

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ АНТИКЛИНАЛЬНЫХ СТРУКТУР В ШЕЛЬФОВОЙ ЗОНЕ АРКТИКИ НА СЕЙСМИЧЕСКИЕ ОТКЛИКИ СЕТОЧНО-ХАРАКТЕРИСТИЧЕСКИМ МЕТОДОМ

И.Б. Петров^{1,2}, П.В. Стогний¹, Н.И. Хохлов^{1,2}, Д.И. Петров^{1,2}

1 – Московский физико-технический институт (Государственный университет)

2 – Научно-исследовательский институт системных исследований РАН

e-mail: petrov@mipt.ru

Введение

Для наиболее молодых геологических пород, встречающихся при работе на акваториях, характерно залегание, близкое к горизонтальному [1]. Такое залегание может быть нарушено в связи с различными геологическими процессами, протекающими в регионе работ. Могут измениться как геометрические, так и физические параметры осадочных толщ. Если говорить о характере залегания, то выделяют следующие типы: разрывные и складчатые нарушения. Разрывные нарушения – нарушения, которые привели к разрыву слоев горных пород. Складчатые нарушения – нарушения, после которых слои горных пород изогнуты, но без разрыва сплошности. В данной работе речь пойдет о складчатых нарушениях, точнее, об их отдельных формах, складках. Складка состоит из нескольких частей, но нас интересует только одна, главная – ядро складки, моделирование которой и приведено в данной работе. Выделяются два основных типа складок: синклиальная (в ядре располагаются более молодые породы по сравнению с боковыми частями складки) и антиклиальная (в ядре располагаются древние породы). В данной работе представлены результаты моделирования ядра антиклиальной складки с вертикальной осевой поверхностью. Пример такой складки представлен на рис. 1 (см. приложение).

Часто встречаются ситуации, в которых структурные нарушения служат ловушками углеводородов. Наиболее простым и распространенным примером является антиклиальная ловушка. Антиклиальная ловушка – крупная часть природного резервуара, в которой создаются условия для скопления нефти и газа. Например, Медвежье месторождение, расположенное на севере Западной Сибири, является крупной зоной аккумуляции углеводородов [2].

Данная работа была выполнена для того, чтобы убедиться в применимости схемы Русанова [3] из семейства сеточно-характеристических методов к изучению геологических объектов антиклиальной формы. Ранее, в статье [4], авторы исследовали

применение разрывного метода Галеркина (DGM) [5] на неструктурированных сетках, сеточно-характеристического метода на неструктурированных треугольных сетках (GCM Unstructured) и сеточно-характеристического метода сквозного счета на структурированных сетках (GCM Unstructured) для моделирования антиклинальных структур. Авторами был сделан вывод о пригодности сеточно-характеристического метода (на неструктурированных и структурированных сетках) для моделирования объектов антиклинальной формы. Схема Русанова относится к семейству сеточно-характеристических, поэтому было решено проверить ее применимость для моделирования таких геологических объектов.

В дальнейшем, моделирование объектов антиклинальной формы может значительно уменьшить стоимость проведения буровых работ, так как в настоящий момент лишь 30% из разбуриваемых антиклинальных ловушек оказываются продуктивными [6].

В работе приводятся сейсмограммы, построенные с помощью программы SeiSee, а также сейсмограммы, полученные в результате обработки скоростных данных при помощи ПО RadExPro [7]. Последняя программа развивается с 1992 г. Данная программа хорошо себя зарекомендовала, и многие российские и зарубежные геолого-геофизические компании (например, «Башнефть», «Subsea survey solutions») ее используют.

Основные уравнения для описания модели

При моделировании геологических сред в работе используются уравнения линейной упругости и акустики.

Для описания волн в линейно-упругой среде [8] использовались уравнения:

$$\rho \frac{\partial}{\partial t} v = (\nabla \cdot \sigma)^T$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \sigma = (\rho c_p^2 - 2\rho c_s^2)(\nabla \cdot v)I + \rho c_s^2(\nabla \otimes v + (\nabla \otimes v)^T),$$

где ρ – плотность материала, v – скорость движения, σ – тензор напряжений Коши, I – единичный тензор, c_p, c_s – скорости продольных и поперечных волн, соответственно.

Для численного моделирования распространения волн в морской воде использовалось приближение идеальной жидкости. Решалась полная система уравнений, описывающая акустическое поле [9]:

$$\rho \frac{\partial}{\partial t} v = -\nabla p$$

$$\frac{\partial}{\partial t} p = -\rho c^2 (\nabla \cdot v),$$

где p – давление, c – скорость звука в идеальной жидкости.

На нижней и боковых границах расчетной области устанавливалось условие поглощения (неотражающее граничное условие) [10], на верхней – свободная граница. Между линейно-упругой и акустической средой (см. вышеприведенные системы уравнений) было установлено контактное условие свободного скольжения [11]. Для описания поведения жидкости использовалось смешанное граничное условие с заданной нормальной компонентой скорости и тангенциальной составляющей полной плотности поверхностных сил [12]. Для твердого тела применялось граничное условие с заданной скоростью границы.

Описание модели

В настоящее время основным геофизическим методом, используемым в ходе геологоразведочных работ на акваториях, служит сейсморазведка. В частности, одной из самых распространенных методик проведения съемки является многоканальное непрерывное сейсмическое профилирование (МНСП) [13]. Данная методика подразумевает, что приемно-излучающая система транспортируется в водной толще за бортом судна. При изучении основных геологических структур и поиске месторождений углеводородов в качестве источников применяют пневмопушки, обеспечивающие достаточно высокие энергии и длины волн, а в качестве приемников – сейсмические кося. Возбуждение сейсмического сигнала происходит с определенным временным интервалом, который зависит от методики выполнения и геологических условий работ. Дальнейшая обработка данных зачастую производится методом общей срединной точки (ОСТ) [13].

В данной работе моделируются данные, полученные методикой МНСП. Заглубление приемно-излучающей системы было выбрано равным 2 м, исходя из условий оптимального заглубления. Источник и приемники располагались последовательно по ходу движения судна вдоль профиля. Количество источников – 1; количество приемных каналов – 80. Расстояние между источником и первым приемным каналом составляло 3 м, шаг между каналами – тоже 3 м. Длина профиля – 100 м, шаг между возбуждениями – 3 м. Таким образом, были получены 34 сейсмограммы общего пункта возбуждения (ОПВ). Схематичное изображение приемно-излучающей системы для нескольких возбуждений представлено на рис. 2. Треугольником белого цвета обозначен источник сигнала,

перевернутыми треугольниками серого цвета – приемники сигнала, перевернутым полукругом – изучаемый геологический объект.

В данной работе приводятся результаты моделирования волновых процессов в геологической среде для двумерного случая. В рамках данного исследования стояла задача изучения антиклинальной структуры. Она была аппроксимирована полукругом, обрезанным снизу. Расчет волнового поля производился для двухслойной геологической модели, во втором слое которой присутствовала неоднородность в форме полукруга. Первый слой – вода, глубина – 60 м, плотность – 1000 кг/м^3 , скорость продольных волн – 1500 м/с. Второй слой – осадочные породы, толщина – 85 м, плотность – 1700 кг/м^3 , скорость продольных волн – 1700 м/с, скорость поперечных волн – 350 м/с. Неоднородность располагалась на расстоянии 5 м от верхней границы слоя осадочных пород, радиус неоднородности – 15 м, плотность – 2800 кг/м^3 , скорость продольных волн – 2800 м/с, скорость поперечных волн – 1900 м/с. Ширина области интегрирования составляла 600 м. Схематичное изображение расчетной геологической модели среды представлено на рис. 3.

Воздействие осуществлялось с помощью импульса Рикера. Импульс имел центральную частоту 150 Гц. Амплитудный спектр прямой волны представлен на рис. 4. Импульс обладал высокой стабильностью, что видно из сейсмограммы, изображенной слева на рис. 4. На сейсмограмме по оси y показано время в секундах (сейсмограммы записывались в течение 0,2 с), по оси x – параметры приемников: CHAN – порядковый номер трассы в сейсмограмме, FFID – номер сейсмограммы.

Шаг по времени для записи сейсмограмм приемниками составлял 10^{-4} сек. Всего было выполнено 2000 шагов по времени.

Результаты расчетов

Волновые картины в различные моменты времени для 1-го статического случая расстановки системы источник–приемники (рис. 2, а) представлены на рис. 5. На рис. 5, б видны четкие волновые отклики от слоя осадочных пород, на рис. 5, в и 5, г – отражения от неоднородности, где форма неоднородности по отражениям хорошо просматривается.

Приемники записывали скоростные данные от различных отраженных волн, выходящих первоначально от источника. По этим скоростным данным строились сейсмограммы в программе SeiSee. Пример такой сейсмограммы, полученной по скоростным данным от всех приемников (расчет 1-го статического случая положения

системы источник–приемники), изображен на рис. 6. По оси y показано время в секундах (сейсмограммы записывались в течение 0,2 с). По оси x отложены номера сейсмотрасс (всего их было 80 – по одной от каждого приемника). Отчетливо видны волновые отклики от различных слоев: воды, слоя осадочных пород, неоднородности.

По сейсмограмме (см. рис. 6) сложно понять, где точно расположена неоднородность – есть лишь предположение, что где-то в правой нижней части расчетной области. Для получения более точной картины истинного расположения неоднородности все сейсмограммы обрабатывались с помощью ПО RadExPro. Обработка сейсмограмм производилась стандартным графом метода общей срединной точки (ОСТ). В ходе контроля качества были выведены сейсмограммы общих удалений (ОУ), которые можно увидеть на рис. 7. На рисунке приведены сейсмограммы с шагом в 10 каналов (записи приемников, всего их было 80 – по одной для каждого статического случая).

На данном этапе уже видно, что существует некое водное полупространство, затем его сменяют некие донные породы, в которых находится полусферический объект. Объект не выделяется явно в связи с 3D неоднородностями. При решении обратной задачи сейсморазведки возможно применение миграционных преобразований для восстановления точной геометрии подобных объектов, но это выходит за рамки поставленной задачи.

Для построения сейсмограмм ОСТ необходимо рассчитать координаты точек удаления для всех каналов и произвести бинирование [14]. Бин выбирался таким образом, чтобы обеспечить кратность не менее 20 трасс. Пример сейсмограммы ОСТ изображен на рис. 8. По оси y отложено время записи сейсмотрассы в секундах, по оси x – параметры приемников: CDP – номер сейсмограммы общеглубинной точки, OFFSET – расстояние от источника до данного приемника.

Для того, чтобы получить разрез нулевых удалений, необходимо синфазно просуммировать отраженные от дна волны. Для этого нужно знать скоростной закон в изучаемой среде. Для его получения в каждой точке ОСТ производится оценка скоростной функции $V(x, t)$, а затем происходит интерполяция и построение скоростного закона для всего профиля.

После того, как скоростной закон был получен, вводились кинематические поправки. В первом случае параметр мьютинга (удаления шума путем обнуления данных в заданной области) был равен 0, во втором – 7. На рис. 9 представлены сейсмограммы до

и после ввода кинематических поправок, а также сейсмограммы с нулевым и ненулевым мьютингом (описание данных сейсмограмм совпадает с описанием, приведенным для рис. 8).

Результирующие сейсмические изображения позволяют достаточно четко наблюдать форму и примерное положение объекта. При нулевом мьютинге (см. рис. 9, в) волновая картина выглядит менее четко из-за растяжения импульса. Но в связи с тем, как была задана модель и геометрия наблюдений, мьютингу подвергается и прямая волна на части профиля.

Кроме этого, выбранный граф обработки использует только 2D-данные, при более глубокой обработке и использовании всех данных возможно проведение 3D-миграции для того, чтобы «собрать» все переотражения и максимально точно восстановить геометрию границ поддонного тела.

Выводы

В данной работе приведены результаты численного моделирования ядра антиклинальной складки с вертикальной осевой поверхностью. Численное моделирование проводилось на основе данных, полученных методикой многоканального непрерывного сейсмического профилирования (МНСП) [13]. Для выполнения расчетов использовалась схема Русанова 3-го порядка точности из семейства сеточно-характеристических.

Был построен амплитудный спектр прямой волны и проанализирован сам импульс. Приведены волновые картины отражений от антиклинальной структуры, а также проиллюстрирована сейсмограмма общего пункта возбуждения (ОПВ) для одного из выстрелов.

Приведены результаты обработки сейсмограмм с помощью ПО RadExPro с применением различных модулей и поправок.

Полученные сейсмограммы подтверждают применимость схемы Русанова для моделирования структур антиклинальной формы. Неоднородность имеет четкие контуры для сравнительно непростой задачи – двумерного случая моделирования. В дальнейшем, для восстановления более точной геометрии поддонного тела, планируется проводить трехмерное моделирование антиклинальных складок с применением схемы Русанова.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта 16-29-02018 «код офи_м».

ЛИТЕРАТУРА

1. *Короновский Н.В., Якушева А.Ф.* Основы геологии. М.: Высш. шк., 1991. 416 с.
2. *Конторович В.А., Конторович Д.В., Сурикова Е.С.* История формирования крупных антиклинальных структур – ловушек для уникальных газовых залежей на севере Западной Сибири (на примере Медвежьего месторождения) // Геология и геофизика. 2014. Т. 55, № 5–6. С. 862–873.
3. *Русанов В.В.* Разностные схемы третьего порядка точности для сквозного расчета разрывных решений // Докл. АН СССР. 1968. Т. 180, № 6. С. 1303–1305.
4. *Бирюков В.А., Миряха В.А., Петров И.Б., Хохлов Н.И.* Моделирование распространения упругих волн в геологической среде: сравнение результатов трех численных методов // Ж-л вычисл. матем. и матем. физ. 2016. Т. 56, № 6. С. 1104–1114.
5. *Hesthaven J.S., Warburton T.* Nodal discontinuous Galerkin methods: algorithms, analysis, and applications. // Texts in Applied Mathematics. 2008. Vol. 54. 502 с.
6. *Муравьев В.В., Кондратов Л.С.* Информационная эффективность комплекса тектодинамических и геохимических критериев минеральной перспективности геосреды // Системы и средства информатики. 2008. Спецвыпуск «Геоинформационные технологии». С. 250–264.
7. *Гайнанов В.Г.* Программный комплекс для обработки данных сейсмоакустического профилирования // Океанология. 2010. Т. 50, № 1. С. 142–150.
8. *LeVeque R.* Finite volume methods for hyperbolic problems. Cambridge University Press, 2002. 558 p.
9. *Landau L.D., Lifshitz E.M.* Fluid Mechanics (Volume 6 of A Course of Theoretical Physics). Pergamon Press, 1959. 536 p.
10. *Favorskaya A.V., Petrov I.B., Sannikov A.V., Kvasov I.E.* Grid Characteristic Method Using High Order Interpolation on Tetrahedral Hierarchical Meshes with a Multiple Time Step // Mathematical Models and Computer Simulations. 2013. Vol. 5, No. 5. P. 409–415.
11. *Фаворская А.В., Петров Д.И., Хохлов Н.И., Петров И.Б.* Численное решение упругоакустических задач с помощью сеточно-характеристического метода // Вестник Балтийского федерального ун-та им. И. Канта. Серия: Физ.-матем. и технич. науки. 2015. № 10. С. 7–12.

12. Григорьевых Д.П., Хохлов Н.И., Петров И.Б. Математическое моделирование трещин в твердых деформируемых телах с использованием гексаэдральных сеток // Труды МФТИ. 2015. Т. 7, № 4. С. 28–37.

13. Хаттон Л. Обработка сейсмических данных. Теория и практика. Перевод с англ. А.Л. Малкина. М.: Мир, 1989. 214 с.

14. Степанов А.В. Полевой этап получения сейсмических данных: Уч.-метод. пособие к курсам повышения квалификации «Петрофизика и геофизика в нефтяной геологии». Казань: Казанский ун-т, 2013. 35 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ

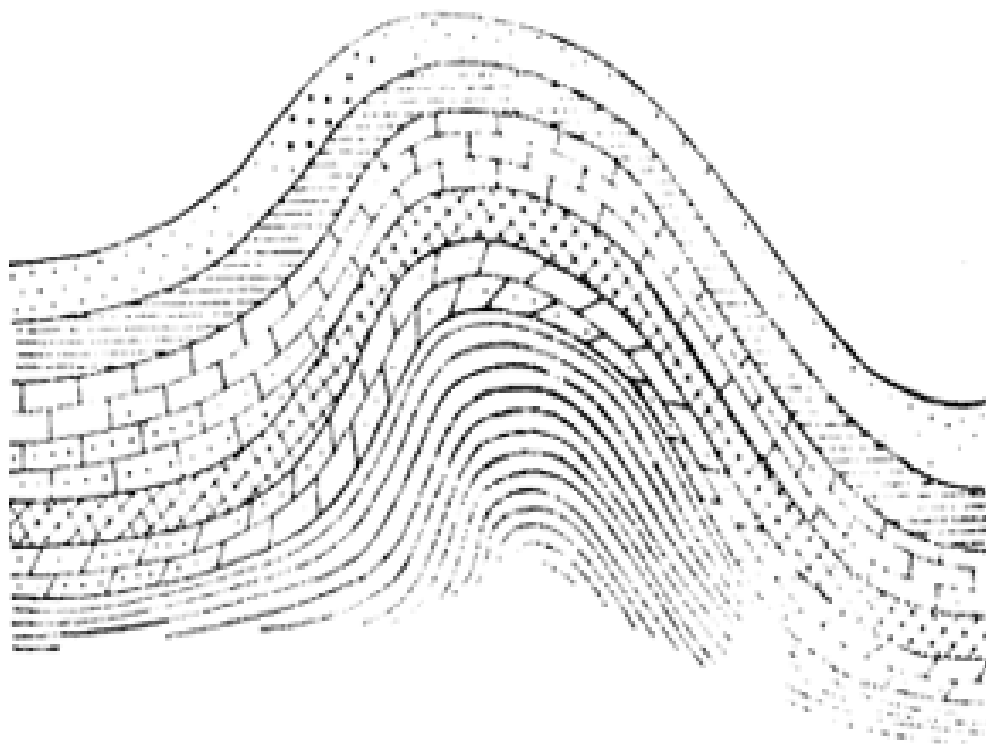
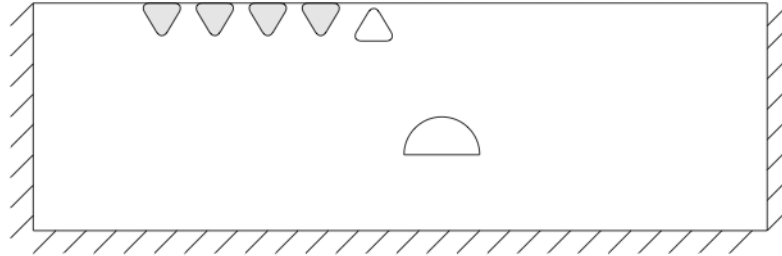
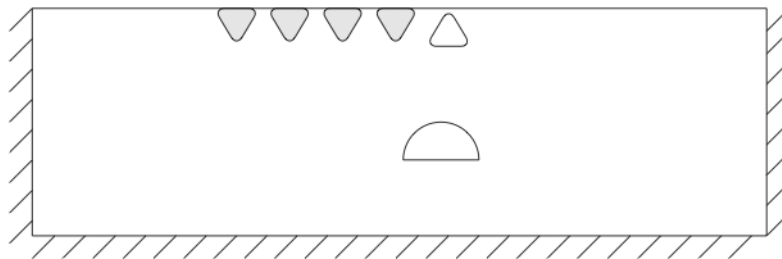


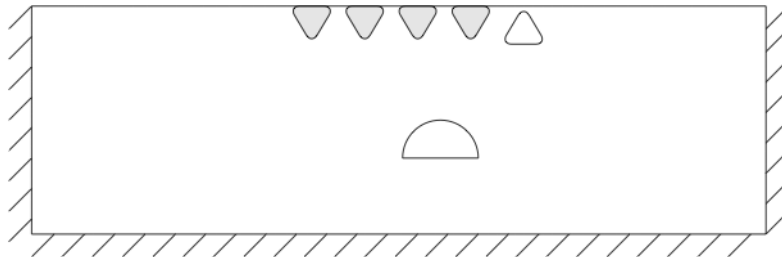
Рис. 1. Антиклинальная складка



а) Положение приемно-излучающей системы относительно изучаемого геологического объекта при 1-ом возбуждении сигнала



б) Положение приемно-излучающей системы относительно изучаемого геологического объекта при 15-ом возбуждении сигнала



в) Положение приемно-излучающей системы относительно изучаемого геологического объекта при 30-ом возбуждении сигнала

Рис. 2. Различные положения приемно-излучающей системы относительно изучаемого геологического объекта



Рис. 3. Геологическая модель среды

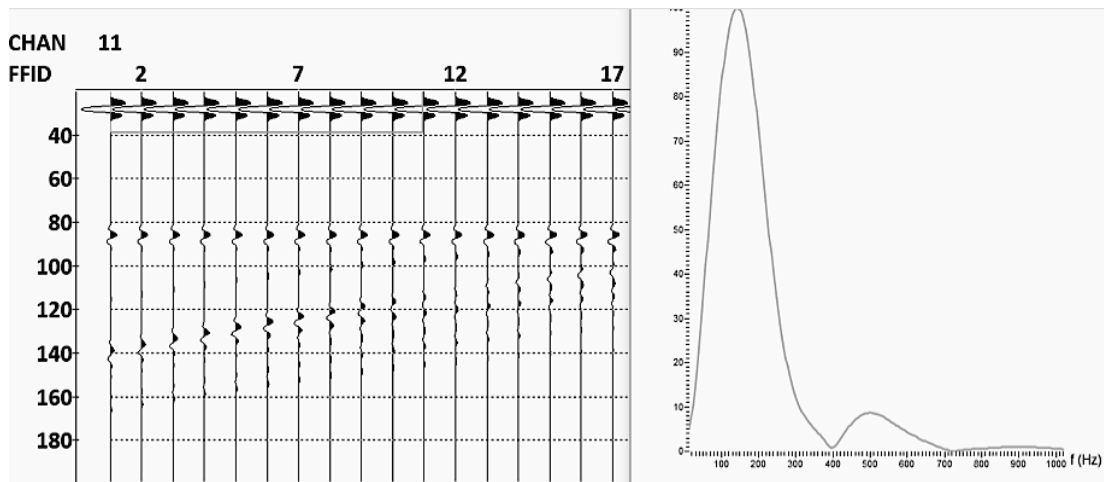
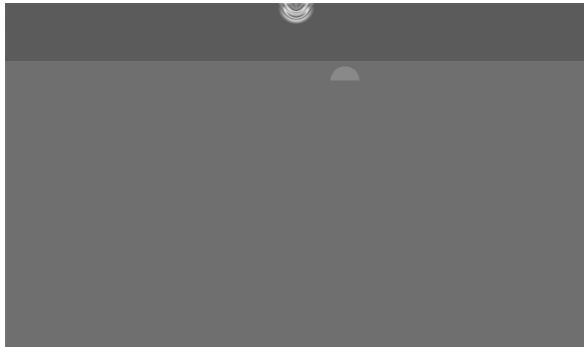


Рис. 4. Амплитудный спектр прямой волны с центральной частотой 150 Гц



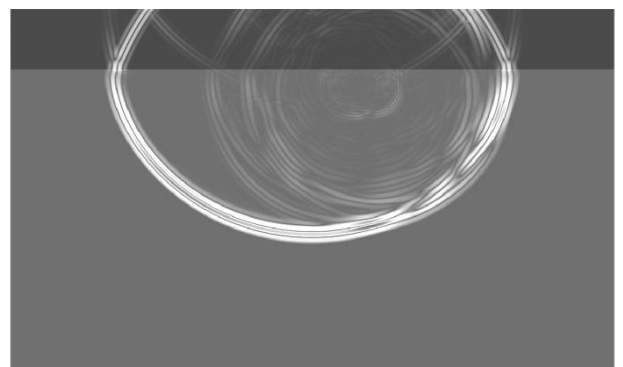
а) волна в момент времени 0,014 с,
в слоях: вода



б) волна в момент времени 0,05 с,
в слоях: вода



в) волна в момент времени 0.08 с,
в слоях вода, слой осадочных пород



г) волна в момент времени 0.14 с,
в слоях: вода, слой осадочных пород

Рис. 5. Волновые картины для модели в различные моменты времени

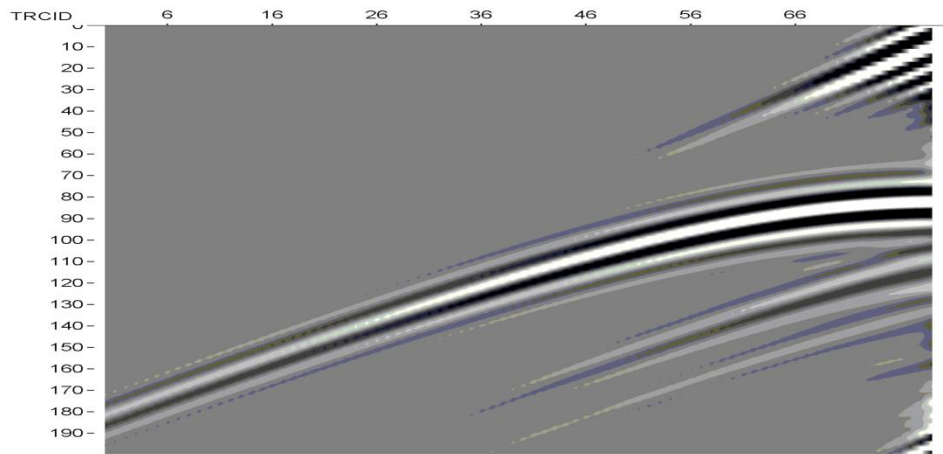


Рис. 6. Сейсмограмма общего пункта возбуждения (ОПВ), полученная для одного из выстрелов

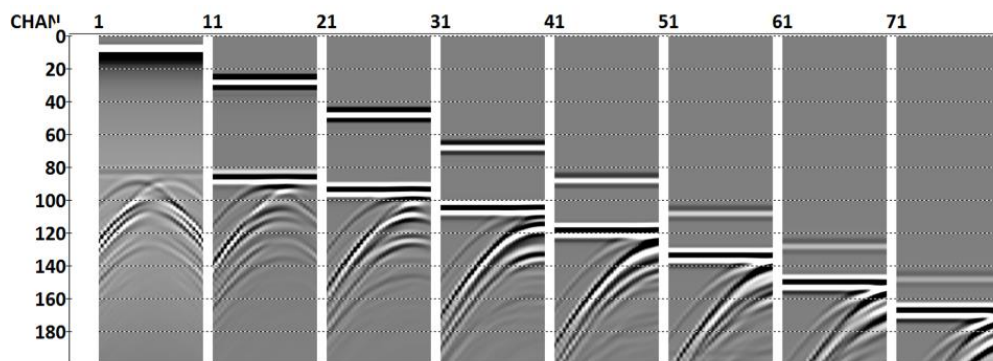


Рис. 7. Сейсмограммы ОУ, приведенные с шагом в 10 каналов

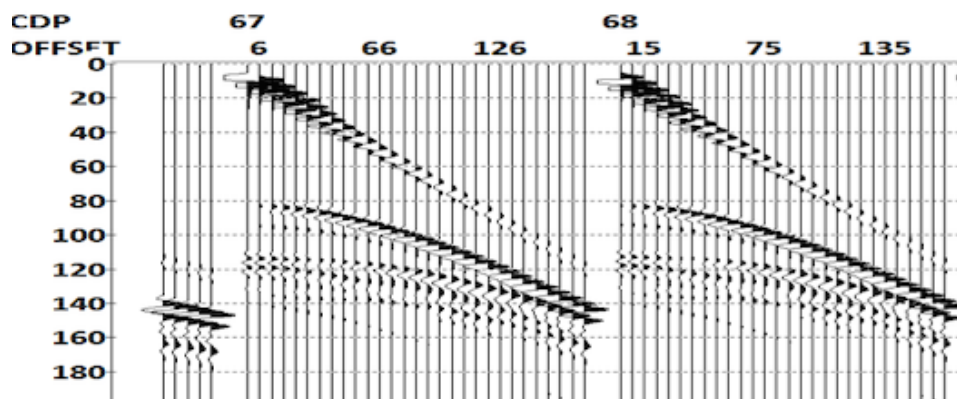
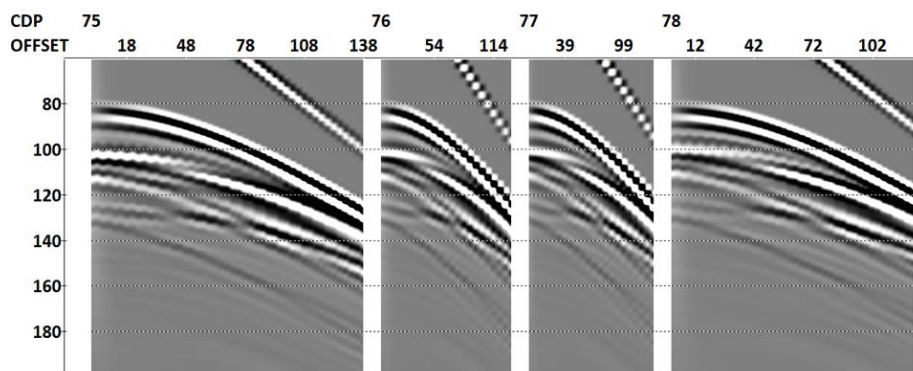
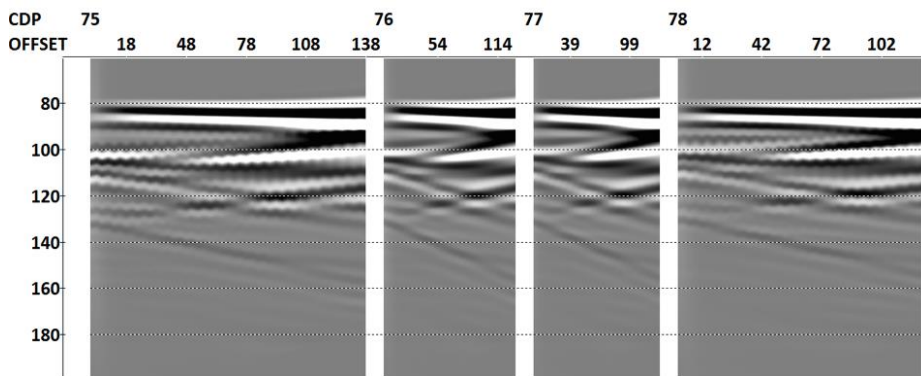


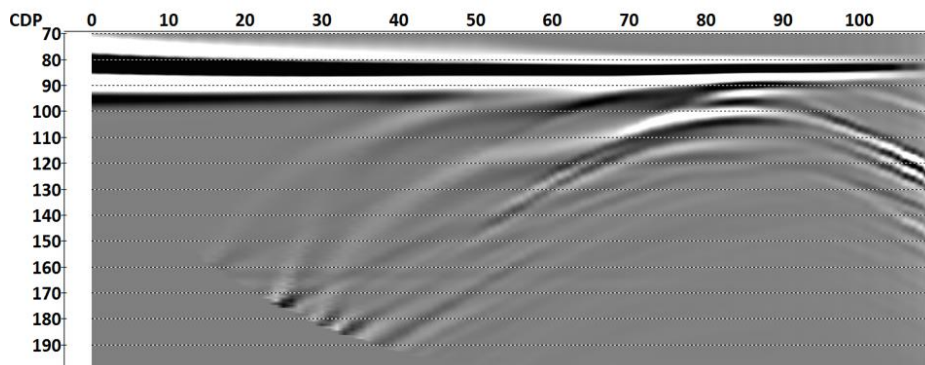
Рис. 8. Пример сейсмограмм ОСТ



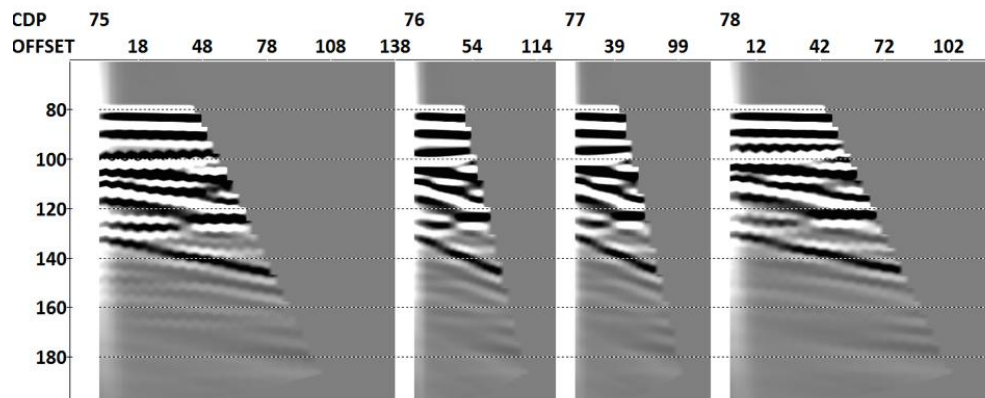
а) Сейсмограммы до ввода кинематических поправок



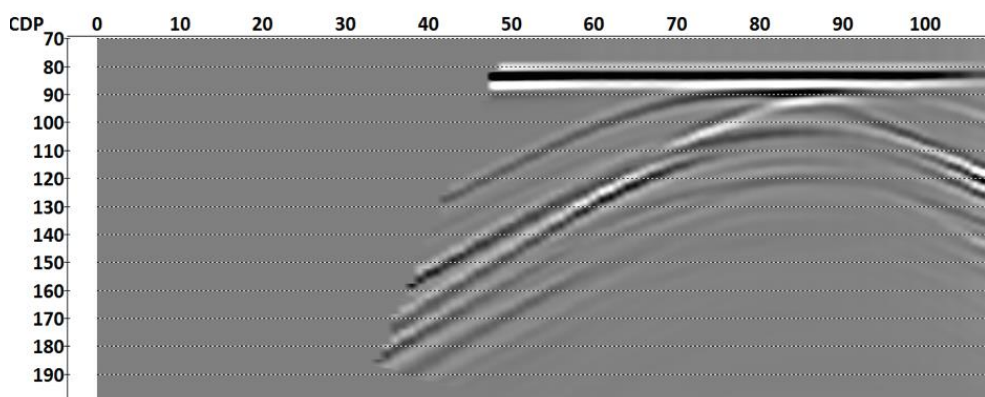
б) Сейсмограммы после ввода кинематических поправок без мьютинга



в) Результат суммирования по ОСТ после ввода кинематических поправок без мьютинга



г) Сейсмограммы после ввода кинематических поправок с ненулевым мьютингом



д) Разрез нулевых удалений, полученных после суммирования сейсмограмм с введенным мьютингом

Рис. 9. Сейсмограммы с вводом различных поправок