

Тема работы

РАЗРАБОТКА ВЫСОКООПТИМИЗИРОВАННОГО ПАКЕТА ПРОГРАММ  
ДИФРАКЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ СЕЙСМИЧЕСКИХ ВОЛНОВЫХ ПОЛЕЙ С  
АДАПТАЦИЕЙ ПОД ГРАФИЧЕСКИЕ УСКОРИТЕЛИ.

Состав коллектива

Зятьков Николай Юрьевич – асс. преподавателя ФИТ НГУ, программист ОКТ ФИТ,  
Айзенберг Аркадий Маркович – к.ф.-м.н., доцент, с.н.с. ИНГГ СО РАН,  
Кабанихин Сергей Игоревич – член-корр. РАН, профессор, Директор ИВМиМГ СО РАН.

Постановка задачи

Сейсмический метод исследования недр Земли использует отраженные волны для послойного восстановления структуры и свойств реальной среды по наблюдаемым данным. Для случая покрывающей среды с сильной латеральной неоднородностью (соляные тела, базальтовые слои, рифовые структуры и т.д.) построение сейсмического изображения – требующая затрат задача, которая привлекает огромное внимание при поисках нефтяных месторождений. Наличие больших скоростных контрастов, неоднородностей, анизотропии и затухания вкпе со сложными формами геологических границ понижает разрешающую способность сейсмики. Современные методы построения изображения среды развиваются с учетом все более сложных моделей и с применением более прецизионных алгоритмов.

Строгая теория операторов прохождения и распространения-дифрагирования (ТОПРД) (А.М. Aizenberg & А.А. Ayzenberg, 2015), развитая в последнее время, дает точное аналитическое решение прямой задачи для неоднородной среды с произвольными кусочно-гладкими границами в форме суперпозиции волновых сигналов многократно отраженных и преломленных волн согласно их волновому коду (последовательности проходимых слоев). Каждый отдельный сигнал описывается композицией поверхностных физически реализуемых интегральных операторов распространения-дифрагирования, описывающих распространение волн в неоднородных слоях с учетом многократной дифракции на ребрах, вершинах и вогнутых гладких частях их границ, и операторов прохождения конволюционного типа, описывающих отражение и преломление на гладких частях границ.

Для численной реализации аналитической теории операторов прохождения и распространения-дифрагирования был предложен метод наложения концевых волн (МНКВ) (Zyatkov и др., 2016). Данный алгоритм использует аппроксимации операторов прохождения и распространения-дифрагирования в диапазоне сейсмических частот и способен имитировать нерегулярности в волновом поле, например, каустики, и порождать дифракции, головные и огибающие волны, которые не могут быть должным образом учтены при моделировании с помощью асимптотической лучевой теории или геометрической теории дифракции.

Цель работы состояла в реализации алгоритма МНКВ в виде программного комплекса и его адаптации для графических ускорителей посредством технологии NVIDIA CUDA для получения существенного прироста производительности программы.

## Современное состояние проблемы

В обзорах Carcione и др. (2002), Virieux и др. (2011), Virieux and Operto (2009), Carcione и др. (2010) все существующие методы математического моделирования сейсмического волнового поля разделены на: 1) численные методы (метод конечных разностей, метод интегральных представлений, метод конечных элементов, метод конечных объёмов, граничные интегральные уравнения и т.п.); 2) приближённые аналитические методы (методы лучевого трассирования, геометрическая теория дифракции, физическая теория дифракции и т.п.); 3) строгие аналитические методы (пространственно-спектральные методы, метод разложения на плоские волны, обобщённый лучевой метод, рефлективити-метод и т.п.). Численные методы широко используются в моделировании полного волнового поля, но характеризуются невозможностью его декомпозиции на элементарные волны, что важно для эффективного решения обратной задачи. Приближённые аналитические методы дают возможность вычислять волновые фрагменты полного волнового поля, но используют высокочастотное приближение, которого недостаточно для описания сложных дифракционных явлений. Строгие аналитические методы дают как полное волновое поле, так и разбиение его на волновые фрагменты. Однако в настоящее время эти методы развиты только для одномерно-неоднородных сред.

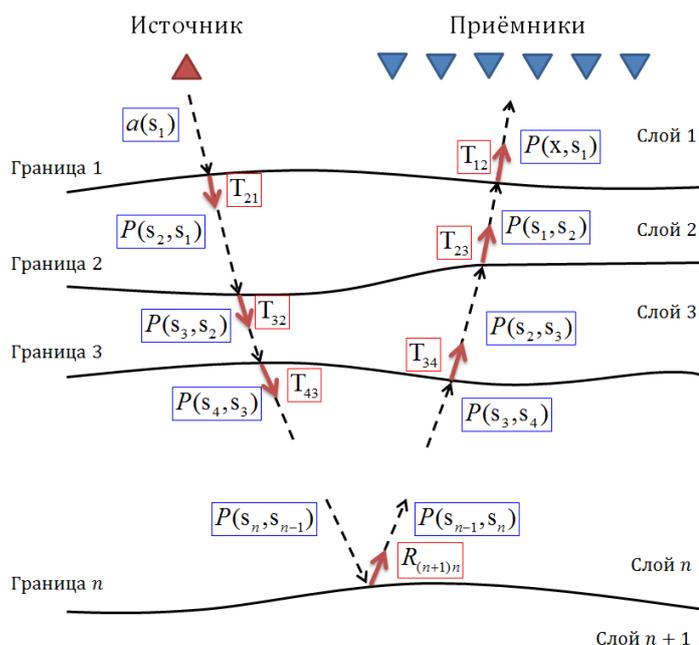
На данный момент не существует единого подхода, который бы мог учесть все преимущества и устранить недостатки указанных методов. На практике, нефтегазодобывающие компании вынуждены использовать комбинацию различных методов, пытаясь найти компромисс между скоростью вычислений алгоритма и точностью его решения.

## Подробное описание работы

МНКВ представляет собой численную реализацию аналитической теории операторов прохождения и распространения-дифрагирования (ТОПРД, А.М. Aizenberg & А.А. Auzenberg, 2015). В данной теории для заданной слоистой модели среды, источника и приёмников вводятся три интегральных оператора (рис. 1):

- 1) Композитный оператор распространения-дифрагирования  $P = K D$ , составленный из физически реализуемого оператора распространения  $K$  типа Кирхгофа, продолжающего волновое поле между точками предельными к криволинейным границам слоя, а также источником и приёмниками, и оператора дифрагирования  $D$ , порождающего многократную дифракцию на вогнутых частях гладких и кусочно-гладких границ слоя.
- 2) Оператор прохождения  $T$  конволюционного типа, посредством которого производится преломление и отражение волнового поля на криволинейной границе – контакте двух сред.

При численной реализации данной теории каждая граница слоистой среды дискретизируется на  $N$  треугольников. Волновое поле на элементах каждой такой границы представляется в виде вектора  $a^s$  размерности  $N$ . Конволюционный оператор прохождения  $T$  и слоевой оператор распространения-дифрагирования  $P^{S_2S_1}$  аппроксимируются в виде матриц размерности  $N \times N$ . Оператор распространения-дифрагирования, переносящий волновое поле с границы в приёмники  $P^{XS}$  – в виде матрицы размерности  $N_x \times N$  (где  $N_x$  – количество приёмников модели).



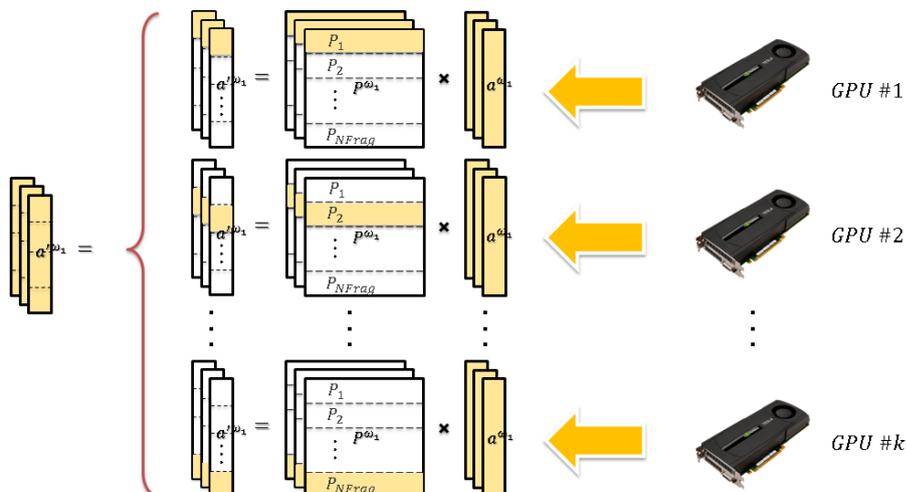
**Рисунок 1.** Схема построения решения с помощью операторов прохождения и распространения-дифрагирования.

Реализацию алгоритма МНКВ в общем случае можно разделить на три основных блока:

- 1) Вычисление вектора падающего волнового поля источника  $y$  на произвольную криволинейную границу  $\mathbb{S} - a^s$ .
- 2) Реализация распространения волнового поля с предыдущей, в соответствии с заданным волновым кодом, границы слоя  $\mathbb{S}_i$  на следующую границу  $\mathbb{S}_{i+1}$  по матрично-векторной формуле  $a^{s_{i+1}} = P^{s_{i+1}s_i} a^{s_i}$ .
- 3) Реализация распространения волнового поля с последней, в соответствии с заданным волновым кодом, границы слоя  $\mathbb{S}$  в приёмники  $x$  по матрично-векторной формуле  $a^x = P^{xs} a^s$ .

Для получения аналитического решения прямой задачи для геологической модели, включающей точечные источники, набор сейсмических приёмников и набор трёхмерных слоистых границ произвольной криволинейной формы, ТОПРД предлагает, по аналогии с обобщённым лучевым методом, развитым Кеннетом (1983), представлять полное волновое поле в виде суммы волновых полей, распространяющихся в соответствии с некоторыми волновыми кодами (траектории прохождения волновым полем слоёв модели от источника в приёмники). В ТОПРД каждый волновой код представляется в виде последовательного действия конволюционного оператора прохождения и поверхностного физически реализуемого композитного интегрального оператора распространения-дифрагирования на волновую функцию. В МНКВ дискретным аналогом операторов прохождения и операторов распространения-дифрагирования являются квадратные плотные крупноразмерные матрицы. Таким образом, чтобы вычислить волновое поле, в соответствии с некоторым волновым кодом, достаточно произвести последовательное произведение матриц на векторы. Данное свойство алгоритма МНКВ обуславливает выбор в пользу вычислений на GPUs, ключевой особенностью которых является эффективное выполнение больших массивов несложных операций в параллельном режиме, что может дать существенный прирост производительности программного комплекса МНКВ, использующего матрично-векторную технологию. Такими операциям, в соответствии с алгоритмом МНКВ, являются: 1) заполнение матрицы по аналитическим формулам, 2) умножение матрицы на вектор.

На рис. 2 показана предложенная схема реализации процедуры перемножения  $K$  матриц распространения-дифрагирования на  $K$  векторов волнового поля для GPU-кластера.



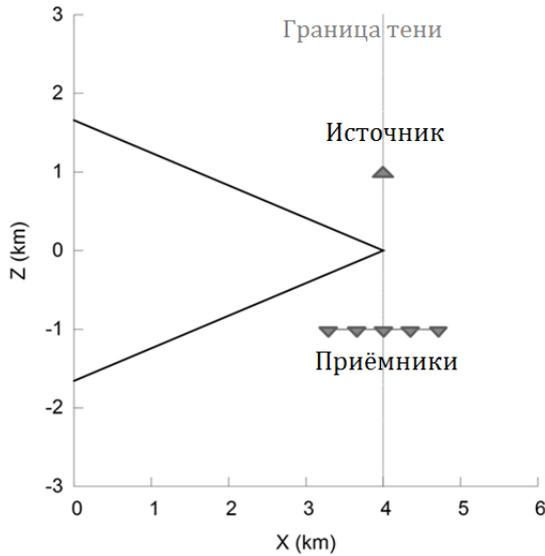
**Рисунок 2.** Схема реализации процедуры распространения-дифрагирования волнового поля программного комплекса МНКВ для GPU-кластера.

## Полученные результаты

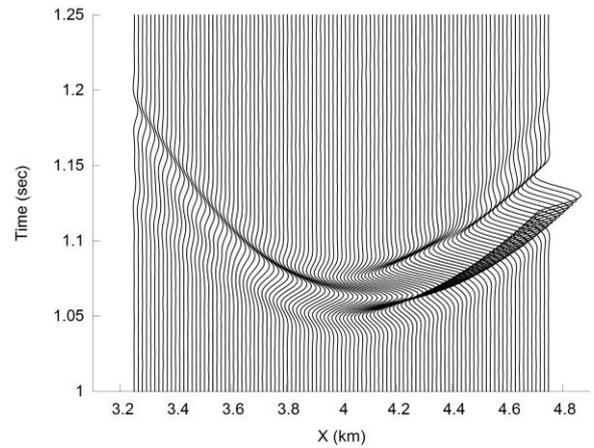
- 1) Произведена реализация и оптимизация программного комплекса МНКВ для случая акустических сред:
  - а. численно реализованы аналитические формулы, описывающие каскадную дифракцию внутри слоёв,
  - б. разработаны и численно реализованы оптимизационные алгоритмы, ускоряющие вычисления программного комплекса МНКВ приблизительно в сто раз (по сравнению с исходным прототипом 2011 года), а также, позволяющие запускать этот комплекс при любом имеющемся в свободном доступе объёме оперативной памяти ЭВМ,
  - с. произведена адаптация программного комплекса МНКВ на кластер из графических ускорителей, позволившая ускорить вычисление алгоритма в тысячи и более раз (в зависимости от числа используемых графических ускорителей) по сравнению с неадаптированной версией.
- 2) Произведена алгоритмическая и численная реализация процедуры построения семейства зон виртуальной тени на границах слоя. Достигнуты приемлемые объёмы памяти, требуемые для хранения матрицы виртуальной тени. Произведена оптимизация алгоритма и его адаптация для кластера из графических ускорителей и достигнуто увеличение производительности процедуры в сто и более раз (в зависимости от числа используемых графических ускорителей).
- 3) Проверена точность, стабильность и эффективность программного комплекса МНКВ численными примерами для моделей акустической среды со сложными границами:
  - а. огибание волновым полем клиновидной границы,
  - б. огибание волновым полем параболической границы,
  - с. огибание волновым полем гиперболической границы,

- d. огибание волновым полем 2-клинной границы,
- e. огибание волновым полем 2-параболической границы,
- f. преломление волнового поля через клиновидную и параболическую границы,
- g. преломление волнового поля через 2-клинную границу,
- h. волновое поле под ангидритовой прослойкой.

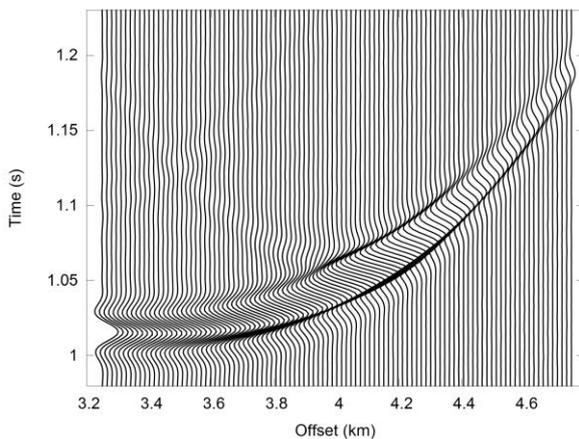
Иллюстрации, визуализация результатов



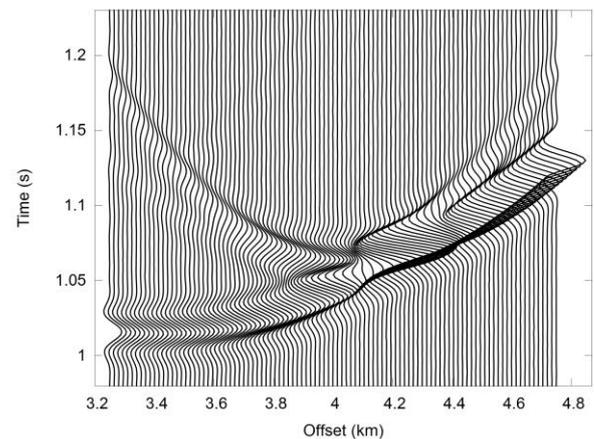
**Рисунок 3.** Клиновидная граница.



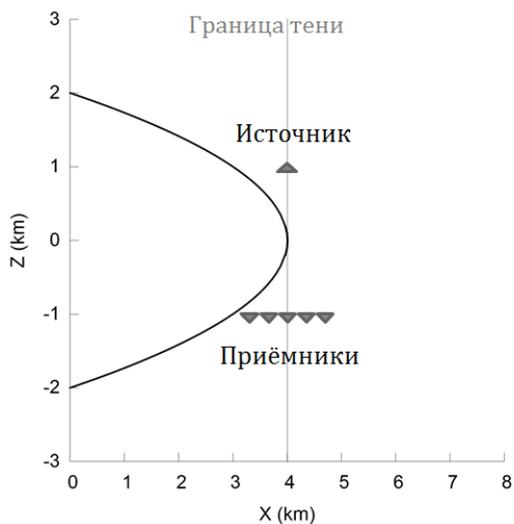
**Рисунок 4.** Волновое поле в приёмниках – огибание клиновидной границы.



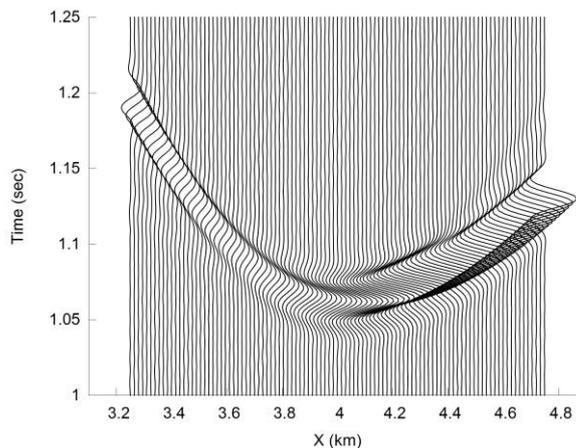
**Рисунок 5.** Волновое поле в приёмниках – преломление через клиновидную границу.



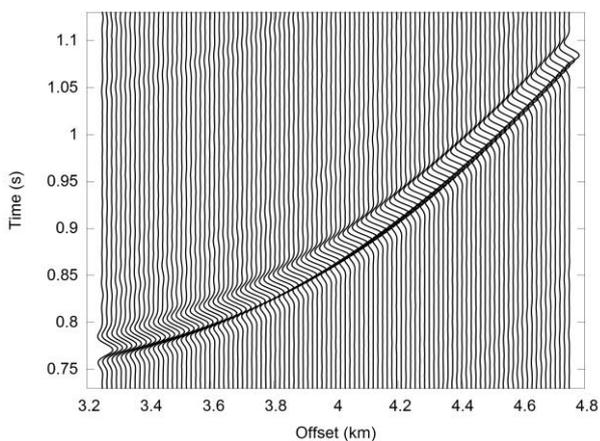
**Рисунок 6.** Волновое поле в приёмниках – преломление и огибание клиновидной границы.



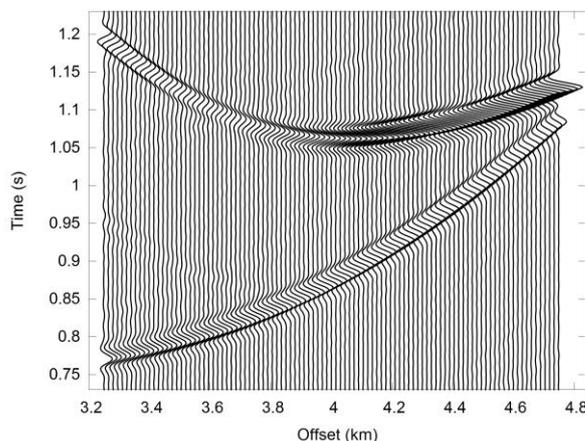
**Рисунок 7.** Параболическая граница.



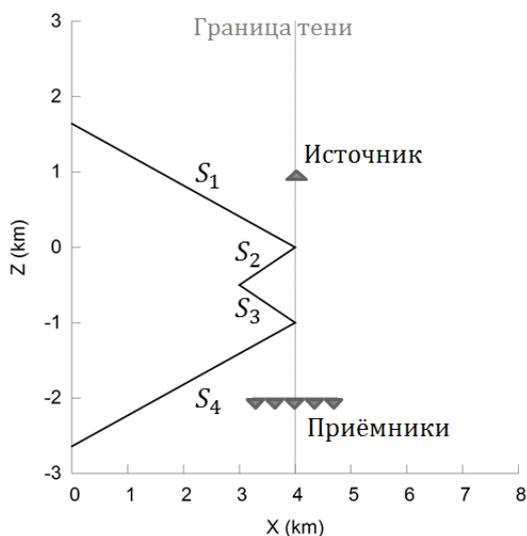
**Рисунок 8.** Волновое поле в приёмниках – огибание параболической границы.



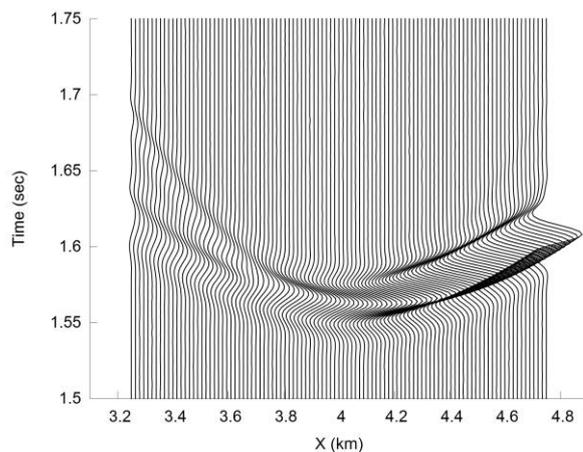
**Рисунок 9.** Волновое поле в приёмниках – преломление через параболическую границу.



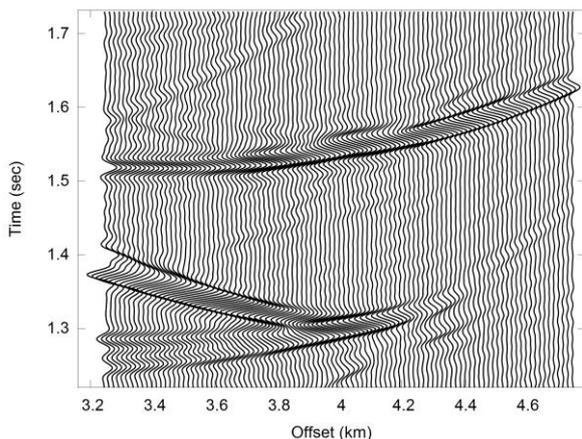
**Рисунок 10.** Волновое поле в приёмниках – преломление и огибание параболической границы.



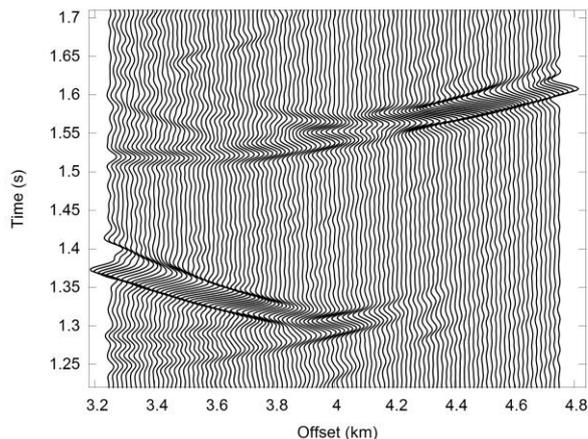
**Рисунок 11.** 2-клинная граница.



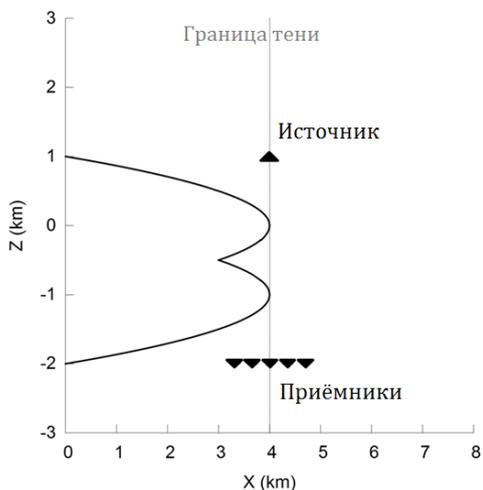
**Рисунок 12.** Волновое поле в приёмниках – огибание 2-клинной границы.



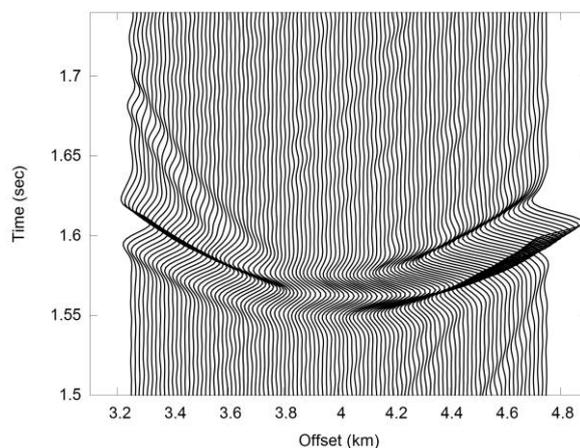
**Рисунок 13.** Волновое поле в приёмниках – преломление через 2-клинную границу.



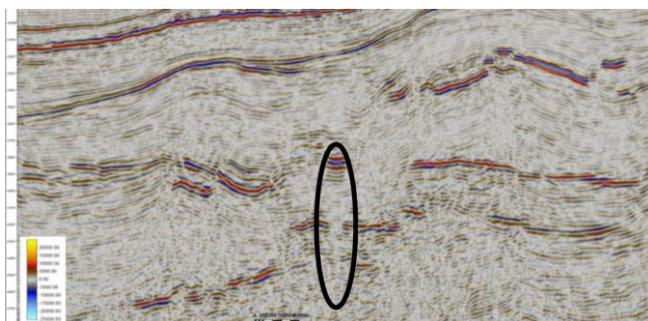
**Рисунок 14.** Волновое поле в приёмниках – преломление и огибание 2-клинной границы.



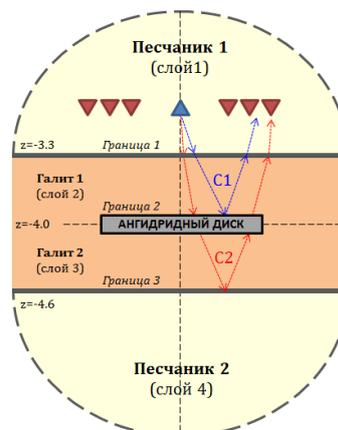
**Рисунок 15.** 2-параболическая граница.



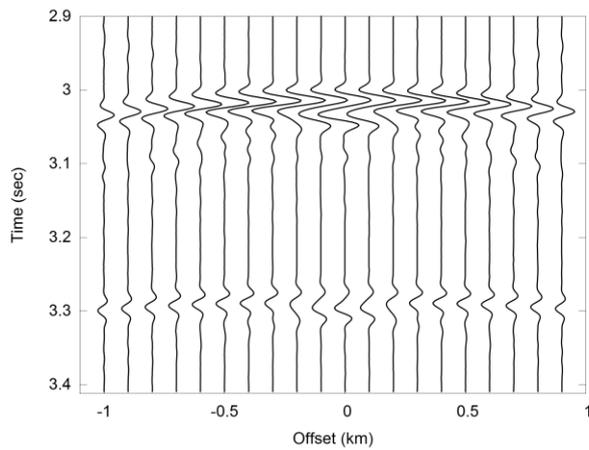
**Рисунок 16.** Волновое поле в приёмниках – огибание 2-параболической границы.



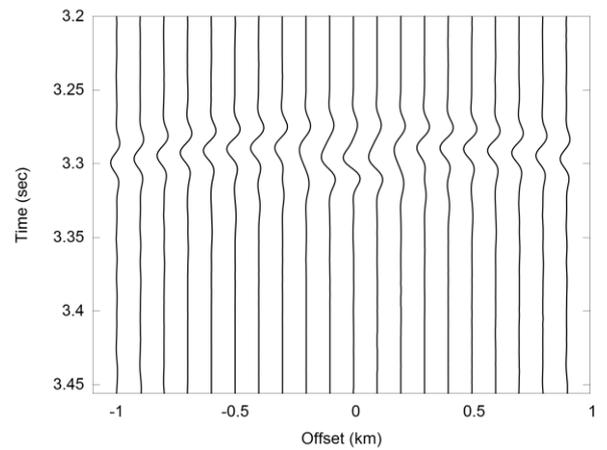
**Рисунок 17.** Зона ослабления сигнала (оконтурено эллипсом) под ангидритовой прослойкой (Норвежское море).



**Рисунок 18.** Схема модели ангидритового диска (прослойки) внутри слоя галита.



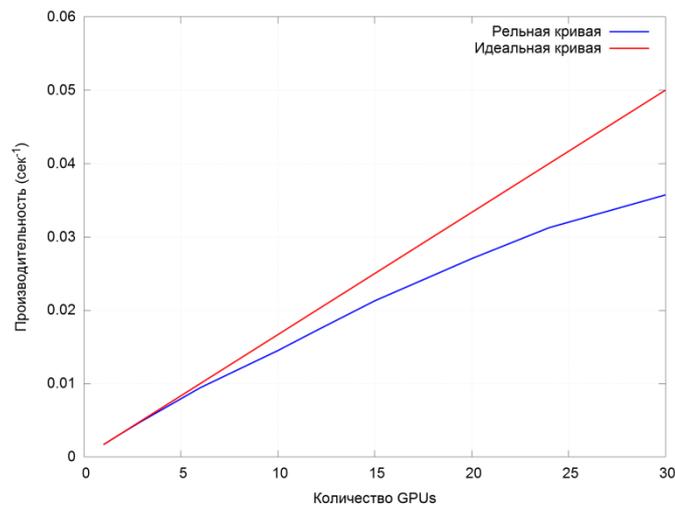
**Рисунок 19.** Волны с кодами С1 и С2.



**Рисунок 20.** Волна с кодом С2.

Эффект от использования кластера в достижении целей работы

На рис. 21 показан график зависимости производительности программного комплекса МНКВ от числа задействованных GPUs в сравнении с идеальным случаем (линейная масштабируемость).



**Рисунок 21.** График масштабируемости программного комплекса МНКВ при его реализации для GPU-кластера.

В таблице 1 показано время исполнения процедуры распространения-дифрагирования волнового поля от одной границы акустического слоя до другой (реальный и идеальный случаи) в зависимости от числа задействованных GPUs для случая перемножения  $K$  матриц распространения-дифрагирования размерности  $N \times N$  на  $K$  векторов волнового поля размерности  $N$ , где  $N = 112000$  и  $K = 128$ .

**Таблица 1.** Анализ масштабируемости процедуры распространения-дифрагирования волнового поля программного комплекса МНКВ.

Количество задействованных GPU	Время работы программы (сек)	Ожидаемое время работы программы в идеальном случае (сек)
1	600.00	600.00
2	302.00	300.00
3	204.00	200.00
6	106.00	100.00
10	69.00	60.00
12	58.00	50.00
15	47.00	40.00
20	37.00	30.00
24	32.00	25.00
30	28.00	20.00

При использовании 30 GPU's время исполнения процедуры стало составлять 28 секунд, вместо 27 часов первоначальной последовательной версии. Получено ускорение процедуры в 3471 раз. Важное свойство алгоритма состоит в том, что он способен захватить любое доступное количество GPU's меньше числа  $N$  – количества треугольников дискретизованной границы. В алгоритме МНКВ число  $N$  имеет порядок  $10^5 - 10^6$ . Это значит, что приложение способно максимально и эффективно (ввиду достаточно высокой масштабируемости) использовать доступные ресурсы GPU-кластера.

Перечень публикаций, содержащих результаты работы

1. Н.Ю. Зятков, А.А. Айзенберг, А.М. Айзенберг. Высокооптимизированная реализация процедуры распространения волнового поля в трёхмерных геологических средах с адаптацией для GPU-кластера. Вестник НГУ Серия: Информационные технологии, Том 14, Выпуск №2 (2016), с. 38-51. **(ИФ РИНЦ 0.266)**
2. Н.Ю. Зятков, А.А. Айзенберг. Высокооптимизированная реализация вычисления матрицы тени для моделирования каскадной дифракции в геологических слоях. Вестник НГУ Серия: Информационные технологии, Том 14, Выпуск №2 (2016), с. 17-37. **(ИФ РИНЦ 0.266)**
3. Свидетельство № 2015662020. Высокооптимизированный программный комплекс МНКВ для дифракционного моделирования // Зятков Н.Ю., Айзенберг А.А., Айзенберг А.М.; Федеральная служба по интеллектуальной собственности РФ (Роспатент) – заявка № 2015617805, дата поступления 25 августа 2015 г, зарегистрирована 16 ноября 2015.
4. Zyatkov N., Romanenko A., Ayzenberg A.A., Aizenberg A.M., and Andersson F. Modeling of seismic waves in layers with shadow boundaries in terms of unsparse propagation-absorption matrices: realization and optimization. The Join International Conference on Human-Centered Computer Environments, March 8-13, 2012, Aizu-Wakamatsu & Hamamatsu, Japan, pp. 101-105.

5. Zyatkov N., Ayzenberg A., Aizenberg A.M., Romanenko A., and Andersson F. Modeling of cascade diffraction in terms of unsparse propagation-absorption matrices – realization and optimization for GPU. Extended Abstracts, 74th EAGE Conference and Exhibition, Copenhagen, Denmark, 4-7 June 2012, P288.
6. Ayzenberg A.A., Aizenberg A.M., Zyatkov N.Y., and Andersson F. Single-diffraction approximation of the feasible Green's function in geometrical shadow zones. Extended Abstracts, 74th EAGE Conference and Exhibition, Copenhagen, Denmark, 4-7 June 2012, P287.
7. Zyatkov N., Ayzenberg A., Aizenberg A.M., and Romanenko A. Highly-optimized TWSM Algorithm for Modeling Cascade Diffraction in Terms of Propagation-absorption Matrices. Extended Abstracts, 75th EAGE Conference and Exhibition, London, England, 10-13 June 2013, Th-P02-11.
8. A. Ayzenberg, N. Zyatkov, A. Stovas, and A.M. Aizenberg. Double-diffraction Approximation of the Feasible Green's Function in Geometrical Shadow Zones. Extended Abstracts, 75th EAGE Conference and Exhibition, London, England, 10-13 June 2013, Th-P02-10.
9. A.A. Ayzenberg, N. Zyatkov, A. Stovas, A.M. Aizenberg. Subsalt Illumination by the Feasible Green's Function of Covering Sediments. EAGE/SPE Workshop on Subsalt Imaging. The Challenges of Subsalt Exploration and Imaging in Deep Water of the Middle East and North Africa. Limassol, Cyprus, 16-19 February 2014, SS09.
10. A.A. Ayzenberg, N.Y. Zyatkov, A. Stovas, A.M. Aizenberg. The Feasible Near-front Wavefield Below Salt Overhang in Terms of Cascade Diffraction. Extended Abstracts, 76th EAGE Conference & Exhibition, Amsterdam, Netherlands, 16-19 June 2014, We P06 06.
11. A.M. Aizenberg, N.Y. Zyatkov, A.A. Ayzenberg, E.Z. Rakshaeva. New concepts of the transmission-propagation operator theory in seismic diffraction modeling and interpretation. Extended Abstracts, 76th EAGE Conference & Exhibition, Amsterdam, Netherlands, 16-19 June 2014, We P06 07.
12. Н.Ю. Зятьков, А.А. Айзенберг, Е.Ж. Ракшаева, А.М. Айзенберг. Прототип высокооптимизированного пакета TWSM для дифракционного моделирования сейсмических волновых полей с адаптацией под GPU-кластер. Журнал «Сибирские электронные математические известия» в «Труды V международной молодежной школы-конференции "Теория и численные методы решения обратных и некорректных задач"», Том 11, с. 35-40 (2014).
13. Ракшаева Е.Ж., Зятьков Н.Ю., Нефедкина Т.В., Айзенберг А.М. 3D моделирование волновых полей, отраженных от криволинейных границ, методом МНКВ с модифицированным коэффициентом отражения. Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2014. X Междунар. науч. конгр., Новосибирск, Россия, 16–18 апреля 2014 г., Т. 3, с. 37-42.
14. N. Zyatkov, A.A. Ayzenberg, K.O. Omosanya, A. Romanenko, A.M. Aizenberg. Evaluation of diffracted wavefields below the salt stringer using the transmission-propagation operator theory and TWSM software package. Proceedings of the 2nd International Conference on Applications in Information Technology (ICAIT-2016), October, 6-8, 2016, University of Aizu, Aizu-Wakamatsu, Japan, p. 21-24.