университет

³ Новосибирский государственный технический университет
Новосибирск, Россия

Аннотация

Для эффективного освоения залежей углеводородов чрезвычайно важной становится высокая точность проводки горизонтальных скважин в целевых пластах-коллекторах. В процессе бурения геонавигация скважины со сложной траекторией выполняется по геофизическим данным в реальном масштабе времени. Представленная работа посвящена разработке нового программного обеспечения для геонавигации нефтегазовых скважин с горизонтальным завершением. Для решения задач геонавигации используются алгоритмы, основанные на методах корреляции каротажных данных и численной инверсии измерений электромагнитного каротажа. Разработанное новое программное приложение основано на веб-технологиях и имеет клиент-серверную архитектуру. Для оптимизации времени выполнения ресурсоемких расчетов используются высокопроизводительные облачные вычисления.

Ключевые слова

программное обеспечение, веб-технологии, геонавигация, каротаж в процессе бурения, горизонтальная скважина, численная инверсия, высокопроизводительные вычисления, клиент-серверная архитектура, облачные вычисления

Благодарности

Авторы благодарят Научно-производственное предприятие геофизической аппаратуры «Луч» за предоставленные практические материалы.

Развитие программно-алгоритмической базы математического моделирования и инверсии электромагнитных полей в пространственных моделях сред выполнено в рамках ФНИ № 0331-2019-0014 «Скважинная геофизика в электропроводящих анизотропных диспергирующих средах на основе высокопроизводительных решений трехмерных задач, высокоточных данных каротажа и лабораторных исследований керна».

Для цитирования

Даниловский К. Н., Дудаев А. Р., Глинских В. Н., Никитенко М. Н., Москаев И. А. Программное обеспечение на основе веб-технологий для геонавигации нефтегазовых скважин // Вестник НГУ. Серия: Информационные технологии. 2019. Т. 17, № 2. С. 5–17. DOI 10.25205/1818-7900-2019-17-2-5-17

Web-Technologies Based Software for Oil and Gas Wells Geosteering

K. N. Danilovskiy¹, A. R. Dudaev^{1,2}, V. N. Glinskikh¹⁻³
M. N. Nikitenko¹, I. A. Moskaev^{1,2}

¹ Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS

² Novosibirsk State University

³ Novosibirsk State Technical University
Novosibirsk, Russian Federation

Abstract

Accuracy of the horizontal well placement in the target reservoir becomes essential for efficient oilfield development. Geosteering of a well with a complex trajectory is performed using real-time geophysical data obtained while drilling.

The presented work is devoted to the development of a new software for horizontal oil and gas wells geosteering. Algorithms based on logging data correlation and electromagnetic logging data numerical inversion methods are used for well placement. The developed application is based on web-technologies and has a client-server architecture. To optimize the resource-intensive calculations execution time, high-performance cloud computing is used.

Keywords

software, web-technologies, geosteering, logging while drilling, horizontal well, numerical inversion, high-performance computations, client-server architecture, cloud computations

Acknowledgements

The authors acknowledge Scientific Production Enterprise of geophysical equipment “Looch” (SPE “Looch”) for the provided practical materials.

The development of the software-algorithmic base of electromagnetic fields mathematical modeling and inversion in spatial models of media was carried out within the FSR No. 0331-2019-0014 “Borehole geophysics in electrically conductive anisotropic dispersing media based on three-dimensional problems high-performance solutions, high-precision logging data and laboratory core studies”.

For citation

Danilovskiy K. N., Dudaev A. R., Glinskikh V. N., Nikitenko M. N., Moskaev I. A. Web-Technologies Based Software for Oil and Gas Wells Geosteering. *Vestnik NSU. Series: Information Technologies*, 2019, vol. 17, no. 2, p. 5–17. (in Russ.) DOI 10.25205/1818-7900-2019-17-2-5-17

Введение

В связи с повсеместным переходом в бурении от вертикальных скважин к скважинам с горизонтальным завершением существенно усложняется и расширяется круг задач промышленной геофизики. При бурении горизонтального участка скважины применяют геонавигацию – оперативную корректировку траектории бурения с целью ее удержания в целевом нефтеносном пласте. Следует отметить, что геонавигация – это сложный процесс, требующий использования дорогостоящего оборудования и программного обеспечения (ПО), а также работы квалифицированных геофизиков-геонавигаторов. Решение о корректировке траектории принимают непосредственно в процессе бурения на основе каротажных данных с использованием приборов, входящих в состав буровой колонны. Стандартные программные комплексы, предназначенные для интерпретации каротажных данных из вертикальных скважин, не подходят для проведения геонавигации, что приводит к необходимости разработки специализированного ПО.

Каротаж в процессе бурения начал активно развиваться еще в 80-х гг. прошлого столетия [1]. Несмотря на это, в России для каротажа в процессе бурения до сих пор используют приборы в основном только крупных иностранных нефтесервисных компаний: *Baker Hughes*, *Halliburton*, *Schlumberger*, *Weatherford*. В рамках реализации программ импортозамещения *Научно-производственным предприятием геофизической аппаратуры «Луч»* (НПП ГА «Луч», Новосибирск) и *Институтом нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН* (ИНГГ СО РАН, Новосибирск) разработан и опробован на месторождениях Западной Сибири аппаратный комплекс «ЛУЧ». Комплекс включает в себя ряд приборов для проведения каротажа в процессе бурения, при этом набор геофизических измерений достаточен для проведения как геонавигации, так и петрофизической интерпретации.

Оперативная интерпретация данных каротажа в процессе бурения может проводиться либо самим заказчиком – нефтедобывающей компанией, либо теми же нефтесервисными компаниями. Для нефтедобывающих компаний на российском рынке в настоящее время представлен ряд программных решений для геонавигации: «Геонафт» от компании *Геонавигационные технологии*, «Geosteering office» от *Геонавигация*, «StarSteer» от *ROGII*. Однако всё перечисленное ПО обладает одним недостатком: не использует наиболее продвинутые подходы для задач геонавигации, основанные на алгоритмах численных решений прямых и обратных задач электродинамики в классе реалистичных интерпретационных моделей. Сервисные компании используют ПО, узко ориентированное на «свои» приборы. В связи с этим в ИНГГ СО РАН разработано ПО, позволяющее проводить геонавигацию скважин

с использованием комплекса «ЛУЧ» двумя методами: корреляции каротажных данных и численной инверсии измерений электромагнитного каротажа (ЭМК).

Аппаратурный комплекс «ЛУЧ» для каротажа в процессе бурения

Приборы, входящие в состав комплекса каротажа в процессе бурения (рис. 1), позволяют проводить геофизические исследования в скважинах следующими методами:

- многозондовый высокочастотный индукционный каротаж (ВИКПБ);
- боковой сканирующий каротаж (БКС);
- гамма-каротаж (ГК);
- нейтрон-нейтронный каротаж по тепловым нейтронам (ННК-Т);
- гамма-гамма плотностной каротаж (ГГК-П);
- другие измерения (инклинометрия, положения угла отклонителя, температура, ударные нагрузки).



Рис. 1. Приборы каротажа в процессе бурения, входящие в состав комплекса «ЛУЧ»:
а – ВИКПБ; б – БКС

Fig. 1. Logging while Drilling Tools Included in the Complex “LOOCH”:
a – VIKPB; b – BK/BKS

Для решения ключевых задач геологического сопровождения бурения используют данные ЭМК из-за его наибольшей радиальной глубинности. Входящий в аппаратный комплекс «ЛУЧ» прибор ВИКПБ, основанный на методе высокочастотного индукционного каротажа ВИКИЗ [2; 3], выполняет измерения относительных амплитудно-фазовых характеристик эдс, наведенной в приемных катушках. Измерения эдс проводятся в двух основных и четырех дополнительных трехкатушечных зондах с длинами от 0,7 до 1,4 м на двух частотах 0,88 и 3,5 МГц. Зонды одинаковой длины различаются базой, т. е. расстоянием между дальней и ближней приемными катушками. В парах приемных катушек регистрируются разности фаз наведенных эдс $\Delta\varphi$ и отношения амплитуд ΔA , а также выполняется их трансформация в кажущееся удельное электрическое сопротивление (УЭС).

Проведенные опытно-промышленные испытания приборов каротажа в процессе бурения «ЛУЧ» на месторождениях АО «НК «Роснефть» и АО «Сургутнефтегаз» показывают, что приборы соответствуют техническим и эксплуатационным требованиям для бурения наклонно направленных и горизонтальных скважин [4; 5]. Однако для успешной проводки скважины недостаточно одних приборов каротажа в процессе бурения, необходимо также и специализированное ПО для оперативной интерпретации геофизических данных.

Архитектура и ИТ-технологии

Разработанное ПО для геонавигации представляет собой веб-приложение, состоящее из трех основных структурных блоков: клиентского, серверного и вычислительного (рис. 2).

Клиент отвечает только за визуализацию данных, что сводит к минимуму требования, предъявляемые к оборудованию. Использовать такое ПО можно на любых устройствах: от персональных компьютеров до смартфонов. Требуется лишь наличие веб-браузера и доступ к серверу по сети. При этом обновление приложения выполняется для всех клиентов одновременно благодаря использованию единого ресурса. Серверная часть обрабатывает пользовательские запросы, управляет очередностью выполнения ресурсоемких задач и возвращает результаты расчетов клиентам. В вычислительной части непосредственно производятся расчеты на серверах (кластерах) с использованием распределенных масштабируемых и высокопроизводительных параллельных вычислений.

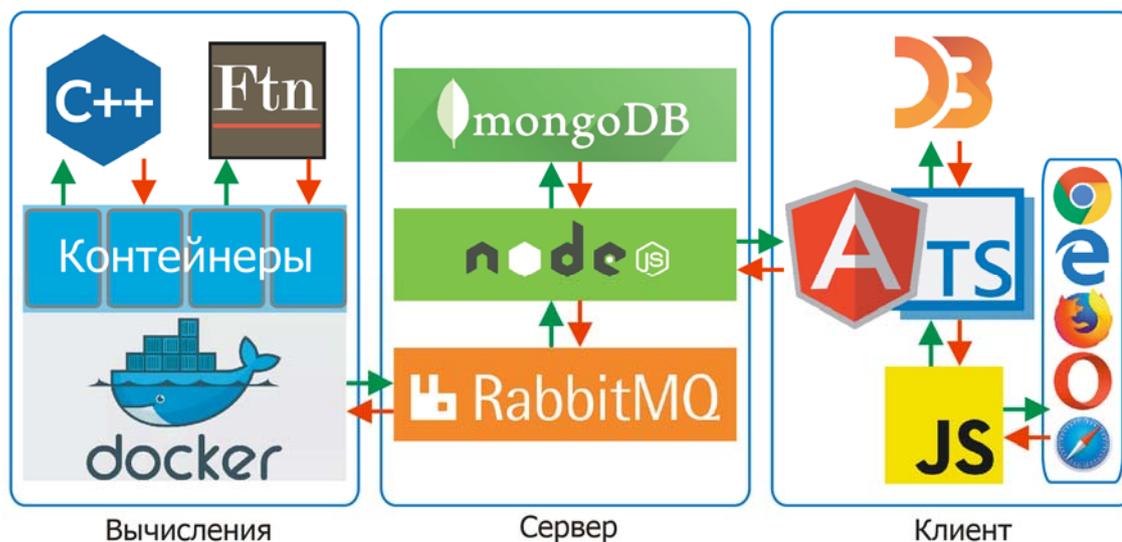


Рис. 2. Схема архитектуры разработанного приложения для геонавигации

Fig. 2. Architecture Scheme of the Developed Geosteering Application

Ниже приведен полный стек технологий, использованный при разработке ПО:

- TypeScript¹ и JavaScript² – языки программирования (ЯП), используемые для создания графического интерфейса, отображаемого в браузерах;
- Angular³ – платформа для сборки веб-приложений из созданных компонентов и используемых библиотек;
- D3⁴ – библиотека для визуализации в формате SVG сложных элементов: траектории скважины, моделей геологических пластов, каротажных данных;
- NodeJS⁵ – платформа, позволяющая разрабатывать серверную часть на языке JavaScript;
- MongoDB⁶ – нереляционная база данных для хранения учетных записей и пользовательских данных;
- RabbitMQ⁷ – брокер сообщений для взаимодействия сервера с вычислительными модулями;

¹ TypeScript documentation / Microsoft. URL: <https://www.typescriptlang.org/docs>

² JavaScript documentation / Mozilla foundation. URL: <https://developer.mozilla.org/bm/docs/Web/JavaScript>

³ Angular documentation / Google. URL: <https://angular.io/docs>

⁴ D3.js documentation / Bostock M., Davies J., Heer J., Ogievetsky V. URL: <https://github.com/d3/d3/wiki>

⁵ Node.js documentation / Various. URL: <https://nodejs.org/en/docs>

⁶ MongoDB documentation / MongoDB Inc. URL: <https://docs.mongodb.com/manual>

- Docker⁸ – платформа для создания кроссплатформенных вычислений;
- C++⁹, Fortran¹⁰ – ЯП, позволяющие разрабатывать высокопроизводительные вычислительные алгоритмы.

Клиент

Интерфейс, с которым работает пользователь, отображается в веб-браузере. За счет этого достигается кроссплатформенность клиентской части, поскольку веб-браузеры есть практически во всех операционных системах. Движок JavaScript V8¹¹, считывающий и исполняющий исходный код на JavaScript, а также другие аналоги встроены в большинство браузеров. Однако не все браузеры в одинаковой степени хорошо поддерживают новые стандарты ЯП. Поэтому для полной совместимости необходимо транслировать код в более старые версии JavaScript. Для этого в проекте используется язык TypeScript. Кроме того, статическая типизация, которая вводится TypeScript, фиксирует несоответствия типов на этапе трансляции в необходимый стандарт JavaScript до непосредственного выполнения программы. Это облегчает читаемость кода, а также помогает осуществлять поиск ошибок на этапе разработки и компиляции.

Для упрощения и ускорения разработки существуют различные фреймворки, определяющие структуру веб-приложения. Одним из наиболее известных является активно развивающийся Angular. Его отличительная особенность состоит в том, что он предназначен для разработки приложений именно на TypeScript. Для создания интуитивно понятного интерфейса используется библиотека Angular Material¹², являющаяся адаптацией Google Material Design¹³. Этот пакет упрощает создание таких компонентов взаимодействия с интерфейсом, как кнопки, переключатели, вкладки и пр. В вышеописанной библиотеке реализованы только простые компоненты, поэтому не все элементы интерфейса могут быть отображены с ее помощью. Более сложные элементы, такие как каротажные диаграммы и графические изображения моделей, визуализируются с помощью библиотеки D3. Она отличается высокой производительностью, гибкостью и возможностью работы с масштабируемой векторной графикой.

Сервер

Серверная часть принимает запросы пользователей, выполняет их обработку, взаимодействует с вычислительной частью и отправляет результаты обратно клиенту. Для обеспечения доступности (возможности всегда отвечать на запросы пользователей) сам сервер не выполняет сложных вычислений. При получении запроса на проведение расчетов происходит генерация входных данных для вычислительных алгоритмов. Они добавляются в очередь сообщений с заданной меткой, затем выполняются расчеты, и результаты возвращаются обратно в очередь сообщений. Последние изымаются и обрабатываются, а пользователю отправляются данные для отображения.

Для разработки серверной части выбрана программная платформа NodeJS, позволяющая разрабатывать серверную и клиентскую части на одном ЯП. NodeJS основана на движке V8, транслирующем JavaScript в машинный код. Поскольку для введения типизации используется TypeScript, перед запуском код транслируется в JavaScript, используя компилятор TypeScript. Для хранения пользовательских учетных записей и геофизических данных используется NoSQL база данных MongoDB. MongoDB предназначена для хранения данных без задания схем. Это позволяет проще менять формат хранимой информации, в сравнении

⁷ RabbitMQ documentation / Pivotal Software. URL: <https://www.rabbitmq.com/documentation.html>

⁸ Docker documentation / Docker Inc. URL: <https://docs.docker.com>

⁹ C++ documentation / Cppreference.com. URL: <https://cppreference.com>

¹⁰ Fortran documentation / O. Certic. URL: <https://www.fortran90.org>

¹¹ V8 documentation / V8 project. URL: <https://v8.dev/docs>

¹² Angular Material documentation / Google. URL: <https://material.angular.io>

¹³ Material Design documentation / Google. URL: <https://material.io>

с SQL решениями. Для взаимодействия с вычислительной серверная часть использует очередь сообщений RabbitMQ. Это делает их слабо зависимыми друг от друга, а также решает задачу сохранения еще не выполненных задач.

Вычислительные модули и организация взаимодействия с ними

Алгоритмы численной инверсии, лежащие в основе одного из методов геонавигации, требуют значительных вычислительных мощностей, особенно для трехмерных моделей среды. Для повышения быстродействия используются распределенные масштабируемые и высокопроизводительные параллельные вычисления. Численная инверсия данных ЭМК выполняется последовательно в заданных интервалах скважины (инверсионных окнах). Это делает возможным организацию параллельных вычислений на графических ускорителях и сопроцессорах [6].

Высокопроизводительные вычисления требуют распараллеливания кода на низкоуровневых ЯП (C++ / Fortran). Использование таких языков требует предварительной компиляции кода со всеми необходимыми зависимостями под каждый вычислительный ресурс. Для проверки корректности работы алгоритма его необходимо тестировать на каждой машине в отдельности. Альтернативным вариантом является запуск программы с помощью платформы Docker. Достаточно поместить вычислительную программу и все ее зависимости в Docker-контейнер вместе со скриптом, передающим данные из очереди сообщений в программу и возвращающим результаты. Такой контейнер работает быстро и надежно вне зависимости от вычислительного окружения, как на Linux, так и на Windows.

Методы геонавигации

Разработанное ПО позволяет проводить оперативную интерпретацию данных каротажа в процессе бурения, полученных комплексом «ЛУЧ». За проведение геонавигации отвечают модули «Корреляция» и «Инверсия», использующие методы корреляции каротажных данных и численной инверсии соответственно.

Корреляция каротажных данных

Большая часть существующих программных решений для геонавигации основана на идейно близких методах, имеющих в литературе различные названия: «модельно-стратиграфический», «сравнения каротажных данных», «матчинг», «model-compare-update» [7; 8]. Их суть состоит в сопоставлении данных, измеряемых приборами в процессе бурения, и синтетических данных, полученных в моделях среды, построенных по опорным скважинам. По этим априорным данным создается двумерная модель части разреза, в которой предполагается проводить горизонтальный участок скважины. Синтетические диаграммы каротажа вычисляются в такой модели на проекции запланированной траектории горизонтальной скважины. Начальная модель корректируется так, чтобы добиться совпадения между синтетическими и практическими данными.

В разработанном ПО каротажные данные пилотной субвертикальной скважины, приведенные к истинной вертикальной глубине, распространяются по латерали, тем самым формируя стартовую двумерную модель геологической среды. Синтетические каротажные диаграммы в горизонтальной скважине, как правило, получают путем линейной интерполяции данных модели среды в точках с соответствующими вертикальными глубинами. Однако линейная интерполяция не учитывает влияния прилегающих пластов (вмещающей среды) на сигналы ЭМК, которое обусловлено большой глубиной метода. В связи с этим синтетические сигналы ВИКПБ рассчитываются с помощью специально разработанных алгоритмов численного моделирования [9].

Геонавигатор работает с данными, привязанными к глубине по стволу скважины, а также с их проекциями на вертикальную и горизонтальную оси. Стартовая модель разбивается на блоки по горизонтали, при этом для каждого из блоков задается свой угол наклона

(рис. 3). При наличии предпосылок в модель могут вводиться разломы, т. е. линии, на которых происходит скачкообразное изменение параметров модели. После каждого изменения параметров модели или траектории скважины синтетические каротажные диаграммы рассчитываются заново, и процесс подбора повторяется. Достоверность модели, полученной в результате таких операций, достигается за счет наилучшего совпадения синтетических и практических данных каротажа в процессе бурения. Совпадение признается достаточным, если различие между практическими и синтетическими данными в среднем не превышает погрешности измерений.

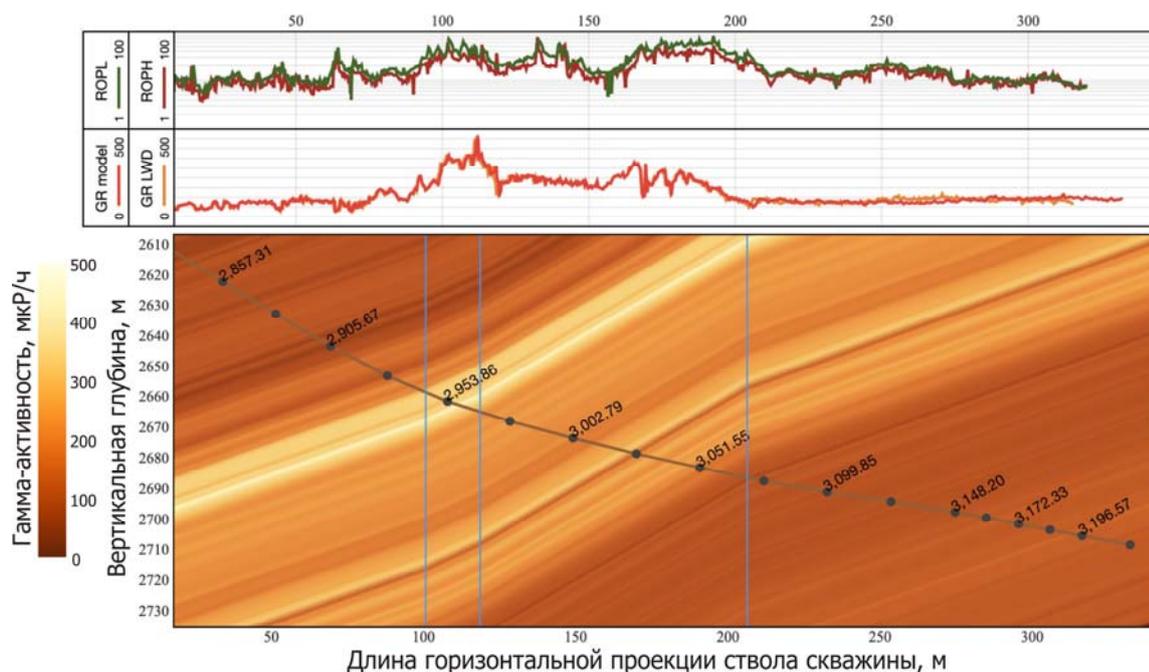


Рис. 3. Интерфейс модуля для проведения геонавигации методом корреляции каротажных данных

Fig. 3. Interface of the Module for Geosteering Using Logging Data Correlation Method

Однако метод геонавигации на основе корреляции каротажных данных обладает существенным недостатком. Поскольку датчики каротажных приборов располагаются на некотором удалении от бурового долота, пересечение геологической границы определяется лишь постфактум. Траекторию скважины корректируют, чтобы вернуться в пласт, а не просто удержаться в нем. Такие способы геонавигации принято называть «реактивными». Незапланированные пересечения геологических границ зачастую приводят к нежелательным последствиям. В частности, пересечение водонефтяного контакта может привести к поступлению воды в скважину, а вскрытие газовой шапки – и вовсе к аварийной ситуации.

Численная инверсия данных ЭМК

В противоположность реактивным выделяют «проактивные» методы геонавигации, когда траекторию скважины корректируют до того, как произойдет нежелательное пересечение геологической границы буровым долотом [10–13]. Радиальная глубинность исследования ВИКПБ может достигать 3 м [14; 15]. Это позволяет проводить проактивную геонавигацию и картировать геоэлектрические границы коллектора в процессе бурения, используя алгоритмы численной инверсии сигналов прибора.

Численная инверсия данных ЭМК представляет собой целенаправленный подбор параметров геоэлектрической модели путем минимизации функционала невязки измеренных и синтетических данных [16–18]. В разработанном ПО моделирование синтетических данных проводится путем численного решения прямой задачи ЭМК в классе слоисто-однородных моделей методом разделения переменных. Минимизация функционала невязки выполняется с использованием алгоритма на основе метода деформируемых многогранников.

Разработанное ПО предоставляет пользователю гибкий интерфейс для выполнения по-оноконной инверсии сигналов ВИКПБ в автоматическом и ручном режимах (рис. 4). Геонавигатор загружает входные данные, выбирает интервал для инверсии, устанавливает ширину и перекрытие окон. Стартовая модель для инверсии подбирается, исходя из априорных данных, либо импортируется из модуля геонавигации методом корреляции каротажных данных. Алгоритм численной инверсии позволяет использовать произвольные комбинации сигналов из полного набора измерений ВИКПБ. Благодаря этому при ограниченной скорости передачи данных в реальном времени для инверсии можно задействовать только часть измеряемых сигналов. Уточнить параметры модели можно, получив всю информацию из памяти прибора, после его подъема из скважины на поверхность.

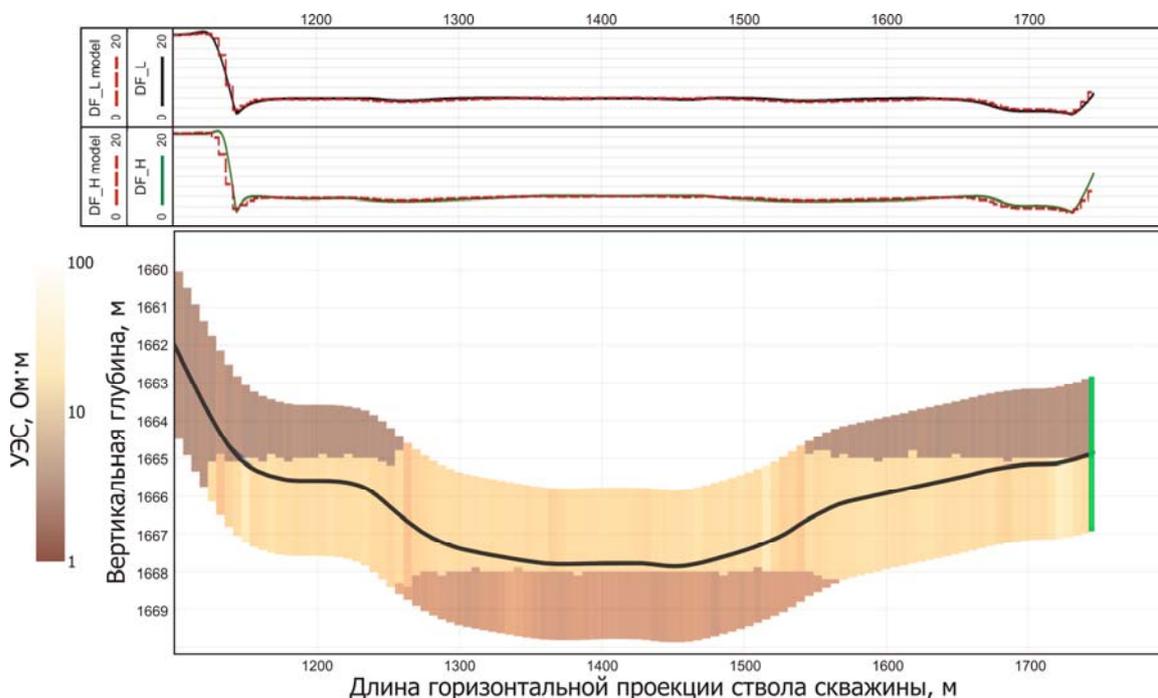


Рис. 4. Интерфейс модуля для проведения геонавигации методом инверсии данных ЭМК

Fig. 4. Interface of the Module for Geosteering Using Electromagnetic Logging Data Inversion Method

Применение метода геонавигации с использованием численной инверсии данных ВИКПБ позволяет картировать границы пласта-коллектора и заблаговременно корректировать траекторию скважины в процессе бурения, не пересекая сами границы. Такой подход значительно повышает эффективную длину ствола скважины, т. е. расстояние, пройденное скважиной внутри продуктивного пласта. Помимо этого, инверсия данных ЭМК позволяет изучать электрофизические характеристики отложений, не вскрытых скважиной и располагающихся ниже по разрезу.

Методы геонавигации скважин развиваются в связи с возникновением практической потребности нефтегазовой отрасли в высокоточной проводке скважин с горизонтальным завершением во все более сложных геологических условиях. При этом ключевую роль играет развитие аппаратной базы наклонно направленного бурения и каротажа в процессе бурения. Дальнейшее развитие методического аспекта ПО связано с внедрением модуля интерпретации скважинных имиджей УЭС, предоставляемых азимутальным прибором БКС [19–21].

Заключение

Разработано ПО для геологического сопровождения бурения с использованием данных аппаратного комплекса для каротажа в процессе бурения «ЛУЧ». Алгоритмическая составляющая ПО реализует два метода геонавигации. Первый использует традиционный подход корреляции каротажных данных, второй – численную инверсию данных ЭМК. Использование этих методов в комплексе позволяет повысить достоверность результатов интерпретации данных каротажа в процессе бурения, что приводит к более эффективной проводке скважины. Предложен облачный сервис для обработки и интерпретации геофизических данных с использованием кроссплатформенных распределенных масштабируемых вычислений. Использование современных вычислительных технологий позволяет значительно ускорить решение задачи численной инверсии, что необходимо для оперативной геонавигации.

Список литературы / References

1. **Аксельрод С. М.** Методы опережающей навигации при бурении горизонтальных скважин (по материалам зарубежной литературы) // Каротажник. 2012. № 219. С. 87–122.
Akselrod S. M. Metody operezhashushhej navigacii pri burenii gorizontol'nyh skvazhin (po materialam za-rubezhnoj literatury) [Advance navigation methods for drilling horizontal wells (based on materials from foreign literature)]. *Karotazhnik*, 2012, no. 219, p. 87–122. (in Russ.)
2. **Глинских В. Н., Никитенко М. Н., Даниловский К. Н., Еремин В. Н., Москаев И. А.** Телеметрические системы каротажа: программно-методическое обеспечение в процессе бурения наклонно-горизонтальных скважин // Neftegaz.RU. 2017. № 10. С. 42–49.
Glinskikh V. N., Nikitenko M. N., Danilovskiy K. N., Eremin V. N., Moskaev I. A. Telemetricheskie sistemy karotazha: programmno-metodicheskoe obespechenie v processe burenija naklonnogo-gorizontol'nyh skvazhin [Telemetry logging systems: software and methodological support in the process of drilling inclined-horizontal wells]. *Neftegaz.RU*, 2017, no. 10, p. 42–49. (in Russ.)
3. **Глинских В. Н., Никитенко М. Н., Эпов М. И., Ерёмин В. Н.** Алгоритмы и программное обеспечение для геонавигации по данным электромагнитного каротажа в процессе бурения // II Науч.-практ. конф. «Горизонтальные скважины 2017: Проблемы и перспективы»: расширенные тезисы докладов, 2017. 3G05. DOI 10.3997/2214-4609.201700431
Glinskikh V. N., Nikitenko M. N., Epov M. I., Eremin V. N. Algorithms and Software for Geosteering According to LWD EM Data. In: Horizontal Wells 2017 Challenges and Opportunities: extended abstracts, 2017, pap. 3G05. (in Russ.) DOI 10.3997/2214-4609.201700431
4. **Ерёмин В. Н., Волканин Ю. М., Тарасов А. В.** Аппаратурно-методическое обеспечение электромагнитного каротажа в процессе бурения // Каротажник. 2013. № 226. С. 62–69.
Eremin V. N., Volkanin Yu. M., Tarasov A. V. Apparaturno-metodicheskoe obespechenie elektromagnitnogo karotazha v protsesse bureniya [Instrumental and methodological support of electromagnetic logging while drilling]. *Karotazhnik*, 2013, no. 226, p. 62–69 (in Russ.)

5. **Каюров К. Н., Ерёмин В. Н., Эпов М. И., Глинских В. Н., Сухорукова, К. В., Никитенко, М. Н.** Аппаратура и интерпретационная база электромагнитного каротажа в процессе бурения // Нефтяное хозяйство. 2014. № 12. С. 112–115.
Kayurov K. N., Eremin V. N., Epov M. I., Glinskikh V. N., Sukhorukova K. V., Nikitenko M. N. Electromagnetic-logging-while-drilling equipment and numerical inversion software. *Oil Industry*, 2014, no. 12, p. 112–115. (in Russ.)
6. **Дудаев А. Р., Соболев А. Ю., Глинских В. Н.** Программное обеспечение с облачными вычислениями для электромагнитного каротажа в процессе бурения нефтегазовых скважин // XIX Науч.-практ. конф. «Геомодель 2017 – Вопросы геологоразведки и разработки месторождений нефти и газа»: расширенные тезисы докладов, 2017. CD-ROM 43814.
Dudaev A. R., Sobolev A. Yu., Glinskikh V. N. Development of cloud computing software for LWD measurements and geosteering. In: Extended Abstracts of the 19th Science and Applied Research Conference on Oil and Gas Geological Exploration and Development “Geomodel 2017”, 2017, CD-ROM 43814 (in Russ.)
7. **Salehi M., Abadie J., Asif S., Ito K., Maggs D., Morriss C., Ortenzi L., Rasmus J., Griffiths R.** Rapid and practical characterization of near-wellbore layer structure and properties in high-angle and horizontal wells. In: Transactions of the SPWLA 56th Annual Logging Symposium, 2015, pap. DDDD.
8. **Polyakov V., Omeragic D., Shetty S., Brot B., Habashy T., Mahesh A., Friedel T., Vik T., Flugsrud T.** 3D Reservoir Characterization Workflow Integrating High Angle and Horizontal Well Log Interpretation with Geological Models. In: Extended abstracts of the International Petroleum Technology Conference, 2013, pap. 16828. DOI 10.2523/iptc-16828-abstract
9. **Nikitenko M. N., Epov M. I., Glinskikh V. N., Suhorukova K. V., Eremin V. N.** Development of LWD High-frequency Resistivity Tool. In: Extended abstracts of the 6th Saint Petersburg International Conference & Exhibition «Geosciences – Investing in the Future», 2014, pap. ThD05. DOI 10.3997/2214-4609.20140177
10. **Rabinovich M., D’Arcy B., Leslie R.** Quantifying VOI in geosteering: a North Sea case study. In: Transactions of the SPWLA 59th Annual Logging Symposium, 2018, pap. P.
11. **Larsen D., Antonov Y., Luxey P., Skillings J., Skaug M., Wagner V.** Navigating the horizontal section in a heterogeneous formation while using Extra Deep Azimuthal Resistivity for optimizing the wellbore placement within a narrow TVD window. In: Transactions of the SPWLA 57th Annual Logging Symposium, 2016, pap. III.
12. **Sviridov M., Mosin A., Antonov Y., Nikitenko M., Martakov S., Rabinovich M.** New software for processing of LWD extra-deep resistivity and azimuthal resistivity data. *SPE Reservoir Evaluation and Engineering*, 2014, vol. 17, no. 02, p. 109–127. DOI 10.2118/160257-pa
13. **Tilsley-Baker R., Antonov Y., Martakov S., Maurer H., Mosin A., Sviridov M., Klein K., Iversen M., Barbosa J., Carneiro G.** Extra-Deep Resistivity Experience in Brazil Geosteering Operations. In: Extended abstracts of the SPE Annual Technical Conference and Exhibition, 2013, pap. 166309. DOI 10.2118/166309-ms
14. **Эпов М. И., Никитенко М. Н., Глинских В. Н., Сухорукова К. В.** Численное моделирование и анализ сигналов электромагнитного каротажа в процессе бурения // Каротажник. 2014. № 245. С. 29–42.
Epov M. I., Nikitenko M. N., Glinskikh V. N., Sukhorukova K. V. Chislennoe modelirovanie i analiz signalov elektromagnitnogo karotazha v protsesse bureniya [Numerical modeling and analysis of electromagnetic logging while drilling signals]. *Karotazhnik*, 2014, no. 245, p. 29–42. (in Russ.)
15. **Эпов М. И., Никитенко М. Н., Сухорукова К. В., Глинских В. Н.** Исследование возможностей электрического и электромагнитного каротажа в электрически макроанизотропных породах

тропных пластах, вскрытых наклонно-горизонтальными скважинами // Каротажник. 2016. № 260. С. 64–79.

Епов М. И., Nikitenko M. N., Sukhorukova K. V., Glinskikh V. N. Issledovaniye vozmozhnostey elektricheskogo i elektromagnitnogo karotazha v elektricheski makroanizotropnykh plastakh, vskrytykh naklonno-gorizont'al'nymi skvazhinami [Investigation of the possibilities of electrical and electromagnetic logging in electrically macroanisotropic formations intersected by inclined-horizontal wells]. *Karotazhnik*, 2016, no. 260, p. 64–79. (in Russ.)

16. **Никитенко М. Н., Сухорукова К. В., Глинских В. Н., Ерёмин В. Н.** Оперативная обработка и интерпретация данных электромагнитного каротажа на разных этапах строительства нефтегазовой скважины // IV Междунар. науч.-практ. конф. «Тюмень-2015: Глубокие горизонты науки и недр»: расширенные тезисы докладов. 2015. P06. DOI 10.3997/2214-4609.201412045

Nikitenko M. N., Sukhorukova K. V., Glinskikh V. N., Eremin V. N. Operativnaya obrabotka i interpretatsiya dannykh elektromagnitnogo karotazha na raznykh etapakh stroitel'stva neftegazovoy skvazhiny [Fast processing and interpretation of electromagnetic logging data at different oil and gas well construction stages]. In: Tyumen 2015 – Deep Subsoil and Science Horizons, 2015, pap. P06 (in Russ.) DOI 10.3997/2214-4609.201412045

17. **Эпов М. И., Глинских В. Н., Сухорукова К. В., Никитенко М. Н., Ерёмин В. Н.** Численное моделирование и инверсия данных электромагнитного каротажа в процессе бурения и шаблонирования нефтегазовых скважин // Геология и геофизика. 2015. № 56 (8). С. 1520–1529. DOI 10.15372/gig20150809

Епов М. И., Glinskikh V. N., Sukhorukova K. V., Nikitenko M. N., Eremin V. N. Forward modeling and inversion of LWD induction data. *Russian Geology and Geophysics*, 2015, vol. 56, no. 8, p. 1194–1200. (in Russ.) DOI 10.15372/gig20150809

18. **Эпов М. И., Никитенко М. Н., Сухорукова К. В., Глинских В. Н., Ерёмин В. Н., Горбатенко А. А., Павлова М. А.** Сигналы электромагнитного каротажа в процессе бурения и их численная инверсия // Геология и минерально-сырьевые ресурсы Сибири. 2014. № 3 (19). С. 49–55.

Епов М. И., Nikitenko M. N., Sukhorukova K. V., Glinskikh V. N., Eremin V. N., Gorbatenko A. A., Pavlova M. A. Electromagnetic LWD signals and their numerical inversion. *Geology and mineral resources of Siberia*, 2014, no. 3 (19), p. 49–55. (in Russ.)

19. **Danilovskiy K., Glinskikh V., Nechaev O.** 3D modelling of the new resistivity microimaging tool signals for logging while drilling. In: Extended Abstracts of the 80th EAGE Conference & Exhibition, 2018, pap. Tu SP2 01. DOI 10.3997/2214-4609.201801679

20. **Глинских В. Н., Даниловский К. Н., Нечаев О. В.** Трехмерное численное моделирование сигналов азимутального микробоккового каротажа в процессе бурения // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. 2018. № 10. С. 32–39. DOI 10.30713/2413-5011-2018-10-32-39

Glinskikh V. N., Danilovsky K. N., Nechaev O. V. 3D numerical simulation of the azimuthal microlateral LWD signals. *Geology, Geophysics and Development of Oil and Gas Fields*, 2018, no. 10, p. 32–39. (in Russ.) DOI 10.30713/2413-5011-2018-10-32-39

21. **Даниловский К. Н., Нечаев О. В.** Моделирование сигналов электрического LWD-микроимиджера применительно к задаче геонавигации горизонтальных скважин // Материалы V Всерос. молодежной науч.-практ. конф. «Науки о Земле. Современное состояние», 2018. С. 23–25.

Danilovskiy K. N., Nechaev O. V. Modelirovanie signalov elektricheskogo LWD-mikroimidzhera primenitel'no k zadache geonavigatsii gorizont'al'nykh skvazhin [Simulation of LWD resistivity microimaging tool signals applied to the horizontal wells geosteering]. In: Proceed-

ings of the 5th All-Russian Youth Scientific and Practical Conference "Earth Sciences. Modern state", 2018, p. 23–25. (in Russ.)

*Материал поступил в редколлегию
Received
21.03.2019*

Сведения об авторах / Information about the Authors

Даниловский Кирилл Николаевич, аспирант, младший научный сотрудник, Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН (пр. Академика Коптюга, 3, Новосибирск, 630090, Россия)

Kirill N. Danilovskiy, PhD Student, Junior Researcher, Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS (3 Koptuyug Ave., Novosibirsk, 630090, Russian Federation)

DanilovskiiKN@ipgg.sbras.ru
ResearcherID: O-1475-2017

Дудаев Александр Русланович, лаборант, Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН (пр. Академика Коптюга, 3, Новосибирск, 630090, Россия), магистрант факультета информационных технологий, Новосибирский государственный университет (ул. Пирогова, 1, Новосибирск, 630090, Россия)

Alexander R. Dudaev, Laboratory Assistant, Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS (3 Koptuyug Ave., Novosibirsk, 630090, Russian Federation), Master's Student, Faculty of Information Technologies, Novosibirsk State University (1 Pirogov Str., Novosibirsk, 630090, Russian Federation)

DudaevAR@ipgg.sbras.ru
ResearcherID: D-4181-2019

Глинских Вячеслав Николаевич, доктор физико-математических наук, профессор РАН, заведующий лабораторией, Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН (пр. Академика Коптюга, 3, Новосибирск, 630090, Россия), доцент кафедры геофизики геолого-геофизического факультета, Новосибирский государственный университет (ул. Пирогова, 1, Новосибирск, 630090, Россия), профессор кафедры интеллектуальных геофизических систем ФТФ, Новосибирский государственный технический университет (пр. К. Маркса, 20, Новосибирск, 630073, Россия)

Viacheslav N. Glinskikh, Doctor in Physics and Mathematics, Professor of the Academy of Sciences, Head of Laboratory, Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS (3 Koptuyug Ave., Novosibirsk, 630090, Russian Federation), Associate Professor of Chair of Geophysics at the Department of Geology and Geophysics, Novosibirsk State University (1 Pirogov Str., Novosibirsk, 630090, Russian Federation), Professor, Novosibirsk State Technical University (20 Karl Marx Ave., Novosibirsk, 630073, Russian Federation)

GlinskikhVN@ipgg.sbras.ru
ResearcherID: C-6551-2018

Никитенко Марина Николаевна, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН (пр. Академика Коптюга, 3, Новосибирск, 630090, Россия)

Marina N. Nikitenko, PhD, Senior Researcher, Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS (3 Koptug Ave., Novosibirsk, 630090, Russian Federation)

NikitenkoMN@ipgg.sbras.ru

ResearcherID: J-6876-2018

Москаев Илья Алексеевич, инженер, Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН (пр. Академика Коптюга, 3, Новосибирск, 630090, Россия), магистрант геолого-геофизического факультета, Новосибирский государственный университет (ул. Пирогова, 1, Новосибирск, 630090, Россия)

Ilya A. Moskaev, Engineer, Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS (3 Koptug Ave., Novosibirsk, 630090, Russian Federation), Master's Student, Department of Geology and Geophysics, Novosibirsk State University (1 Pirogov Str., Novosibirsk, 630090, Russian Federation)

MoskaevIA@ipgg.sbras.ru

ResearcherID: D-6392-2019