

## ОТЗЫВ

члена диссертационного совета на диссертацию Пономаренко Андрея Валерьевича на тему:

### **«Восстановление скорости продольной волны в вертикально-неоднородной градиентной среде по данным быстрых поверхностных волн»,**

представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 25.00.10.

. Диссертация А.В.Пономаренко посвящена исследованию так называемых «просачивающихся мод» поверхности волны с целью определения скорости продольной волны в верхней части разреза (ВЧР). Эта тема является весьма актуальной в задачах сейсморазведки, поскольку результат обращения волнового поля существенно зависит от выбора модели ВЧР. Для оценки строения ВЧР автор предлагает использовать так называемые «быстрые поверхностные волны», которые являются результатом интерференции продольных и поперечных волн в верхней толще. При этом часть энергии таких волн просачивается в нижнюю среду в виде поперечных волн. Исследованием просачивающихся мод занимались и ранее, но конструктивных способов их использования для восстановления разреза по продольным волнам до пор не было предложено. Это обусловлено сложностью математического аппарата решения прямой задачи – построения поля этих волн в произвольных моделях сред. А эта сложность связана с необходимостью отыскания комплексных корней дисперсионного (нелинейного) уравнения, что до сих пор является не решенной до конца проблемой вычислительной математики. Поэтому все предыдущие исследования поля просачивающихся мод выполнялись при использовании упрощающих предположений относительно модели среды. Простейшая модель, рассмотренная в ряде работ, – однородный слой на полупространстве – хотя и приводит к достаточно простому дисперсионному уравнению, но не может рассматриваться как удовлетворительная аппроксимация реальной среды. Поэтому автор диссертации выбрал модель, более адекватно отражающую реальную среду - это модель одного или двух градиентных слоев на полупространстве. Изменение скорости в таких слоях аппроксимируется линейной зависимостью квадрата медленности с глубиной. Но при этом остается другое упрощение, а именно, замена упругой среды акустической, что справедливо в случае сред с малой скоростью поперечной волны. Для акустической среды, представляющей один или два слоя с линейным уменьшением квадрата медленности с глубиной, автор вывел дисперсионные уравнения. Хотя они и содержат специальные функции (функции Эйри), но вполне доступны для вычислений. В рамках такой модели автор решает обратную задачу – восстановление скоростного разреза продольной волны по полученным из наблюдений скоростям отдельных мод быстрой поверхности волны. При этом используются данные о всех наблюдаемых модах без их идентификации за счет нестандартного выбора функционала невязки, предложенного ранее (Эрнст и др.). Конечно, добиться полного совпадения с истинным скоростным разрезом не удается из-за, во-первых, аппроксимации скорости продольной волны, во-вторых, из-за неучета поперечной волны. Тем не менее, оказалось, что в достаточно хорошем приближении полученный в результате решения обратной задачи профиль скорости продольной волны

09/2-02-49 от 21.09.2017

оказывается достаточно близким к истинному, особенно в случае, когда используются данные не одной, а совместно двух мод. Во всяком случае, полученное решение может использоваться в качестве начального приближения в задачах полного обращения волнового поля.

В работе выполнен большой объем вычислений, связанных с решением как прямых, так и обратных задач, что позволяет заключить о практической значимости разработанного в диссертации метода оценки профиля продольной волны при изучении верхней части разреза. К представленным в диссертации результатам замечаний нет, все, что сделано – правильно. Замечания возникают к тому, что не сделано. Это два основных момента.

Первое – это бездоказательная замена упругой среды акустической. Действительно, при малых значениях скорости поперечной волны, что может быть в случае водонасыщенных пород, в верхней части разреза комплексный корень дисперсионного уравнения будет, очевидно, близок к тому, который получается из решения для акустической среды. Но что значит «малая» скорость? Если включить отличную от нуля (малую) скорость поперечной волны, то корни дисперсионного уравнения сдвинутся с вещественной оси в комплексную плоскость. Найти их не представляет труда. Увеличивая значение скорости поперечной волны можно проследить движение коней в комплексной плоскости и тем самым оценить, при каком коэффициенте Пуассона можно еще считать скорость поверхности волны, определяемую вещественной частью корня, близкой к той, которая получается для акустического случая. Из физических соображений кажется, что увеличение скорости поперечной волны будет в большей степени влиять на затухание волны, нежели на ее скорость, т.е. корни будут двигаться в основном вдоль направления мнимой оси, и соответственно вклад в вещественную часть корня будет малым. Но это требует проверки путем численных расчетов, которые можно (и нужно!) было бы сделать. В этом случае можно было бы оценить пороговое значение коэффициента Пуассона, до которого еще можно использовать акустическую модель среды при решении обратной задачи.

.Второе – это выбор аппроксимации изменения скорости в форме линейного уменьшения квадрата медленности. В такой модели градиент скорости возрастает с глубиной, что не отвечает строению реальных сред, в которых рост скорости с глубиной, как правило, замедляется. Кроме того такой выбор модели не позволяет аппроксимировать разрез большими числом градиентных сред, иначе при каждом последующем увеличении числа слоев это будет приводить к существенному усложнению аналитического выражения для дисперсионного уравнения. В то же время в ряде работ по решению обратных задач по кинематическим характеристикам поверхностных волн в настоящее время активно используется аппроксимация разреза набором слоев с постоянной скоростью, а для расчета дисперсионных кривых в таких моделях - метод Томсона-Хаскелла. При этом параметрами разреза могут быть не все значения скоростей в слоях – слоев может быть очень много, - а значения скоростей на небольшом числе выбранных глубин, между которыми градиентная среда аппроксимируется набором тонких слоев. Мощности этих слоев выбираются так, чтобы при дальнейшем дроблении разреза дисперсионные кривые не изменялись. Такой подход позволяет решать обратные задачи по данным дисперсии поверхностных волн практически для любых реальных моделей сред.

Эти замечания, хотя и существенны, но их можно рассматривать не столько как недостаток работы, сколько направление будущих работ по данной тематике. Автор рассматриваемой диссертации, безусловно, сможет без особого труда их учесть в своей дальнейшей работе. Основанием для такого суждения является приведенный в диссертации обзор исследований по теории и методике, который написан весьма полно, логично, с глубоким пониманием проблемы.

Диссертация Пономаренко Андрея Валерьевича на тему: «Восстановление скорости продольной волны в вертикально-неоднородной градиентной среде по данным быстрых поверхностных волн» соответствует основным требованиям, установленным Приказом от 01.09.2016 № 6821/1 «О порядке присуждения ученых степеней в Санкт-Петербургском государственном университете», соискатель Пономаренко Андрей Валерьевич заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 25.00.10

Член диссертационного совета

Доктор физико-математических наук



Яновская Татьяна Борисовна

20 сентября 2017 г.