УДК 550.834.015.2

ПОПЕРЕЧНЫЕ И ОБМЕННЫЕ ВОЛНЫ В МОРСКИХ ИССЛЕДОВАНИЯХ ГСЗ (РЕЗУЛЬТАТЫ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ)

Т.М. Яварова¹, С.Н. Кашубин², А.В. Рыбалка², Т.С. Сакулина¹

¹ОАО «Севморгео», Санкт-Петербург ²Всероссийский научно-исследовательский геологический институт им. А.П. Карпинского, Санкт-Петербург

Рассмотрены теоретические предпосылки возникновения и распространения поперечных и обменных волн при морских сейсмических исследованиях ГСЗ. Приведены результаты математического компьютерного моделирования волновых полей для типовых моделей земной коры и верхней мантии акваторий.

Поперечные и обменные волны, исследования ГСЗ, математическое моделирование волновых полей, земная кора

SHEAR AND CONVERTED WAVES IN MARINE DSS (RESULTS OF MATHEMATICAL MODELING)

T.M. Yavarova¹, S.N. Kashubin², A.V. Rybalka², T.S. Sakulina¹

¹Joint Stock Company «Sevmorgeo», St. Petersburg ²A.P. Karpinsky Russian Geological Research Institute, St. Petersburg

Theoretical backgrounds of the origination and propagation of shear and converted waves in marine deep seismic sounding studies are investigated. The results of computer simulation of wave fields for the typical models of an offshore crust and upper mantle are described.

Shear and converted waves, DSS research, mathematical modeling of wave fields, the Earth's crust

Морские глубинные сейсмические исследования (ГСЗ) с многокомпонентной регистрацией волнового поля позволяют фиксировать на вертикальных и горизонтальных компонентах, помимо интенсивных продольных волн, динамически выраженные поперечные и обменные волны. В настоящее время среди исследователей нет единой точки зрения на то, где происходит первый P–S-обмен. Одни считают, что первый P–S обмен происходит на дне моря (точнее в достаточно тонком с точки зрения длины волны придонном слое) [Mjelde et al., 2002]. Другие полагают, что обменной может быть только граница осадочного чехла и консолидированного фундамента, являющаяся наиболее контрастной границей раздела в твердой среде [Chung et al., 1990]. Третьи придерживаются точки зрения, что динамически выразительными могут быть обменные волны, претерпевшие лишь один акт обмена, причем, как правило, на восходящем луче [Eccles et al., 2009].

Для того чтобы обоснованно ответить на эти вопросы, а также изучить кинематические и динамические характеристики основных классов и типов продольных и поперечных волн, формирующихся в типичных для морских сейсмических исследований ситуациях, было выполнено математическое конечно-разностное моделирование с использованием программы Tesseral 2D для принципиальной модели земной коры и верхней мантии.

Программа Tesseral 2D (Tesseral Technologies Inc, Канада, www.tesseral-geo.com) предназначена для моделирования процесса распространения упругих волн, позволяет рассчитывать теоретические сейсмограммы вертикальной и горизонтальной компонент в двухмерной среде и получать «мгновенные снимки» распространяющихся фронтов волн, которые используется для анализа сложных волновых полей [Kelly et al., 1976].

На рис. 1 и 2 показаны рассчитанные с применением этой программы фронты и годографы волн, возникающих на границе жидкой и твердой сред, имитирующей дно моря. Как можно видеть из рис. 1, прямая волна в водном слое (P_0), достигнув дна моря, не только возвращается на поверхность в виде отраженной волны (P_0P), но и образует в твердой среде две проходящих волны (P_0P_1 и P_0S_1), При падении волны на границу под углами больше критического эти волны формируют три волновых фронта (рис. 2): (1) фронт ($P_0P_1P_0$) головной продольной волны, которая на больших удалениях от источника сменяет в первых вступлениях прямую P_0 -волну; (2) фронт ($P_0S_1P_0$) головной обменной волны, которая регистрируется в последующих вступлениях с момента времени t = 5600 с на удалениях источник-приемник более 6500 м; (3) фронт ($P_0P_1S_1$) головной обменной волны, которая распространяется внутрь твердой среды и не образует годографа на поверхности.

Таким образом, конечно-разностное моделирование волн, возникающих на границе жидкой и твердой сред, показывает, что от проходящей из жидкого слоя продольной волны образуется достаточно интенсивная поперечная (обменная) P_0S_1 -волна, которая может регистрироваться в закритической области даже на вертикальной компоненте.

Ниже приводятся результаты моделирования для принципиальной горизонтально-слоистой модели земной коры и верхней мантии, полученной в результате обобщения опубликованных моделей, построенных при морских многоволновых сейсмических исследованиях на шельфе Арктических и Дальневосточных морей [Кашубин и др., 2013].

Принципиальная модель земной коры и верхней мантии состоит из следующих слоев: водный слой мощностью 2 км ($V_P = 1.5$ км/с; $V_S = 0$); осадочный чехол мощностью 6 км, представленный для простоты слоем с градиентным нарастанием скоростей ($V_P = 1.8-4.5$ км/с, $V_S = 0.88-$ 2.60 км/с); консолидированная кора мощностью 10 км, также представленная единым слоем с градиентным нарастанием скоростей ($V_P = 5.8-6.9$ км/с, $V_S = 3.35 \div 4.00$ км/с). Поверхность верхней мантии (граница Мохо) со скоростями $V_P = 8.0$ км/с, $V_S = 4.60$ км/с находится на глубине 18 км.

В результате конечно-разностного моделирования для этой модели получены синтетические сейсмические записи Z- и X-компонент (рис. 3, 4). На рисунках представлены наложенные на сейсмические записи расчетные годографы различных волн, полученные путем кинематического лучевого моделирования с использованием программы SeisWide (http://seismic.ocean.dal.ca/~seismic/utilities/seiswide/index.php), и приведены соответствующие этим годографам принципиальные лучевые схемы. На принципиальных лучевых схемах лучи изображены без учета их кривизны и проникания в слоях с градиентным нарастанием скоростей, за исключением лучевых схем 1, 5, 6.

На сейсмограммах выделяются следующие основные волны.

Прямая волна в водном слое (P_0) (годограф показан светло-голубым цветом) – интенсивная; незначительно затухает с удалением; наблюдается как на вертикальной, так и на горизонтальной компонентах в первых и последующих вступлениях; характеризуется постоянной кажущейся скоростью, соответствующей скорости продольных волн в воде (1.50 км/с).

Рефрагированная продольная волна в осадочном слое (Psed) (лучевая схема 1, годограф показан желтым цветом) – достаточно интенсивная до удалений порядка 20 км; интервал ее прослеживания ограничивается точкой выхода конечного луча; она наблюдается как на вертикальной, так и на горизонтальной компонентах в первых вступлениях; ее кажущаяся скорость нарастает с удалением в соответствии со значениями скоростей продольных волн в осадочном слое; поперечный аналог для данной модели, в которой скорость поперечных волн в кровле осадочного слоя меньше скорости продольных волн в воде, практически не выделяется.



Рис. 1. Синтетические сейсмограммы Z- и X-компонент (вверху) и мгновенный снимок распространения фронтов сейсмических волн в момент времени t = 1500 мс (внизу справа), полученные в результате конечно-разностного моделирования в программе Tesseral 2D для упругой изотропной модели среды (внизу слева) с одной границей раздела, верхний слой – водный.



Рис. 2. Синтетическая сейсмограмма Z-компоненты (вверху) и мгновенный снимок распространения фронтов сейсмических волн в момент времени t = 5600 мс (внизу), полученные в результате конечноразностного моделирования в программе Tesseral 2D для упругой изотропной модели среды с одной границей раздела, верхний слой – водный.



Рис. 3. Годографы основных (наиболее интенсивных на вертикальной компоненте) продольных и кратных волн для принципиальной модели земной коры и верхней мантии и соответствующие им лучевые схемы.

Отраженные продольные (P_BP) и поперечные (S_BS) волны от подошвы осадочного чехла (лучевые схемы 2 и 12, годографы показаны желтым цветом) – достаточно интенсивные и прослеживаются до удалений, ограниченных точкой выхода конечного луча; продольные волны наблюдаются практически только на вертикальной компоненте; поперечные волны лучше проявлены на горизонтальной компоненте, но имеют и заметную вертикальную составляющую.

Головные (рефрагированные) продольные (Pg) и поперечные (Sg) волны, распространяющиеся вдоль поверхности фундамента (поверхности консолидированной коры) (лучевые схемы 3 и 13, годографы показаны светло-коричневым цветом) – достаточно интенсивные, слабо затухающие с удалением; продольные волны лучше проявлены на вертикальной компоненте, но имеют заметную горизонтальную составляющую; поперечные волны, напротив, лучше проявлены на горизонтальной компоненте, но имеют и вертикальную составляющую. Отраженные продольные (P_MP) и поперечные (S_MS) волны от подошвы земной коры (границы Мохоровичича) (лучевые схемы 4 и 14, годографы показаны синим цветом) – достаточно интенсивные на больших удалениях (в области закритических отражений); продольные волны лучше проявлены на вертикальной компоненте, но имеют и горизонтальную составляющую в закритической области; поперечные волны лучше проявлены на горизонтальной компоненте, но также в закритической области имеют вертикальную составляющую.



Рис. 4. Годографы основных (наиболее интенсивных на горизонтальной компоненте) поперечных и обменных волн для принципиальной модели земной коры и верхней мантии и соответствующие им лучевые схемы.

Головные (рефрагированные) продольные (*Pn*) и поперечные (*Sn*) волны, распространяющиеся вдоль поверхности верхней мантии (годографы показаны темно-синим цветом) – очень низкой интенсивности; продольная волна заметна лишь на вертикальной компоненте в первых вступлениях, поперечная волна в данной модели совсем не видна.

На вертикальной компоненте (рис. 3) наиболее интенсивные волны представлены в основном продольными (годографы показаны сплошными линиями) и кратными (годографы показаны пунктиром) волнами. Основными границами образования кратных волн являются подошва осадочного чехла и подошва земной коры.

На горизонтальной компоненте (рис. 4), кроме уже рассмотренных ранее поперечных волн (лучевые схемы 12, 13, 14) отчетливо фиксируются несколько обменных волн типа *PS* (лучевые схемы 15–19): отраженная и преломленная волны от подошвы осадочного чехла (лучевые схемы 15 и 16), претерпевшие обмен на восходящем луче; отраженные волны от подошвы земной коры (лучевые схемы 17–19), претерпевающие *P*–*S* обмен не только на самой границе M (схема 17), но и на границе осадков и консолидированной коры, как на восходящем (схема 18), так и на падающем (схема 19) лучах. Преломленные обменные волны от подошвы земной коры динамически не выражены. На рис. 4. годографы основных обменных волн, распространяющихся в осадочном слое, показаны желтым цветом, скользящие вдоль поверхности консолидированной коры – светло-коричневым цветом, а волны, связанные с подошвой земной коры и верхней мантии – синим цветом.

Анализ синтетических сейсмограмм и расчетных годографов волн для принципиальной модели земной коры и верхней мантии акваторий позволяет сделать следующие выводы:

1. Обменные волны достаточной интенсивности образуются как на падающих, так и на восходящих лучах на всех основных границах модели (дно моря, подошва осадочного чехла и подошва земной коры). Наиболее интенсивными являются *PS*-волны, претерпевшие один акт обмена;

2. На сейсмической записи *X*-компоненты преобладают поперечные и обменные *PS*-волны. Наиболее интенсивными являются поперечные и обменные отраженные волны от подошвы осадочного чехла и подошвы земной коры (от границ *B* и *M*) и преломленные *PS*-волны, скользящие вдоль поверхности консолидированной коры со скоростью продольных волн;

3. На сейсмической записи Z-компоненты помимо однократных продольных волн отмечается интенсивное поле кратных волн, связанных не только с дном моря, но и с подошвой осадочного чехла. Обменные волны от границ в земной коре на Z-компоненте динамически выражены слабее, чем на X-компоненте, что может быть связано как с незначительной вертикальной составляющей при подходе к дну моря PS-волн, так и с низкой интенсивностью обменных SP-волн.

Литература

Кашубин С.Н., Павленкова Н.И., Петров О.В. и др. Типы земной коры Циркумполярной Арктики // Региональная геология и металлогения. 2013. № 55. С. 5–20.

Chung T.W., Hirata N., Sato R. Two-dimensional *P*- and *S*-wave velocity structure of the Yamato Basin, the Southern Japan Sea, from refraction data collected by an ocean bottom seismographic array // J. Phys. Earth. 1990. V. 38. P. 99–147.

Eccles J.D., White R.S., Christie P.A.F. Identification and inversion of converted shear waves: case studies from the European North Atlantic continental margins // Geophys. J. Int. 2009. V. 179. P. 381–400, doi: 10.1111/j.1365-246X.2009.04290.x.

Kelly K.R., Ward R.W., Treitel S., Alford R.M. Synthetic seismograms: A finite-difference approach // Geophysics. 1976. V. 41. P. 2–27.

Mjelde R., Kasahara J., Shimamura H. et al. Lower crustal seismic velocity-anomalies; magmatic underplating or serpentinized peridotite? Evidence from the Vøring Margin, NE Atlantic // Marine Geophys. Res. 2002. V. 23. P. 169–183.

Sobolev S.V., Babeyko A.Yu. Modeling of mineralogical composition, density and elastic wave velocities in anhydrous magmatic rocks // Surveys in Geophysics. 1994. V. 15. P. 515–544.