

Россия

## Детальная скоростная структура соляных куполов в Прикаспийской впадине по данным преломленных волн

### Detailed velocity structure of salt domes in Pricaspian basin from refraction data

Валентина Пийп, Надежда Заможняя и Арсен Сулейманов (Valentina B. Piip, Nadezhda G. Zamozhnyaya, and Arsen K. Suleymanov) продемонстрировали, что данные МПВ дают преимущества при построении изображения соляных куполов.

Здесь представлен новый подход к интерпретации данных преломленных волн. Первые вступления преломленных волн, полученные при глубинных исследованиях методом ОГТ в Прикаспийской впадине, с длинными удалениями источник-приемник, были обращены методом однородных функций. Мы получили не только скоростное отображение соляных куполов, но и внутреннюю структуру куполов, включая строение ниже выступов соли на бортовых частях куполов, а также разломные блоки. Независимо полученные общепринятыми методами и с использованием только отраженных волн разрезы ОГТ хорошо совпадают с более детальными изображениями куполов по данным преломленных волн.

Многие месторождения углеводородов, открытых в Прикаспийском бассейне, связаны с соляными куполами. Для исследования соляных куполов обычно применяется метод отраженных волн – метод ОГТ. В России метод 2D ОГТ был использован с целью изучения структуры коры и мантии в крупном исследовательском проекте. Профиль 1-ЕВ проходит через Европейскую часть России от Мурманска на севере к Каспийскому морю на юге через Прикаспийскую впадину. Сейсмические работы выполняются компанией Спецгеофизика (Москва). Эти работы выполнены с длиной годографа до 10 км, 100-кратными перекрытиями и расстояниями 50 м между приемниками и 100 м между источниками.

Обычно при работах ОГТ регистрируется огромный объем первых вступлений преломленных волн. Однако эти данные не обрабатываются и не используются в полном объеме. Интерпретация данных преломленных волн встречает следующие трудности. Методы томографии, которые могут быть использованы для такой плотной системы наблюдений, обычно дают очень сглаженный результирующий разрез без каких-либо сейсмических границ. Вдобавок эти методы требуют начальной модели, которая обычно получается с использованием методов для слоистой среды или с помощью одномерной инверсии, и окончательный разрез зависит от начальной модели. Другие методы обращения не являются автоматическими и, следовательно, не могут быть использованы эффективно.

В Прикаспийском бассейне, по данным преломленных волн, зарегистрированных при работах ОГТ, мы получили детальный скоростной разрез, в котором отразились расположение, форма, и скоростное строение соляных куполов, включая структуры ниже выступов соли и разломные блоки. Для инверсии был использован метод однородных функций.

#### Геология

К югу от Волгограда профиль 1 ЕВ пересекает область развития соляных структур различной формы и амплитуды, соединенных в цепи. Соляные отложения имеют

преимущественно Кунгурский возраст. Вмещающие соль отложения состоят из терригенных осадков верхнепермского, триасового, юрского, мелового, палеогенового и неогенового возраста (Рисунок 1).

#### Данные

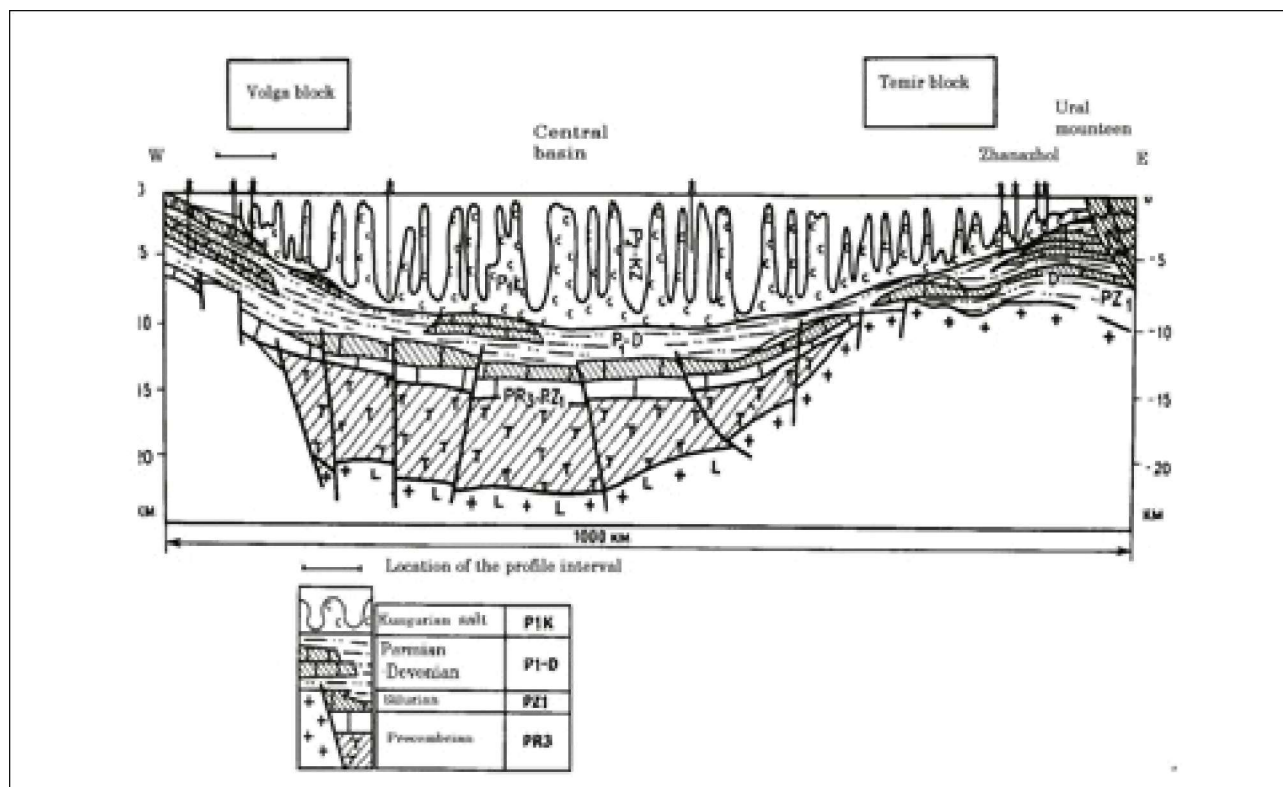
Обработка данных ОГТ для исследованного интервала профиля проводилась общепринятыми методами. Скоростной анализ включал построение вертикальных и горизонтальных скоростных спектров. Окончательный разрез показан на Рисунке 3d.

В интервале 1-140 км профиля были отпикированы очень детальные времена первых вступлений. Для инверсии методом однородных функций были использованы времена для расстояний 0.1 км между приемниками и 1 км между источниками. На рис 2 показаны годографы на интервале профиля 75 - 120 км, использованные для обращения.

#### Модель и метод инверсии

Метод однородных функций автоматически обращает времена первых вступлений преломленных волн в двухмерное скоростное распределение, которое включает в себя границы раздела (Пийп 1991, Piip, 2001). Эта техника и связанный с нею пакет программ ГОДОГРАФ разработаны в России. Имеется значительный опыт в применении этой техники при глубинных исследованиях ГСЗ и при инженерных исследованиях (Piip and Efimova, 1996; Piip et al 2006).

Геологические среды очень сложны. Это заставляет нас использовать подходящие модели для аппроксимации сейсмических сред. Определяющей чертой геологических разрезов является подобие геологических границ. Чтобы это понять, достаточно вспомнить синклинальные, антиклинальные и другие складки. Изолинии скорости однородной функции 2-х координат – это кривые друг другу, но форма их может быть произвольной. Однородные функции двух координат не имеют ограничений в отношении величин горизонтального и вертикального градиентов скорости и могут содержать наклонные прямые линии разрыва скорости. Однородные функции представляют собой широкий класс бесконечномерных функций. В полярных координатах однородные функции представлены произведением двух одномерных функций – степенной функции радиуса и произвольной функции полярного угла.

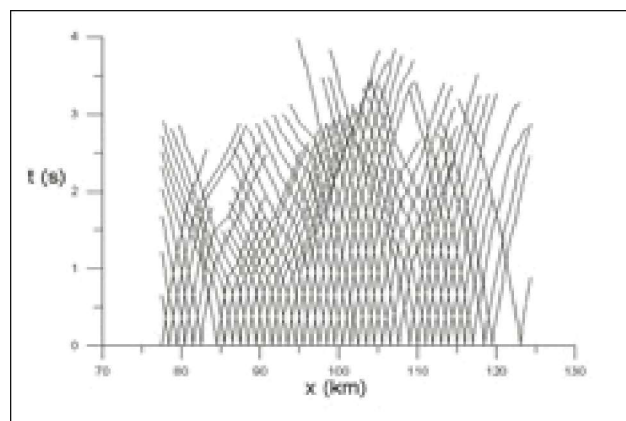


**Рисунок 1.** Схематический геологический разрез Прикаспийской впадины и расположение профиля. (Изменено из Perrodon, 1985)

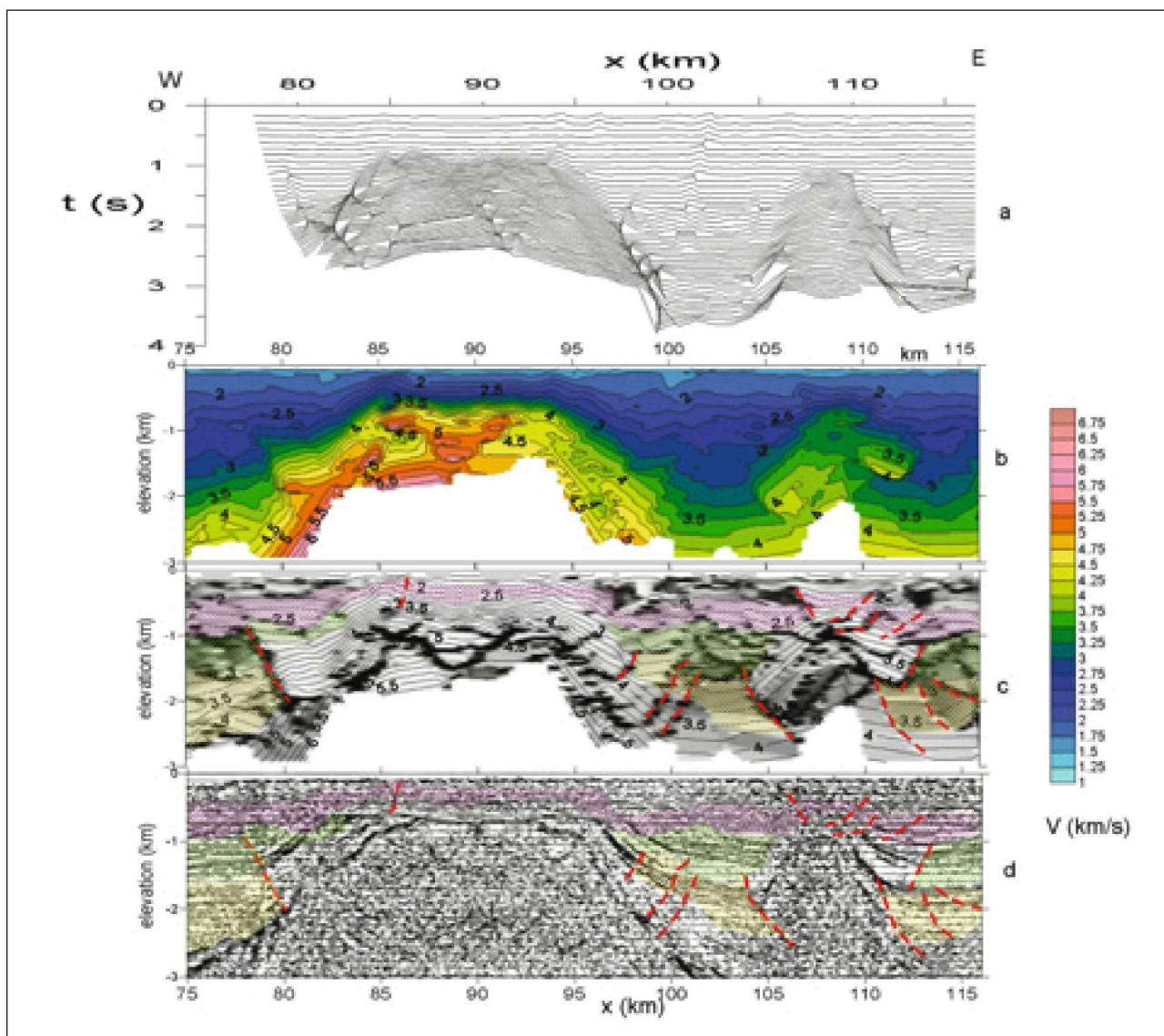
Важным свойством решений двумерных прямых и обратных задач для однородных функций является возможность преобразовать их к одномерным задачам. Программный пакет ГОДОГРАФ, предназначенный для обработки, интерпретации и построения сейсмических разрезов по преломленным волнам, локально аппроксимирует реальный разрез двумерно-неоднородными непрерывными возрастающими с увеличением полярного угла однородными функциями. Наиболее детальное изложение теории дано в (Рiir 2001).

Если мы имеем дело со сложной системой годографов, мы вычисляем однородную аппроксимирующую функцию независимо друг от друга для каждой пары встречных годографов, которая может быть выбрана из системы наблюдаемых годографов. Результатом является множество функций, число которых равно числу пар встречных годографов. Таким образом, мы автоматически устанавливаем соответствие между детальностью скоростного поля и детальностью системы наблюдений. Следовательно, мы не нуждаемся в каких-либо специальных тестах, чтобы проверить это соответствие, как это делается в случае применения методов математического моделирования. Определение общего скоростного поля для сложной системы наблюдений производится следующим образом. Процедура включает два главных шага: точное решение обратной задачи, которое определяет увеличивающуюся с глубиной однородную функцию для каждой пары встречных годографов (локальное поле скорости) и суперпозицию этих скоростных полей на общем разрезе.

Если мы имеем дело со сложной системой годографов, мы вычисляем однородную аппроксимирующую функцию независимо друг от друга для каждой пары встречных годографов, которая может быть выбрана из системы наблюдаемых годографов. Результатом является множество функций, число которых равно числу пар встречных годографов. Таким образом, мы автоматически устанавливаем соответствие между детальностью скоростного поля и детальностью системы наблюдений. Следовательно, мы не нуждаемся в каких-либо специальных тестах, чтобы проверить это соответствие, как это делается в случае применения методов математического моделирования. Определение общего скоростного поля для сложной системы наблюдений производится следующим образом. Процедура включает два главных шага: точное решение обратной задачи, которое определяет увеличивающуюся с глубиной однородную функцию для каждой пары встречных годографов (локальное поле скорости) и суперпозицию этих скоростных полей на общем разрезе.



**Рисунок 2.** Наблюдаемые годографы для 75-120 км профиля, использованные для обращения методом однородных функций.



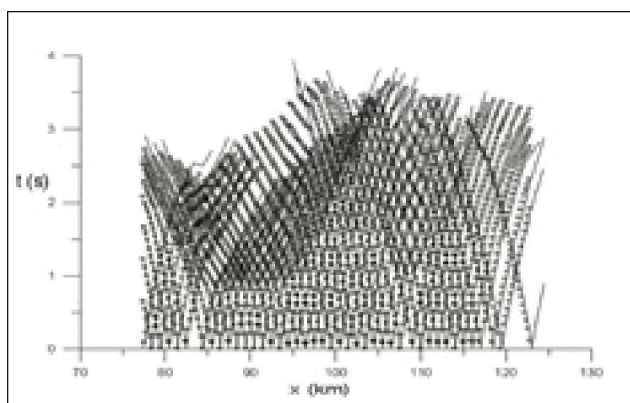
**Рисунок 3.** Временной равных удалений (a), глубинные: скоростной (b) and структурный (c) разрезы, рассчитанные по преломленным волнам, и глубинный разрез (d) по данным отраженных волн ОГТ. Те же самые пространственные области и разломы показаны цветной штриховкой на (c) и (d) разрезах.

## Результаты

На рисунке 3a показан временной разрез равных удалений по профилю 1 ЕВ для преломленных волн, в котором отобразились соляные купола. Изолинии равных удалений нарисованы с интервалом 0.2 км. Скоростной разрез по данным преломленных волн был получен методом однородных функций. На рисунке 3b скоростное поле показано цветом. Одновременно даны изолинии скорости с сечением 0.25 км/с. Это позволяет визуально оценивать значения градиента скорости, поскольку значения градиента обратно пропорциональны расстоянию между изолиниями. Соляные купола резко выделяются как области повышенных значений скорости. Внутри восточного купола скоростные значения не превышают 4 км/с, что означает, что чистая соль содержится здесь в незначительных количествах.

Западный купол характеризуется сложной внутренней структурой. Скорости достигают значений более чем 5.5 км/с. Возможно, что значительная часть заполнения этого купола представлена ангидритом. Купола окружены ореолом измененных пород (областями с увеличенными значениями градиента скорости). Неравномерная глубина разреза обусловлена неодинаковой глубиной проникания сейсмических лучей, которые вычисляются в процессе решения обратной задачи. Лучи проникают на глубину 3 км между соляными куполами и на 1.5 км внутрь куполов. Так как скорость вычисляется в узлах прямоугольной сетки, то легко вычислить поле градиента скорости. Поле скорости в математическом смысле есть функция двух координат, то есть поверхность. На Рисунке 3 с то же самое скоростное поле (рис. 3b) представлено как поверхность с оттененным рельефом. При таком изображении визуально выделяются сейсмические границы и разломы. На этом рисунке также показаны изолинии скорости, то структурный разрез.





**Рисунок 4.** Теоретические времена (квадратики) и наблюдаемые годографы (тонкие линии) для интервала профиля от 75 до 120 км.

Самое яркое освещение (светлые линии) отвечает переходным зонам, где скорость резко увеличивается с глубиной, и самое низкое освещение (темные линии) соответствуют инверсионным границам (кровлям тонких волноводов). На структурном разрезе (Рисунок 3с) видны блоки, разграниченные разломами.

Слои на разрезах идентифицируются, если существуют протяженные границы раздела, а также выдержаны интервал скорости от кровли до подошвы и скоростной градиент вдоль слоя. Используя эти критерии, во вмещающих соль породах были выделены три слоя, они обозначены различным цветом на структурном разрезе.

Верхний слой показан розовым цветом. Он характеризуется постоянным скоростным интервалом от 2 до 3 км/с, пологими изолиниями скорости, и относительно высоким градиентом скорости.

Второй слой обозначен зеленым цветом. Скорости здесь изменяются от 2.5 до 3 км/с. Изолинии скорости свидетельствуют о значительных нарушениях в этом слое. Скоростной градиент очень низкий.

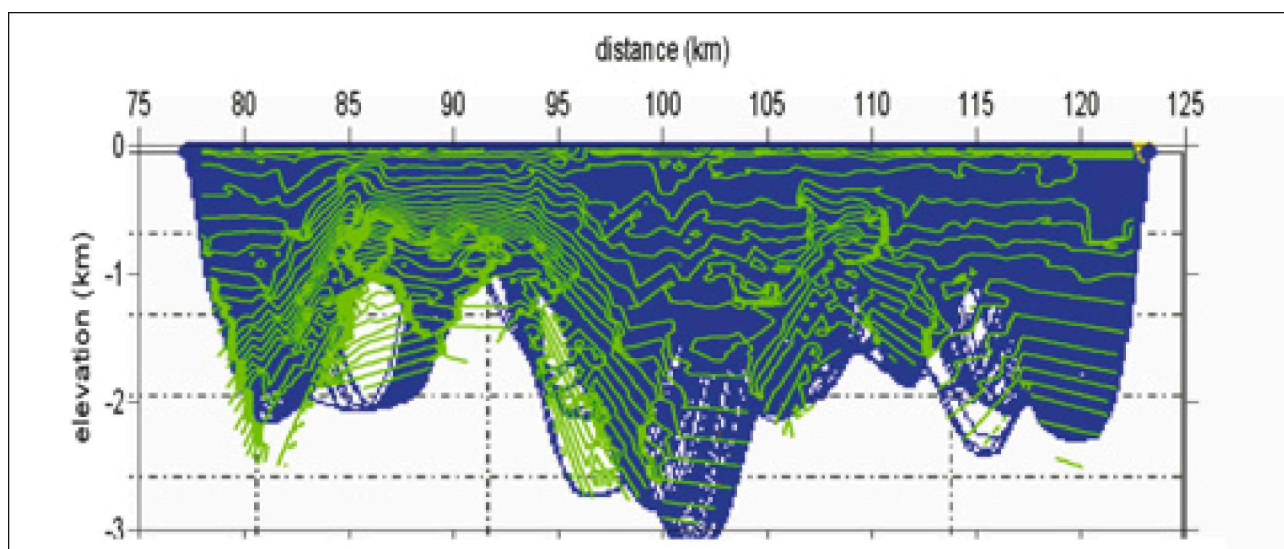
Третий слой выделен желтым цветом. Скорость изменяется от 2.5 км/с до 4.5 км/с. Изолинии скорости являются пологими и градиент характеризуется низкими значениями.

Границы, которые разделяют эти слои, - инверсионные границы раздела, потому что скорость вблизи подошвы верхнего слоя выше, чем скорость в кровле нижнего слоя. Чтобы проанализировать, как совпадают разрезы по преломленным и отраженным волнам, мы сравнили их в одинаковых координатах. Те же самые пространственные области, отвечающие слоям и разломам на разрезе преломленных волн, нанесены на глубинный разрез ОГТ. Рисунок 3d свидетельствует о достаточно хорошем совпадении этих разрезов, вычисленных независимо и по данным различных волн. Те же самые глубины и мощности выделенных слоев подтверждают совпадение этих разрезов в целом.

Чтобы показать достоверность скоростного разреза были вычислены теоретические времена преломленных волн с использованием программы решения прямой задачи FIRSTOMO. Эта программа является частью томографического пакета программ (Дитмар, Рослов, Чернышев, 1993). Среднеквадратическое отклонение наблюдаемых времен от теоретических составило 0.07 с (Рисунок 4). Лучи, отвечающие теоретическим временам, плотно заполняют пространство разреза и проникают на соответствующие глубины, как видно из рисунка 5.

### Заключение

Метод однородных функций был использован для автоматического обращения сверх плотной системы наблюдений преломленных волн, полученных при работах ОГТ в Прикаспийской впадине. Мы получили детальный скоростной разрез, который позволил установить положение, форму, скоростное строение, структуру и заполнение соляных куполов, а также разломные блоки, включая структуры ниже выступов соли. Независимо полученные разрезы по преломленным и отраженным волнам очень хорошо совпадают, при этом разрез по данным преломленных волн является более детальным.



**Рисунок 5.** Вычисленные лучи показаны синим цветом, а изолинии скорости – зеленым.

## Литература

Ditmar P.G., Roslov Yu.V., and Chernyshev M.Yu. [1993] *The software package for interpretation of seismic wave travel-times by tomography method*. Publication of Saint Petersburg University, 2-120.

Perrodon, A. [1985] *Histoire des grandes decouvertes petrolieres*. Elf Aquitaine Masson, Pau et Paris, 254.

Piip V.B. [1991] Local reconstruction of seismic refraction sections on the basis of homogeneous functions. *Izvestiya, Academy of Sciences, USSR, Physics of Solid Earth* 10, 844-850.

Piip V.B. and Efimova, E.A. [1996] Investigation of deep structure of the Eastern European Platform using seismic refraction data. In Wessely and Liebl, W. (Eds), *'Oil and Gas in Alpidic Thrustbelts and Basins of Central and Eastern Europe'*. EAGE Special Publication 5, 283-288.

Piip, V.B. [2001] 2D inversion of refraction traveltimes curves using homogeneous functions. *Geophysical Prospecting*, 49, 461-482.

Piip, V.B., Orlova, N.M., and Naumov, A.N. [2006] Structure of Dallackau landslide on the refraction data with interpretation of homogeneous function method. *68<sup>th</sup> EAGE Conference & Exhibition, 12-15 June, Vienna*. Extended Abstracts.