

## ОТЗЫВ НАУЧНОГО КОНСУЛЬТАНТА

профессора, д.ф.-м.н. Чеверды Владимира Альбертовича на диссертацию Лисицы Вадима Викторовича «Численные методы и алгоритмы расчета волновых сейсмических полей в средах с локальными осложняющими факторами», представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 05.13.18 – математическое моделирование, численные методы и комплексы программ.

В настоящее время численное моделирование сейсмических волновых полей используется в двух целях. Первая, традиционная, обеспечение углублённого понимания особенностей самого процесса их распространения и взаимодействия с трёхмерными неоднородностями. Вторая, сформировавшаяся в последние два-три десятилетия, состоит в обеспечении построения волновых изображений и решении обратной динамической задачи сейсмологии путём обращения полных волновых полей. Немаловажной частью мне видится и формирование синтетических наборов сейсмических данных, которые затем используются для тестирования новых и оценки эффективности уже существующих, процедур обработки. Таким образом, актуальность создания новых эффективных численных методов и их теоретическая и практическая востребованность не вызывает сомнений. Замечу сразу, что результаты, полученные соискателем, несомненно, обеспечат существенное развитие во всех трёх перечисленных направлениях.

Наиболее распространённым численным методом для решения этого круга задач в настоящее время является, без всякого сомнения метод конечных разностей. На его основе удаётся обеспечить и необходимую для сейсмического моделирования точность, возможность использования моделей среды практически любой сложности, гарантируя при этом высокую эффективность алгоритмов и их масштабируемость. Однако необходимо признать, что наибольшее распространение метод конечных разностей в трёхмерном численном моделировании сейсмических волн получил для классических изотропных идеально упругих сред. Главное ограничение при его использовании для более сложных моделей заключается в существенном возрастании необходимых вычислительных ресурсов при усложнении математической модели среды. В частности, наличие анизотропии приводит к необходимости использования специализированных схем с четырехкратным увеличением числа переменных в ячейке сетке, по сравнению со схемой для аппроксимации уравнений динамической теории упругости в случае изотропной среды. Поглощение сейсмической энергии учитывается введением дополнительных переменных памяти и уравнений на них. Чрезвычайно актуальной является задача расчета волновых полей в средах с мелкомасштабными неоднородностями, такими, например, как кавернозно-трещиноватые коллекторы углеводородов или разломы и прилегающие к ним зоны дробления. Действительно, в последнем случае для корректного описания взаимодействия сейсмических волн с такими неоднородностями нужно обеспечить, по крайней мере, пять точек сетки на включение, что приводит к необходимости использования сеток с шагом в несколько сантиметров. Прямолинейное использование таких сеток ведёт к необходимости решать задачи гигантской размерности (моделирование сейсмических волн необходимо выполнять в областях с типовыми размерностями в несколько километров глубиной и 10 – 20 км в горизонтальных направлениях). К тому же использование явных конечно-разностных схем с необходимостью требует выполнения критерия Куранта, то есть использование фантастически мелкого шага по времени. Отдельно стоит упомянуть и задачу численного моделирования сейсмических волн при наличии существенной топографии резкоконтрастных границ, в особенности свободной поверхности и морского дна. В этом случае использование регулярных сеток приводит к кусочно-постоянной аппроксимации границы, что, в свою очередь, является причиной интенсивной дифракции, полностью

искажающей решение. Особенное искажение при этом претерпевают поверхностные волны, распространяющиеся вдоль свободной поверхности. Поэтому для решения таких задачи оптимальными являются методы на нерегулярных сетках, такие как разрывный метод Галеркина, которые сложнее в реализации, особенно с точки зрения параллельных вычислений и низкоуровневой оптимизации алгоритмов, и требуют больших вычислительных ресурсов.

Отмечу, что в реальных геологических средах указанные осложняющие факторы обычно представлены локально – анизотропные и вязкоупругие пропластки; области повышенной трещиноватости в окрестности структурных нарушений и зон локализации напряжений; резкоконтрастные границы – верхняя часть разреза. Поэтому важнейшим направлением дальнейшего развития методов конечно-разностного моделирования мне представляется целенаправленное применение различных его модификаций конкретно к областям с усложнённым строением среды. Особенной заслугой соискателя я считаю именно её нацеленность на разработку приёмов и методов, обеспечивающих корректное объединение различных конечно-разностных шаблонов, учитывающих специфику среды в отдельных областях. Особо важным мне представляется предложенный и развитый им изящный приём согласования различных шаблонов путём введения группы процессоров, обеспечивающих выполнение необходимых преобразований получаемых данных. Этот приём оказался не только весьма универсальным в плане качественного согласования различных конечно-разностных шаблонов, но и позволил минимизировать непроизводительные затраты, связанные пересылкой данных между группами процессорных элементов, выполняющих вычисления с различными шаблонами. Весьма многообещающим приёмом, обеспечившим согласование метода конечных разностей и конечных элементов при расчёте волновых сейсмических полей в присутствии свободной границы со сложной топографией.

Отдельного упоминания мне представляется достойным предложенный в диссертационной работе подход к согласованию идеально-упругих сред и сред с поглощением. Дело в том, что, с одной стороны, моделирование волновых полей в вязкоупругих средах весьма ресурсоёмко (введение переменных памяти существенно увеличивает необходимый объём памяти), а с другой стороны такие области занимают незначительный объём пространства. Таким образом, выделение таким объёмов среды в отдельные блоки и использование вязкоупругих моделей только в них, позволит существенно снизить требуемые ресурсы и обеспечить высокое качество получаемых результатов. То же самое можно сказать и про локальное пространственно-временное измельчение сетки, про объединение шаблонов для изотропных и анизотропных сред и ряд других приёмов и подходов.

В заключение ещё раз подчеркну, что предлагаемый набор приёмов и подходов, позволяющих обеспечить корректное объединение численных методов для расчёта волновых полей в средах с локальными физическими (изотропия-анизотропия, наличие-отсутствие поглощения) и геометрическими (произвольная топография резких границ и другие) усложнениями. Как показано в работе, такой подход позволяет, в зависимости от задачи, снизить потребности в вычислительных ресурсах для проведения моделирования до нескольких десятков раз.

Отмечу ещё, что результаты работы опубликованы в ведущих мировых научных журналах, таких, например, как *Journal of Computational Physics* и докладывались на многочисленных российских и международных научных конференциях, что свидетельствует о достаточной апробации результатов, вошедших в работу.

Считаю, что диссертационная работа Вадима Викторовича Лисицы удовлетворяет требованиям ВАК, предъявляемым к докторским диссертациям, и соискатель несомненно заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 05.13.18.

Заведующий лабораторией  
Многоволновых сейсмических исследований  
ИНГГ СО РАН  
д.ф.-м.н., профессор

Чеверда Владимир Альбертович

13.07.2017

630090, г. Новосибирск, пр. Ак. Коптюга, д.3,  
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Институт нефтегазовой геологии и геофизики  
им. А.А.Трофимука  
Сибирского отделения Российской академии наук  
Тел. 8 383 333 0054  
e-mail: [cheverdava@ipgg.sbras.ru](mailto:cheverdava@ipgg.sbras.ru)

Подпись д.ф.-м.н., проф. В.А. Чеверды удостоверяю  
Ученый секретарь ИНГГ СО РАН  
к.г.-м.н.



Санчаа А.М.