

УДК.550.372

СТРОЕНИЕ ЗЕМНОЙ КОРЫ СЕВЕРО-ЧУКОТСКОГО АРКТИЧЕСКОГО ШЕЛЬФА ПО ДАННЫМ МИГРАЦИИ ПОЛЯ ПРЕЛОМЛЕННЫХ И ОТРАЖЕННЫХ ВОЛН (ПРОФИЛЬ 5-АР)

© 2025 г. Н. И. Павленкова

Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, г. Москва, Россия
E-mail: ninarav@mail.ru

Поступила в редакцию 19.09.2023 г.
После доработки 11.09.2024 г.
Принята к публикации 23.09.2024 г.

Глубинные сейсмические исследования вдоль профиля 5-АР были проведены в северо-восточной шельфовой зоне Арктики от Чукотской складчатой области на континенте до глубокой Северо-Чукотской впадины. Для обработки экспериментального материала этого профиля было использовано математическое моделирование на основе метода полей времен, а также метод миграции полей преломленных и отраженных волн, зарегистрированных на больших удалениях от источника. В результате с высокой степенью достоверности удалось не только выявить новые особенности строения земной коры и верхней мантии этого региона, но и определить реологические свойства слагающего их вещества, степени его жесткости или пластичности. Это позволило предложить новую модель возможной геодинамической истории развития данного региона.

Ключевые слова: преломленные и отраженные волны, волновые изображения, миграция волновых полей, земная кора, верхняя мантия, глубокие впадины.

DOI: 10.31857/S0002333725010119, **EDN:** ACCPBV

1. ВВЕДЕНИЕ

Изучение глубинного строения Арктики направлено на решение важной научной проблемы по определению геодинамической природы этого необычного морского бассейна. С этой целью с конца прошлого столетия в этом регионе начали проводиться глубинные сейсмические исследования земной коры. Наиболее крупные работы были выполнены сначала в юго-западной шельфовой зоне океана [Сакулина и др., 2015; Roslov et al., 2009; Sakoulina et al., 2000; 2015], затем в его восточной и центральной частях [Поселов и др., 2007; 2012]. Отработанная в результате система профилей была представлена в работах [Кашубин и др., 2013; 2018; Kashubin et al., 2011; Petrov et al., 2016; Тектонострат. атлас, 2020] (рис.1).

Самый восточный профиль, пересекающий шельфовую зону континента и центральную

часть Арктического моря, называется профилем “Арктика-2005”, его длина 1400 км [Поселов и др., 2007]. При построении скоростного разреза по этому профилю использовались записи первых вступлений на удалениях до 150 км, которые интерпретировались как преломленные волны. По ним строились преломляющие границы, определялись граничные скорости и соотношения между скоростями продольных и поперечных волн (рис. 2). Отраженные волны и волны, зарегистрированные на больших удалениях от источника, при этом не обрабатывались. Только для построения подошвы земной коры, границы М, использовались локальные, не связанные между собой отражения от этой границы. В результате было показано, что мощность коры практически не меняется вдоль профиля (30–35 км), но резко меняется тип земной коры, от коры субконтинентального типа по классификации В.В. Белоусова [Белоусов, Павленкова,

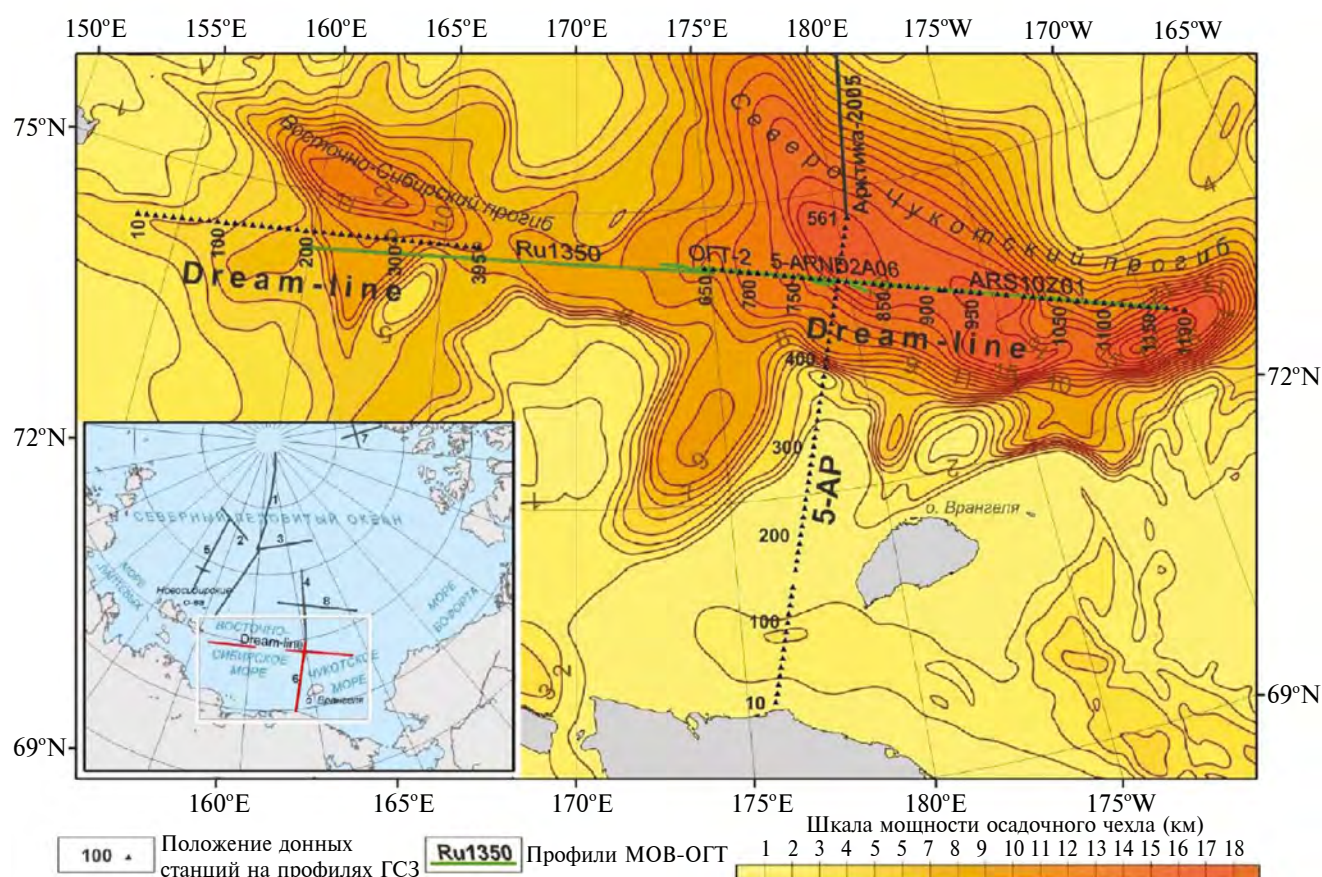


Рис. 1. Схема профилей глубинных сейсмических исследований в Северо-Чукотской впадине и карта мощности осадочного чехла [Кашубин и др., 2011]. На врезке даны все остальные профили глубинных сейсмических исследований Арктики.

1989] со средней скоростью в коре 6.4–6.6 км/с в шельфовой зоне континента до коры такой же мощности, но со скоростью, типичной для океанической коры, более 7.0 км/с в центральной части океана. Именно при смене типа коры сформировалась аномальная по глубине Северо-Чукотская впадина.

Позже, в 2010–2015 гг., в южной половине профиля “Арктика-2005” от континента до Северо-Чукотской впадины было выполнено детальное глубинное сейсмическое зондирование (ГСЗ), с расстоянием между взрывами 20–30 км [Сакулина и др., 2011]. Эта часть профиля длиной 700 км была названа профилем 5-АР. В это же время по заказу компании British Petroleum в рамках международного российско-британского сотрудничества был выполнен комплекс работ ГСЗ и МОВ (Метод общей глубинной точки) во впадине по профилю Dream-Line [Сакулина и др., 2016] (рис. 1).

2. МЕТОДЫ ПОСТРОЕНИЯ СКОРОСТНОГО РАЗРЕЗА

Основным методом построения скоростных разрезов по профилям ГСЗ в настоящее время является метод математического моделирования. Он заключается в многократном решении прямой задачи для некоторых стартовых скоростных моделей, в сопоставлении результатов расчета с наблюдаемыми полями и в выборе на этой основе наиболее обоснованной модели. Достоверность и возможная неоднозначность этих построений зависит в основном от детальности систем наблюдений и от сложности регистрируемых волновых полей.

2.1. Характеристика экспериментального материала по профилю 5-АР и методика его обработки

Работы ГСЗ на профиле 5-АР были выполнены по обращенной системе наблюдений

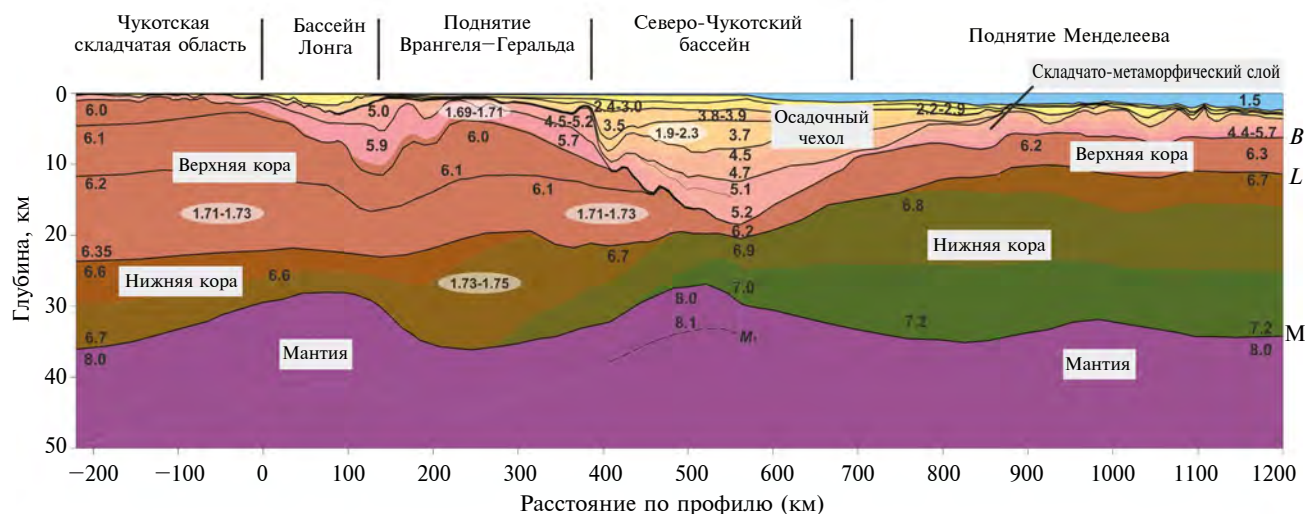


Рис. 2. Сейсмический разрез по профилю “Арктика-2005” [Поселов и др., 2005].

Условные обозначения: *B* — поверхность фундамента впадины; *L* — кровля гранулит-базитового слоя коры (нижней коры); *M* — подошва коры, граница Моховичича; *M1* — граница в верхней мантии.

с перемещающимся на судне источником и автономными донными сейсмическими станциями. Станции располагались вдоль профиля через 10 км, взрывы производились в среднем через каждые 20–30 км, и они регистрировались до удалений более 200–300 км. Это обеспечивало глубину исследований более 50 км. На всем профиле были получены сейсмические записи хорошего качества. В первых вступлениях прослеживаются преломленные волны в осадках (*Psed*), в консолидированной коре (*Pg*) и от границы *M* (*Pn*). Во вторых вступлениях выделяются отраженные волны от границы *M* (*PmP*) и отражения от границ в верхней мантии (*Pm₁P*).

В данной работе для определения скоростного разреза по профилю 5-АР основное внимание уделяется детальному анализу волновой картины и определению природы волн, регистрируемых на больших удалениях от источника, как в первых, так и в последующих вступлениях. На первом этапе для построения скоростного разреза широко использовались различные методические приемы, разработанные в сейсморазведке и в ГСЗ. Например, для надежного определения структуры отдельных преломляющих границ использовался корреляционный метод преломленных волн, основанный на прослеживании волн от одной и той же границы по параллельности нагоняющих годографов [Гамбурцев и др., 1952]. Для определения природы волн, регистрируемых в последующих вступлениях, использовались

метод полей времен [Ризниченко, 1946] и метод редуцированных годографов [Павленкова, 1979]. В результате был построен скоростной разрез земной коры и верхов мантии до глубины более 70 км. Этот разрез использовался затем как стартовая модель на следующем этапе обработки экспериментальных записей на основе математического моделирования.

Отличительной особенностью проведенного в данном случае моделирования для профиля 5-АР было определение не только кинематических, но и динамических особенностей преломленных и отраженных волн, регистрируемых в первых и последующих вступлениях на удалениях более 150–200 км. Для этого использовались возможности программы SEIS-83, по которой для рассчитываемых скоростных моделей строились не просто годографы, а волновые поля. Все этапы построения скоростного разреза с этой программой показаны ниже на примере трех пунктов взрыва, расположенных на пикетах ПК 40, 310 и 510 км.

На рис. 3 приведены экспериментальные записи, полученные для пункта взрыва ПВ 40 (верхний рисунок), рассчитанные лучи и сейсмограммы отраженных и преломленных волн для стартовой скоростной модели (два нижних рисунка), и годографы основных волн, рассчитанные для окончательной скоростной модели (третий рисунок). Эти данные показывают, что на интервале профиля, ПК 40–180 км, старто-

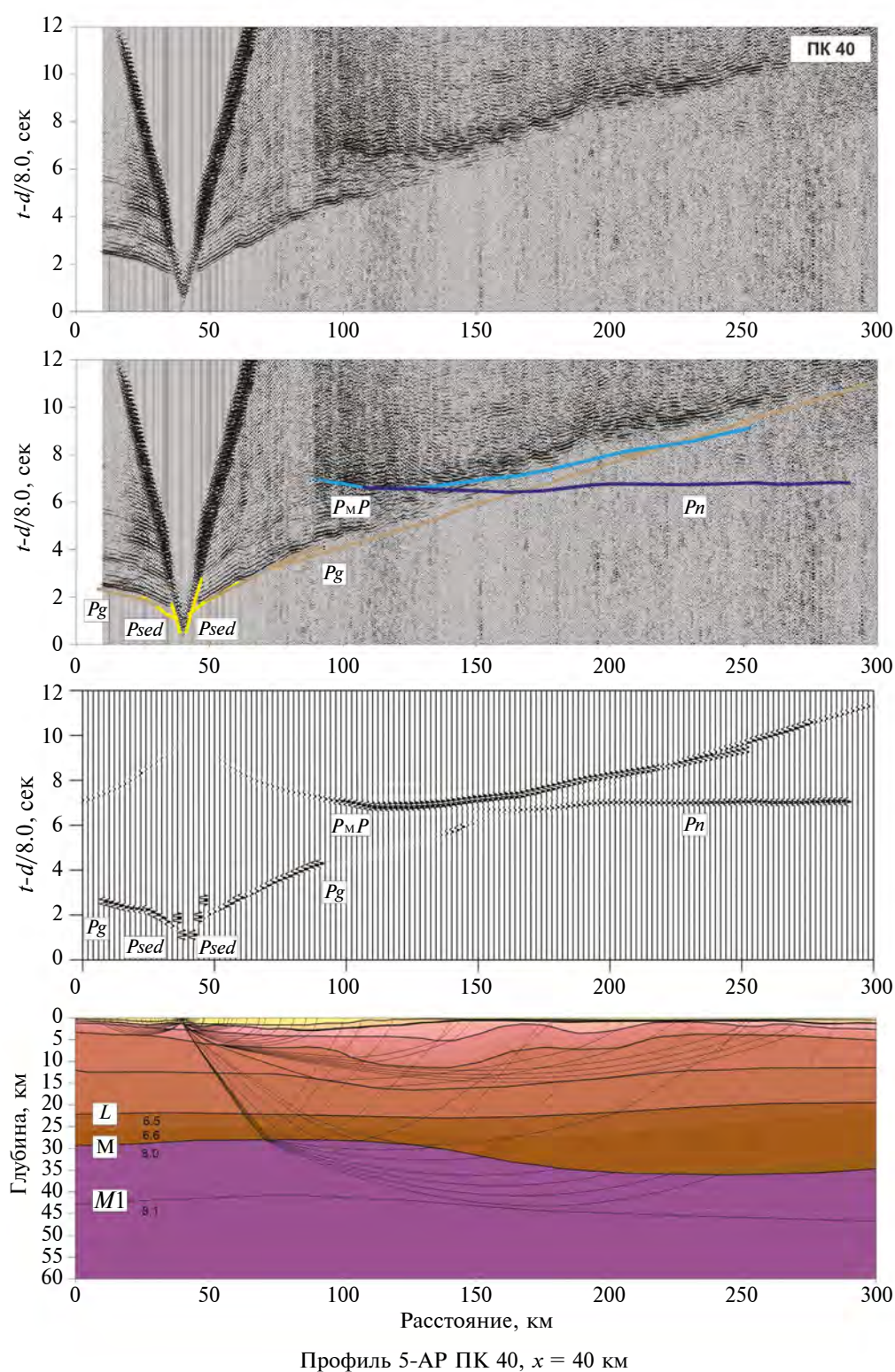


Рис. 3. Описание процесса построения скоростного разреза по профилю 5-АР на примере пункта взрыва ПВ40, расположенного на ПК40.

На рисунке приведены сейсмические записи зарегистрированных волн в редукции со скоростью 8.0 км/с, $t-d/8.0$ (верхний рисунок); стартовая модель и рассчитанные для нее волновые поля (два нижних рисунка), а также рассчитанные годографы для окончательной скоростной модели. Условные обозначения: t — время; d — расстояние от источника; P_{sed} — преломленные волны от осадочного чехла; P_g — от консолидированной части земной коры; P_L — преломленная волна от границы L ; P_{mP} , P_{m1P} — отраженные волны от границ M и $M1$.

вый скоростной разрез и рассчитанные для него сейсмограммы хорошо согласуются с экспериментальной записью отражения от границы M . Далее, на удалении более 180 км, возможны два варианта: или глубина до границы M увеличивается, или на этих удалениях регистрируется отражение от границы $M1$ в верхней мантии (Pm_1P).

На этом же интервале профиля полученные данные для преломленной волны от границы M , волны Pn , тоже не согласуются с экспериментальными данными. На расчетных сейсмограммах эта волна характеризуется большой интенсивностью до удалений более 250 км, но на экспериментальных записях она быстро затухает, и выделить ее на таких удалениях практически невозможно. Это означает, что стартовая скоростная модель верхов мантии в данном случае должна быть изменена, например, нужно несколько увеличить глубину до границы M на интервале профиля 75–150 км и уменьшить ее на интервале 150–200 км. Желательно также увеличить глубину до границы $M1$. Все это позволит уменьшить интенсивность волны Pn на рассчитанных сейсмограммах.

Записи ПВ 310 (рис. 4) подтверждают необходимость уменьшения глубины до границы M на интервале профиля 150–200 км, чтобы годографы от нее не совпадали с годографами от границы $M1$, а регистрировались отдельно, как на экспериментальных записях. Кроме этого, расчеты показали, что для регистрации интенсивной волны от границы $M1$ на интервале профиля 350–450 км в первых вступлениях, как на экспериментальных записях, глубина до этой границы должна уменьшаться от 50 до 30 км. Эти особенности границы $M1$ отмечены на окончательном скоростном разрезе на рис. 6.

Записи ПВ 510 (рис. 5) описывают структуру земной коры Северо-Чукотской впадины, которая тоже хорошо согласуется с окончательным скоростным разрезом, приведенным на рис. 6. На этом разрезе особые свойства границ в районе впадины приведены по данным исследований структуры коры методом МОВ-ОГТ по профилю Dream-Line (рис. 1). По этим данным в глубокой части впадины четко выделяется отражающая граница на глубине 12–13 км: это кровля более жесткого слоя в низах осадочного чехла и слоя в верхах коры на глубине около 17 км, скорости в котором увеличиваются под впадиной до 7.0 км/с. На записях ПВ 510 по профилю 5-АР хорошо выделяются преломленные от этого слоя волны P_L .

В целом из всех описанных выше построений по профилю 5-АР следует достаточно высокая неоднозначность в определении структурных особенностей земной коры и верхней мантии Северо-Чукотской шельфовой зоны, связанная со сложностью наблюдаемых волновых полей. В связи с этим для более полной интерпретации зарегистрированных на профиле волновых формирований был использован метод миграции преломленных и закритических отраженных волн, зарегистрированных на больших удалениях от источника, с построением волнового изображения не только земной коры, но и верхов мантии.

3. ОБРАБОТКА МАТЕРИАЛОВ ГСЗ МЕТОДОМ МИГРАЦИИ ОТРАЖЕННЫХ И ПРЕЛОМЛЕННЫХ ВОЛН

3.1. Основы методики миграции волновых полей

Построение волновых изображений земной коры методом миграции волновых полей аналогично построению сейсмических разрезов по наблюдаемым годографам методом полей времен. При этом из источника строится временное поле падающей волны, а по наблюдаемому годографу — поле отраженной волны. По точкам пересечения одноименных изохрон (общим глубинным точкам) этих встречных полей формируются отражающие границы. Такая же методика используется для построения волнового изображения сейсмических границ. Для этого по заданной скоростной модели в точки пересечения одноименных изохрон переносятся записи волн, сформировавшихся от источника и от области их регистрации, и они суммируются. При правильной скоростной модели эти волны складываются и в волновом изображении выделяются наиболее достоверные отражающие границы. Наиболее широко такой метод был использован для миграции поля отраженных волн, регистрируемых вблизи от источника (докритических отражений). Это является основой метода ОГТ (метода общей глубинной точки). Однако возможности такой миграции ограничены, так как она базируется на волнах, зарегистрированных вблизи источника на фоне многочисленных кратных и обменных волн, а интенсивные закритические отражения и преломленные волны не используются.

Метод миграции преломленных и закритических отраженных волн, зарегистрированных на больших удалениях от источника, был предложен В.Н. Пилипенко в 1983 г. [Пилипенко, 1983].

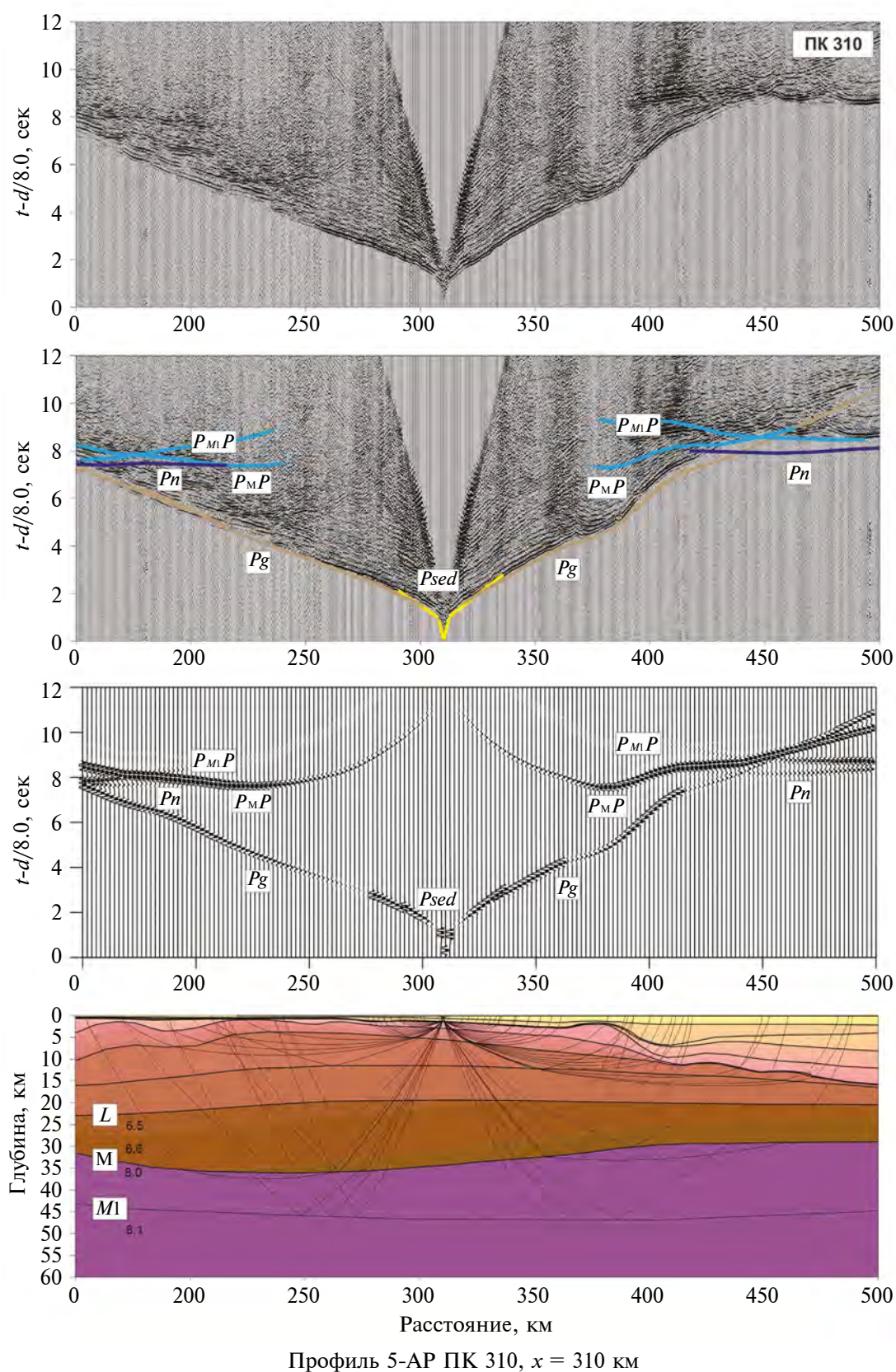


Рис. 4. Описание процесса построения скоростного разреза по профилю 5-АР на примере пункта взрыва ПВ310. Условные обозначения — на рис. 3.

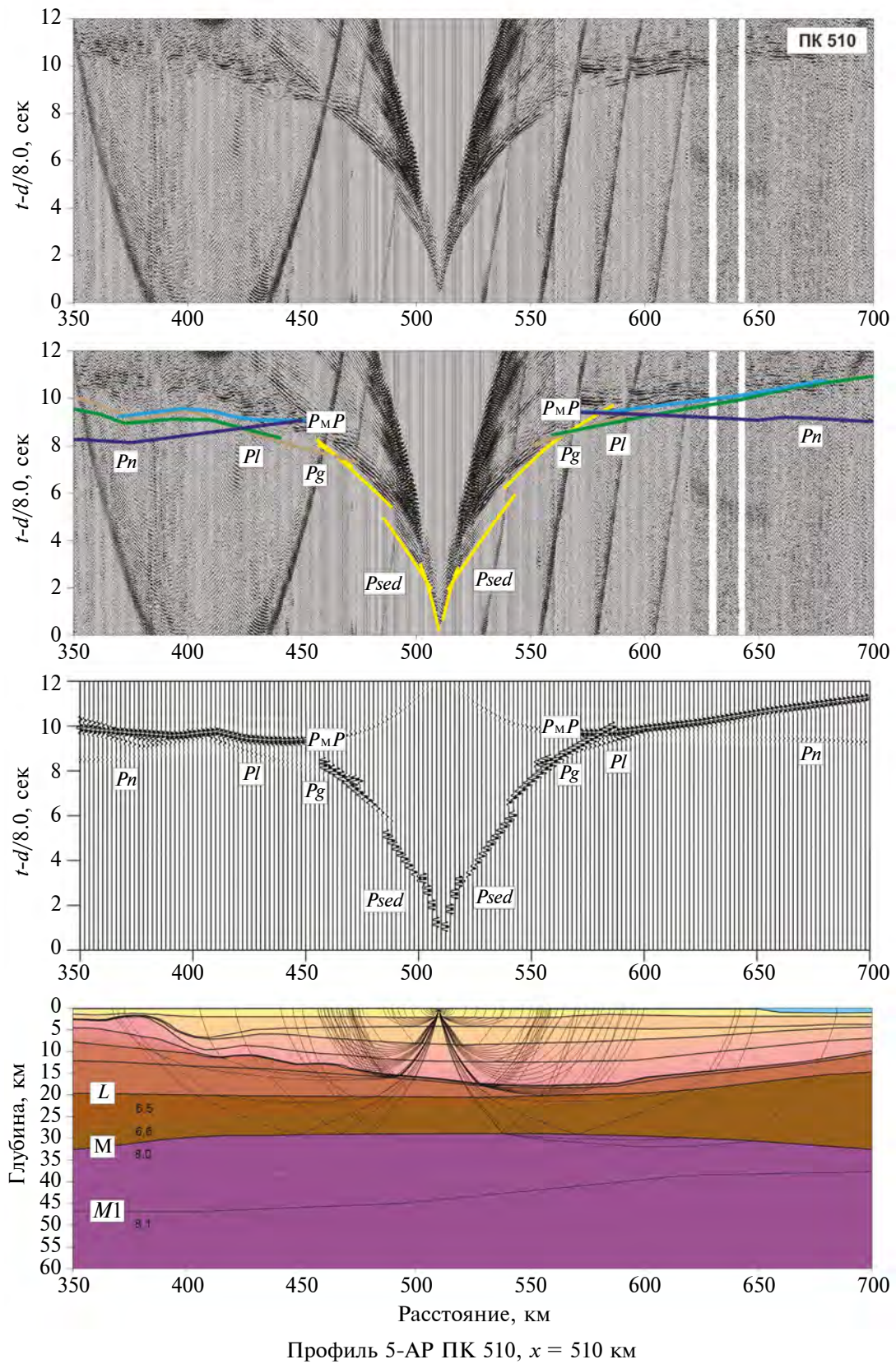


Рис. 5. Описание процесса построения скоростного разреза по профилю 5-АР на примере пункта взрыва ПВ510. Условные обозначения — на рис. 3.

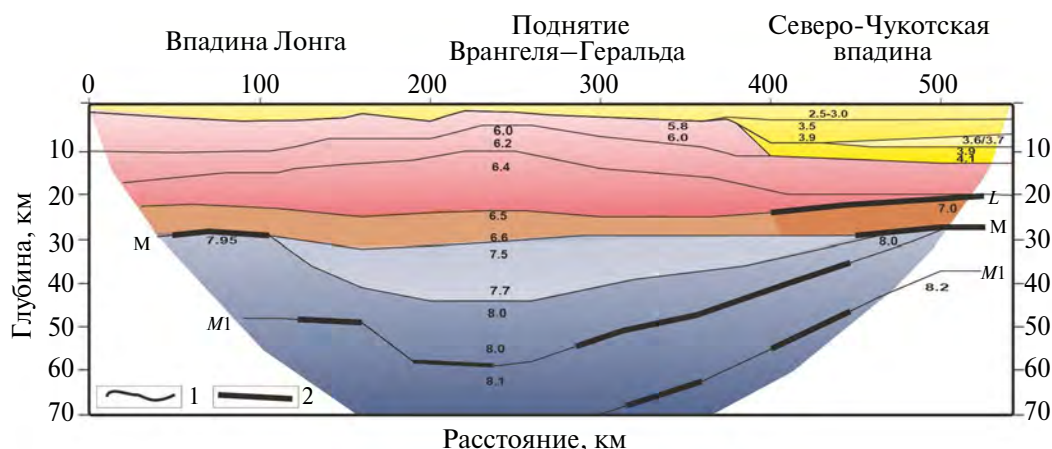


Рис. 6. Окончательный скоростной разрез, построенный по профилю 5-АР: 1 — изолинии скорости; 2 — отражающие границы.

Поскольку расстояние источник—приемник при регистрации этих волн гораздо больше, чем глубина до границы, для их миграции был создан специальный алгоритм, основанный на конечно-разностном решении волнового уравнения на специальных сетках, согласованных с формой лучей регистрируемых волн для заданной скоростной модели. Достоверность построений оценивается в процессе моделирования по тому, насколько четко вырисовываются на волновом изображении структурные особенности изучаемой среды, при этом оценивается и достоверность использованного скоростного разреза [Пилипенко, 1991].

Описанная методика была успешно применена для миграции волновых полей при обработке материалов ГСЗ в самых разных регионах: на Балтийском шите [Пилипенко и др., 1999; 2010; Pilipenko et al., 1999], в Балтийском и Охотском морях [Pavlenkova et al., 2009], в районе Днепровско-Донецкой впадины [Pilipenko et al., 2011], в западной части Северной Америки [Пилипенко и др., 2006]. При этом были разработаны методические особенности такой миграции для разных типов сейсмических волн и для разных видов экспериментальных материалов [Верпаховская и др., 2013]. В результате были показаны большие возможности этой методики для изучения сложных структурных особенностей земной коры и верхов мантии, а также для определения тектонической природы этих особенностей.

3.2. Результаты построения волновых изображений земной коры и верхов мантии по профилю 5-АР

На рис. 7а приведено волновое изображение земной коры, построенное для профиля 5-АР.

Это изображение характеризуется регулярностью структурных построений, согласованной со скоростным разрезом. В начале профиля на глубине 30 км намечается граница М, но она резко обрывается на ПК 150. Глубже на изображении выделяется группа отражающих площадок, поднимающихся от глубины 60 км на ПК 200–300 км до глубины около 50 км под Северо-Чукотской впадиной. Эти площадки хорошо совпадают с отражающими границами на скоростном разрезе рис. 6, что подтверждает высокую достоверность этого разреза. Но на волновом изображении в районе поднятия Врангеля–Геральда никаких четко выраженных границ, которые можно было бы связывать с подошвой земной коры (глубина около 30–35 км) и с преломляющей границей с граничной скоростью 7.5 км/с, не выделено. Не выделяются и более глубокие преломляющие границы.

Однако на полученном волновом изображении в блоке Врангеля–Геральда на глубине более 40–45 км выделяется новый тип сейсмических границ, на которых меняется степень внутренней неоднородности среды. Такая граница выделена на волновом изображении в Северо-Чукотской впадине на глубине 10–12 км. Она соответствует смене “прозрачных” слоев осадочного чехла на мощную, не менее 5–7 км, толщу существенно неоднородного, “мутного” слоя.

На построенном волновом изображении новые данные получены по глубинным разломам (рис. 7б). Наиболее четко серия разломов выделяется в верхней части разреза, но некоторые из них (ПК 120, 170 и 320 км) прослеживаются на большую глубину в верхнюю мантию. При

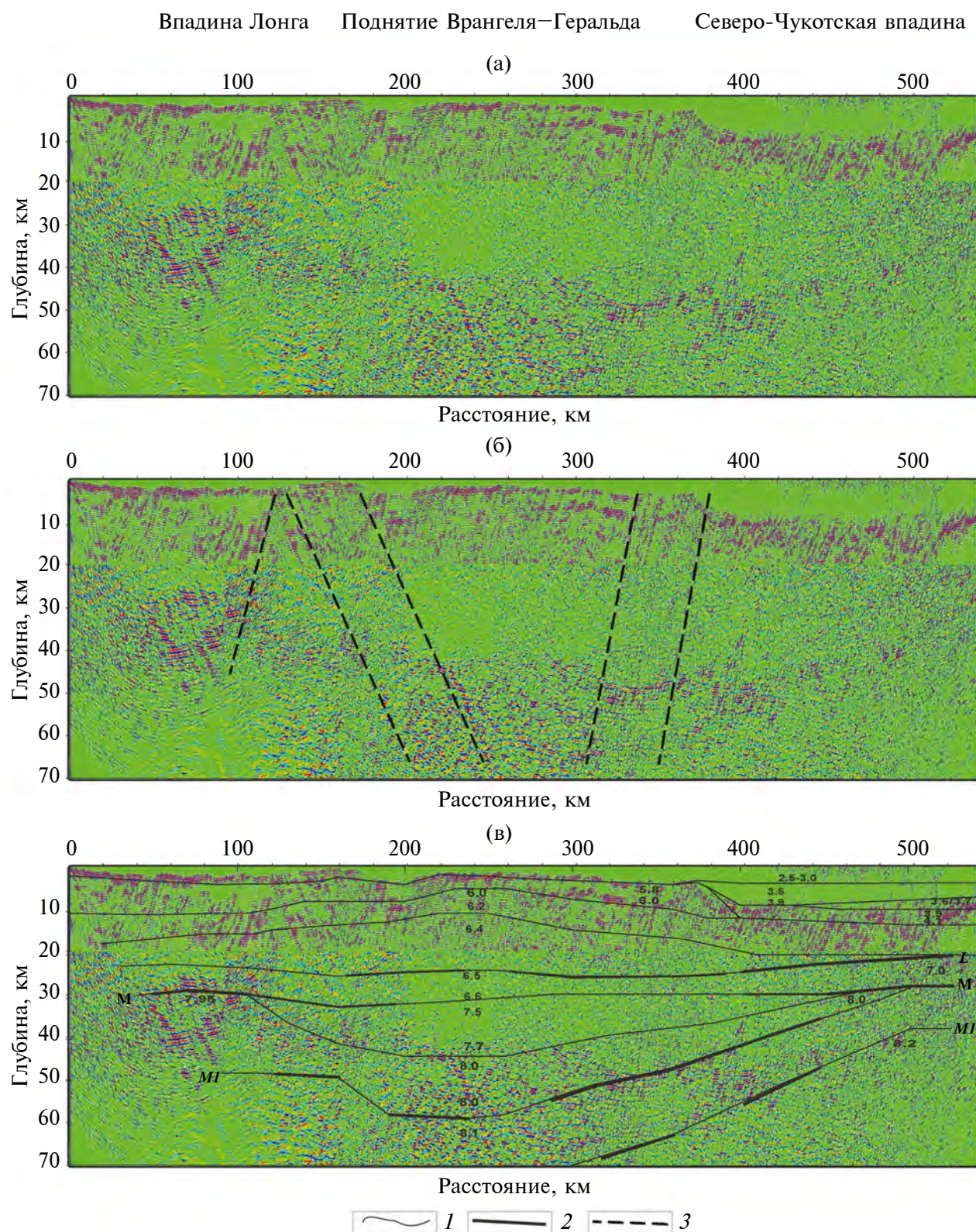


Рис. 7. Результаты миграции волн, записанных на профиле 5-АР на больших удалениях от источника: (а) — полученное волновое изображение; (б) — система глубинных разломов, выделенных в результате моделирования; (в) — сопоставление волнового изображения со скоростным разрезом; 1 — изолинии скорости; 2 — отражающие границы; 3 — глубинные нарушения (разломы).

этом сохраняется линейная форма этих разломов. Ранее никаких фактических данных о них получено не было. Самые крупные разломы связаны с широкими зонами нарушений по северной окраине впадины Лонга и по южному борту Северо-Чукотской впадины.

Таким образом, в результате проведенных построений выявлены следующие новые возможности метода миграции волновых полей для детального изучения структуры земной коры и верхней мантии:

- при миграции волн, зарегистрированных на больших удалениях от источника, в обработку включаются преломленные и закритические отраженные волны, которые раньше не использовались при обработке данных глубинных сейсмических исследований;

- миграция волновых полей позволяет выявить не только четкие отражающие границы, представленные сложно построенными расчлененными пачками, но и новый тип границ, выраженных в волновом изображении сменой внутренней неоднородности вещества;

- миграция волновых полей позволяет выделить в земной коре глубинные нарушения (трещины) платформенного типа, недоступные обычным исследованиям;

- волновые изображения позволяют увеличить достоверность скоростных разрезов, так как только при правильных скоростных моделях волны от опорных сейсмических границ при миграции складываются, а не разрушаются.

В целом все это позволяет более обоснованно разрабатывать новые модели геотектонического развития данного региона, используя при этом дополнительные данные других геологических и геофизических исследований.

4. ОБОБЩЕНИЕ СЕЙСМИЧЕСКИХ ДАННЫХ О СТРУКТУРЕ И ДИНАМИКЕ ЗЕМНОЙ КОРЫ СЕВЕРО-ЧУКОТСКОЙ ОБЛАСТИ АРКТИЧЕСКОГО БАССЕЙНА

По полученным на континенте и в шельфовой зоне Арктического бассейна геолого-геофизическим данным установлено, что по структуре и динамике земной коры Северо-Чукотская шельфовая зона существенно отличается от западных шельфовых областей. Это объяснялось тем, что западные области граничат на континенте с древними платформами, Восточно-Европейской и Западно-Сибирской, а Северо-Чукотская

область — с Северо-Чукотской горной системой. Расположение Северо-Чукотской впадины вдоль разлома предполагало возможную историю ее развития как рифтовой впадины. В связи с этим сложное геодинамическое развитие предполагалась и для всего Северо-Чукотского шельфа, который назывался террейном [Кашубин и др., 2018].

Однако новый, более детальный скоростной разрез и волновое изображение земной коры и верхней мантии, полученные по профилю 5-AP (рис. 6), и данные ОГТ, полученные для Северо-Чукотской впадины по профилю Dream-Line, позволяют предложить другую, более обоснованную геодинамическую историю развития этого региона. Так, по данным ОГТ Северо-Чукотская впадина шириной 300–400 км в самой глубокой части характеризуется плоским дном и спокойным залеганием осадочных слоев. Такое строение типично для многих глубоких впадин Евразии, образовавшихся в платформенных областях [Кашубин и др., 2018; Павленкова и др., 2016]. Характерной особенностью для платформенных впадин является также сокращение мощности гранито-гнейсового слоя и увеличение скоростей в глубоких частях фундамента. Вдоль всей Северо-Чукотской впадины внутри консолидированной части коры на глубине около 20 км тоже выделяется слой с повышенными скоростями, более 7.0 км/с (рис. 6).

Платформенный тип земной коры характерен и для блока Врангеля–Геральда. Это следует из структурных особенностей глубинных разломов, выделенных в этом блоке. По волновому изображению это разломы-трещины строго прямолинейной формы.

Но отличительной особенностью Северо-Чукотской шельфовой области является необычная структура верхней мантии. По результатам обработки волн, зарегистрированных на больших удалениях от источников, в этой области в районе поднятия Врангеля–Геральда подошва земной коры, граница М, не прослеживается, а на ее глубине выявлена широкая зона пониженных скоростей, 7.5 км/с (рис. 6). Эти anomalно низкие скорости наблюдаются до глубины более 40 км. Такая структура земной коры и верхов мантии характерна для тектонически активных регионов, и она объясняется обычно повышенным температурным режимом таких регионов.

Для объяснения природы anomalного строения верхней мантии Северо-Чукотской шельфовой зоны большое значение

имеют данные, полученные в результате миграции волновых полей, о внутренней неоднородности мантийного вещества, его “прозрачности”. Этот параметр является качественной характеристикой степени жесткости или пластичности вещества. В жестком веществе между крупными неоднородностями долго сохраняются устойчивые пробелы, при повышенной пластичности эти пробелы постепенно затягиваются, и вещество становится “прозрачным”. То есть “прозрачная” область на глубине 20–45 км на профиле 5-АР соответствует повышенной пластичности вещества, глубже это вещество стабилизировалось, и восстановилась его “мутность”.

Описанное аномальное строение верхней мантии наиболее достоверно можно объяснить процессами преобразования мантийного вещества энергоемкими глубинными флюидами, которые повышают пластичность вещества, увеличивают его объем и меняют другие его петрофизические характеристики. Эти процессы уже хорошо изучены и описаны в публикациях [Летников, 2000; Кронрад, Кусков, 2006; Флюиды..., 2006; Pavlenkova, 2022]. Изменения пластичности мантийного вещества и его объема могут быть основным фактором медленных подвижек отдельных блоков коры, формирования разломов-трещин платформенного типа и разрушения сейсмических границ, например, границы М.

Потоками глубинных флюидов можно объяснить и формирование глубокой Северо-Чукотской впадины платформенного типа. Впадина выделяется вдоль глубинного разлома, по которому формируются интенсивные флюидные потоки. Эти потоки несут с собой частицы тяжелого глубинного вещества, в результате плотность нижних слоев земной коры и верхов мантии увеличивается, но они медленно проседают, не нарушая платформенную структуру осадочного чехла.

Процессами, связанными с подъемом глубинных флюидов, можно объяснить и формирование протяженных, сложно построенных сейсмических границ в коре и в верхней мантии, например, границы *L* с повышенной до 7.0 км/с граничной скоростью в Северо-Чукотская впадине. Такие границы образуются на глубине резкого изменения проницаемости вещества. Потоки флюидов задерживаются на этой глубине, а вынесенные потоками частицы глубинного вещества увеличивают плотность этих слоев.

Таким образом, обработка материалов глубинных сейсмических исследований Северо-Чукотского региона методом миграции волновых полей позволяет предложить новую геодинамическую модель развития этого региона, основанную на ведущей роли потоков энергоемких глубинных флюидов в петрофизических преобразованиях вещества земной коры и верхней мантии, в частности, его реологических свойств.

5. ВЫВОДЫ

Главные результаты проведенных в данной работе исследований используют новые экспериментальные данные о глубинном строении и динамике крупного региона Арктического бассейна, Северо-Чукотской шельфовой зоны. Эти исследования основаны на обработке ранее не использованного материала глубинного сейсмического зондирования (ГСЗ), на записях преломленных и отраженных волн, зарегистрированных на больших удалениях от источника. В результате был построен скоростной разрез этой шельфовой зоны до глубины 70 км и выявлено необычное строение верхней мантии в районе поднятия Врангеля—Геральда.

Отличительной особенностью проведенных исследований является использование для обработки данных ГСЗ нового метода миграции волновых полей с построением волновых изображений не только земной коры, но и верхней мантии. Полученные волновые изображения позволяют повысить достоверность построенных ранее скоростных разрезов и дополнить их множеством новых структурных особенностей. Наиболее важным дополнением являются данные о реологических свойствах верхней мантии. Основаны они на новом параметре, степени “мутности” волнового изображения, характеризующего внутреннюю неоднородность вещества, его жесткость или пластичность. Показано, что повышенная “прозрачность” с отсутствием сейсмических границ, включая границу М, характерна для зоны малых скоростей в верхней мантии.

Полученный в результате проведенной обработки новый фактический материал позволяет определить возможную геотектоническую природу и динамику формирования крупного региона Арктики и сделать ряд важных выводов о природе новых неизвестных ранее структурных особенностей земной коры и верхней мантии этого необычного морского бассейна. Ведущая роль в этой модели отводится потокам энергоемких глубинных флюидов, которые меняют

петрофизические свойства вещества, повышают его пластичность и увеличивают его объем. Увеличенная пластичность уменьшает внутреннюю неоднородность вещества и разрушает сейсмические границы, а увеличение объема вещества вызывает подвижки локальных блоков коры с формированием в ней разломов-трещин.

Следует отметить также, что полученные новые данные о характере тектонических движений в Северо-Чукотском регионе имеют большое значение для решения ряда практических задач Арктического бассейна. Например, большая мощная кора платформенного типа явилась основой для определения северной границы российского государства. Данные о внутренней неоднородности вещества коры, о глубоких зонах повышенной проницаемости глубинных флюидов имеют большое значение при планировании и проведении нефтепоисковых работ. Наконец, данные о структуре глубинных разломов платформенного типа важны для оценки сейсмичности региона и разведки месторождений полезных ископаемых.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена в рамках Госбюджета ИФЗ РАН.

БЛАГОДАРНОСТИ

Данная работа посвящается памяти выдающегося ученого В.Н. Пилипенко, создавшего еще в 60-е годы прошлого века первые программы лучевого моделирования, а в конце века — новый метод миграции волновых полей, зарегистрированных на больших удалениях от источника. Нужно отметить также работы по этой тематике О.О. Верпаховской, основной сотрудницы В.Н. Пилипенко.

Автор благодарит сотрудницу Петербургского института ВСЕГЕИ Т.М. Яварову за помощь в сборе материалов по изученности Северо-Чукотского региона и подготовку нужных рисунков, а также Г.А. Павленкову и Е.В. Казейкину за оформление и помощь в подготовке статьи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Белюсов В.В., Павленкова Н.И. Типы земной коры Европы и Северной Атлантики // Геотектоника. 1989. № 3. С. 3–14.
- Верпаховская А.О., Пилипенко В.Н., Коболев В.П. Особенности обработки морских сейсмических наблюдений с использованием конечно-разностной волноволновой миграции // Геофизический журнал. 2013. Т. 35. № 5. С. 187–195.
- Гамбурцев Г.А., Ризниченко Ю.В., Берзон И.С., Епинатьева А.М., Карус Е.В. Корреляционный метод преломленных волн. Изд-во АН СССР. 1952. 239 с.
- Кашубин С.Н., Павленкова Н.И., Петров О.В., Мильштейн Е.Д., Шокальский С.П., Эринчек Ю.М. Типы земной коры Циркумполярной Арктики // Региональная геология и металлогения. 2013. № 55. С. 5–20.
- Кашубин С.Н., Петров О.В., Мильштейн Е.Д. и др. Структура земной коры зоны сочленения поднятия Менделеева с Евразийским континентом по геофизическим данным // Региональная геология и металлогения. 2018. № 73. С. 6–18. № 74. С. 518.
- Кашубин С.Н., Т.С. Сакулина, Н.И. Павленкова, Ю.П. Лукашин. Особенности волновых полей продольных и поперечных волн при глубинных сейсмических исследованиях на акваториях // Технологии сейсморазведки. 2011. № 4. С. 88–102.
- Кронрод В.А., Кусков О.Л. Определение тепловых потоков и генерации радиогенного тепла в коре и литосфере по сейсмическим данным и поверхностным тепловым потокам // Геохимия. 2006. № 10. С. 1119–1124.
- Летников Ф.А. Флюидный режим эндогенных процессов в континентальной литосфере и проблемы металлогении. Проблемы глобальной геодинамики / Д.В. Рунквист (отв. ред.). ГЕОС. 2000. С. 204–224.
- Николаев А.В. Сейсмика неоднородных и мутных сред. 1973. 174 с.
- Павленкова Н.И. Метод редуцированных годографов и математическое моделирование. Обратные кинематические задачи взрывной сейсмологии. 1979. С. 107–142.
- Павленкова Н.И., Кашубин С.Н., Павленкова Г.А. Земная кора глубоких платформенных впадин Северной Евразии и природа их формирования // Физика Земли. 2016. № 5. С. 150–164.
- Пилипенко В.Н. Численный вариант метода полей времен в современной сейсморазведке // Изв. АН СССР. Сер. Физика Земли. 1983. № 1. С. 36–82.
- Пилипенко В.Н. Разностные продолжения временных и волновых полей в задачах формирования изображений среды // Физика Земли. 1991. № 9. С. 96–104.
- Пилипенко В.Н., Верпаховская А.О., Гизе П., Павленкова Н.И. Формирование изображения среды по волновым полям ГСЗ по профилю CINCA-95 (Чили) // Геофизика. № 6. С. 16–20.
- Пилипенко В.Н., Верпаховская А.О., Старостенко В.И., Павленкова Н.И. Конечно-разностная миграция поля преломленных волн при изучении глубинного строения земной коры и верхней мантии по данным ГСЗ (на примере профиля DOBRE) // Физика Земли. 2010. № 11. С. 36–48.
- Пилипенко В.Н., Павленкова Н.И., Луосто У. Верпаховская А.О. Формирование изображений среды по сейсмограммам глубинного зондирования // Физика Земли. 1999. № 7/8. С. 164–176.

- Поселов В. А., Аветисов Г.П., Буценко В.В. и др. Хребет Ломоносова как естественное продолжение материковой окраины Евразии в арктический бассейн // Геология и геофизика. 2012. Т. 53. № 12. С. 1662–1680.
- Поселов В.А., Верба В.В., Жолондз С.М. Типизация земной коры Центрально-Арктических поднятий Северного Ледовитого океана // Геотектоника. 2007. № 4. С. 48–59.
- Поселов В.А., Каминский В.Д., Аветисов Г.П. и др. Глубинное строение континентальной окраины района поднятия Менделеева (Восточная Арктика) по результатам геолого-геофизических исследований на опорном профиле “АРКТИКА 2005”. Материалы Международного научно-практического семинара. Л.: Роснедра. 2007. Санкт-Петербург. ВСЕГЕИ. С. 163–167.
- Ризниченко Ю.В. Геометрическая сейсмика слоистых сред. Труды института теоретической геофизики АН СССР. М. 1946. Т. 11. Вып. 1.
- Сакулина Т.С., Верба М.Л., Кашубина Т.В., Крупнова Н.А., Табырца С.Н., Иванов Г.И. Комплексные геолого-геофизические исследования на опорном профиле 5-АР в Восточно-Сибирском море // Разведка и охрана недр. Л.: Недра. 2011. № 10. С. 1723.
- Сакулина Т. С. Кашубин С.Н., Петров О.В. и др. Глубинное строение земной коры и верхней мантии Северо-Чукотского прогиба по профилю ГСЗ Dream-line // Региональная геология и металлогения. 2016. № 68. С. 52–65.
- Сакулина Т.С., Павленкова Г.А., Кашубин С.Н. Структура земной коры северной части Баренцево-Карского региона по профилю ГСЗ 4-АР // Геология и геофизика. 2015. Т. 56. № 11. С. 2053–2066.
- Тектоностратиграфический атлас Восточной Арктики / О.В. Петров (отв. ред.). М: Смелроп. Санкт-Петербург: ВСЕГЕИ. 2020. 152 с. ISBN 978-5-93761-296-0
- Флюиды и геодинамика / Ю.Г. Леонов, И.Г. Киссин, В.Л. Русинов (отв. ред.). Геологический институт РАН. М.: Наука. 2006. 283 с.
- Яварова Т.М. Глубинное строение Северо-Чукотского прогиба по данным морских многоволновых сейсмических исследований. Дис. ... канд. геол.-мин. наук. Санкт-Петербург. Всероссийский научно-исследовательский геологический институт им. А.П. Карпинского (ФГБУ ВСЕГЕИ). М. 2021. 184 с.
- Červený V., Pšenčík I. SEIS 83-numerical modelling of seismic wave fields in 2-D laterally varying layered structure by the ray method. Documentation of Earthquake Algorithms, World Data Cent. A. for Solid Earth Geophys / Engdahl E.R. (ed.). 1983. Boulder. Rep. SE-35. P.36–40.
- Kashubin S., Petrov O., Kaminsky V., Poselov O. Maps of deep crustal structure as Integral Part of TeNAr. Arctic Ocean Workshop. Copenhagen Nov. Federal Agency of Mineral Resources of RUSSIA. 2011.
- Pavlenkova N.I. Structure of the Earth's crust and upper mantle and problems of global geodynamics // Tectonophysics. 2022. V. 837. P.1–17.
- Pavlenkova N.I., Pilipenko V.N., Verpakhovskaja A.O., Pavlenkova G.A., Filonenko V.P. Crustal structure in Chile and Okhotsk Sea regions // Tectonophysics. 2009. V. 472. P. 28–38
- Petrov O., Morozov A., Shokalsky S. et al. Crustal structure and tectonic model of the Arctic region. Earth-Science Reviews. 2016. V. 154. P. 29–71.
- Pilipenko V.N., Pavlenkova N.I., Luosto U. Wide-angle reflection migration technique with an example from the POLAR profile (northern Scandinavia) // Tectonophysics. 1999. V. 308. P. 445–457.
- Pilipenko V.N., Verpakhovska O.O., Starostenko V.I. , Pavlenkova N.I. Wave images of the crustal structure from refractions and wide-angle reflections migration along the DOBRE profile (Dnieper-Donets paleorift) // Tectonophysics. 2011.V. 508. P. 96–105.
- Roslov Yu.V., Sakoulina T.S., Pavlenkova N.I. Deep seismic investigations in the Barents and Kara Seas // Tectonophysics. 2009. V. 472. P. 301–308.
- Sakoulina T.S., Telegin A.N., Tichonova I.M., Verba M.L., Matveev Y.I., Vinnik A.A. Kopylova A.V., Dvornikov L.G. The results of deep seismic investigations on geotraverse in the Barents Sea from Kola Peninsula to Franz Joseph Land // Tectonophysics. 2000. V. 329. P. 319–331.

Crustal Structure of the North Chukchi Sea Arctic Shelf from Refraction and Reflection Migration (Profile 5-AR)

N. I. Pavlenkova

*Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, Moscow, 123242 Russia
e-mail: ninapav@mail.ru*

Received September 19, 2023; revised September 11, 2024; accepted September 23, 2024

Abstract — Deep seismic studies along the 5-AR profile were conducted in the Arctic northeastern shelf zone from the Chukchi folded region in the continent to the deep North Chukchi Trough. The measured data from the profile were processed using mathematical modeling based on the traveltimes field method and long-offset refraction and reflection migration. As a result, new features of the crustal structure and upper mantle of the region were identified with high confidence, and the rheological properties, degree of rigidity or plasticity of the material composing these features were determined. This has allowed a new model of the probable geodynamic history of the development of this region to be proposed.

Keywords: refracted and reflected waves, wave images, wavefield migration, Earth's crust, upper mantle, deep troughs