

Т. С. САКУЛИНА (Севморгео), С. Н. КАШУБИН, О. В. ПЕТРОВ (ВСЕГЕИ),
А. Ф. МОРОЗОВ (Роснедра), Н. А. КРУПНОВА, Н. Т. ДЕРГУНОВ,
А. В. РАЗМАТОВА, С. Н. ТАБЫРЦА (Севморгео),
Т. В. КАШУБИНА, Т. М. ЯВАРОВА (ВСЕГЕИ)

Глубинное строение земной коры и верхней мантии Северо-Чукотского прогиба по профилю ГСЗ Dream-line

В 2009 г. ФГУ НПП «Севморгео» по заказу компании British Petroleum выполнило глубинные сейсмические зондирования (ГСЗ) с донными станциями по профилю Dream-line протяженностью 925 км в Восточно-Сибирском и Чукотском морях. С использованием материалов этих исследований и фоновых данных MOB OGT по профилям RU2-1350, OGT-2 и ARS10Z01, частично совпадающих с линией профиля ГСЗ Dream-line, построены скоростные модели V_p и V_p/V_s земной коры и верхней мантии Северо-Чукотского прогиба. В разрезе земной коры выделены осадочный чехол (V_p от 1,6–1,9 км/с в верхней части до 4,8–5,6 км/с на его подошве, V_p/V_s от 1,9 до 2,4); промежуточный (метаосадочный) комплекс ($V_p = 4,6–6,0$ км/с, $V_p/V_s = 1,8–1,9$); верхняя кристаллическая кора ($V_p = 6,0–6,4$ км/с, $V_p/V_s = 1,73–1,75$); нижняя кристаллическая кора ($V_p = 6,6–7,2$ км/с, $V_p/V_s = 1,73–1,74$); верхняя мантия ($V_p = 8,0–8,1$ км/с). Средняя мощность земной коры вдоль профиля Dream-line 28–30 км, причем значительную часть (от 7 до 16 км) составляет осадочный чехол. Такие скоростные параметры и мощность земной коры Северо-Чукотского прогиба типичны для земной коры континентальных глубоких впадин.

Ключевые слова: *глубинные сейсмические зондирования, Северо-Чукотский прогиб, обменные волны, лучевое моделирование, земная кора глубоких впадин.*

T. S. SAKULINA (Sevmorgeo), S. N. KASHUBIN, O. V. PETROV (VSEGEI),
A. F. MOROZOV (Rosnedra), N. A. KRUPNOVA, N. T. DERGUNOV,
A. V. RAZMATOVA, S. N. TABYRTCA (Sevmorgeo),
T. V. KASHUBINA, T. M. YAVAROVA (VSEGEI)

Deep structure of the Earth's crust and the upper mantle of the North Chukchi Basin of the DSS Dream-line Profile

Deep seismic sounding (DSS) studies with ocean bottom seismometers were conducted by FGU NPP Sevmorgeo for the British Petroleum in 2009. DSS Dream-line Profile having the length of 925 km is located in the East Siberian and Chukchi seas along the North Chukchi Basin. V_p and V_p/V_s velocity models of the Earth's crust and uppermost mantle of the North Chukchi Basin were constructed using seismic data of these studies and fund data of the multichannel seismic (MCS) profiles RU2-1350, CMP-2 and ARS10Z01, partly coinciding with the direction of the DSS Dream-line Profile. Crustal cross-section consists of sedimentary cover ($V_p = 1.6–1.9$ km/s at the top to 4.8–5.6 km/s at the bottom, V_p/V_s from 1.9 to 2.4); intermediate (metasedimentary) complex (V_p 4.6–6.0 km/s, $V_p/V_s = 1.8–1.9$); the upper crystalline crust (V_p 6.0–6.4 km/s, V_p/V_s 1.73–1.75); lower crystalline crust (V_p 6.6–7.2 km/s, $V_p/V_s = 1.73–1.74$); uppermost mantle (V_p 8.0–8.1 km/s). The average thickness of the Earth's crust along the Dream-line Profile is about 28–30 km, and a significant part (7–16 km) corresponds to the sedimentary cover. Such velocity parameters and thickness of the North Chukchi Basin crust are typical of the continental crust of deep depressions.

Keywords: *deep seismic sounding, North Chukchi Basin, converted waves, ray-tracing modeling, the Earth's crust of the deep basins.*

Введение. Моря Восточной Арктики геофизически слабо изучены. Систематические геофизические исследования в регионе проводились в период Международного геофизического года (МГГ) с 1957 по 1962 г. В результате акватория моря Лаптевых и западная половина Восточно-Сибирского моря были покрыты магнитной съёмкой масштаба 1 : 1 000 000. Сейсмические исследования по довольно плотной сети наблюдений проводились в море Лаптевых, но в Восточно-Сибирском и Чукотском морях оставалась лишь

редкая сеть рекогносцировочных и региональных профилей [1].

В 2009 г. ФГУ НПП «Севморгео» по заказу компании British Petroleum в рамках международного российско-британского сотрудничества, осуществляемого научными учреждениями Российской Федерации и Великобритании, был отработан профиль глубинных сейсмических зондирований (ГСЗ) Dream-line в Восточно-Сибирском и Чукотском морях. Профиль проходит с северо-запада на юго-восток в пределах мощных осадочных бассейнов

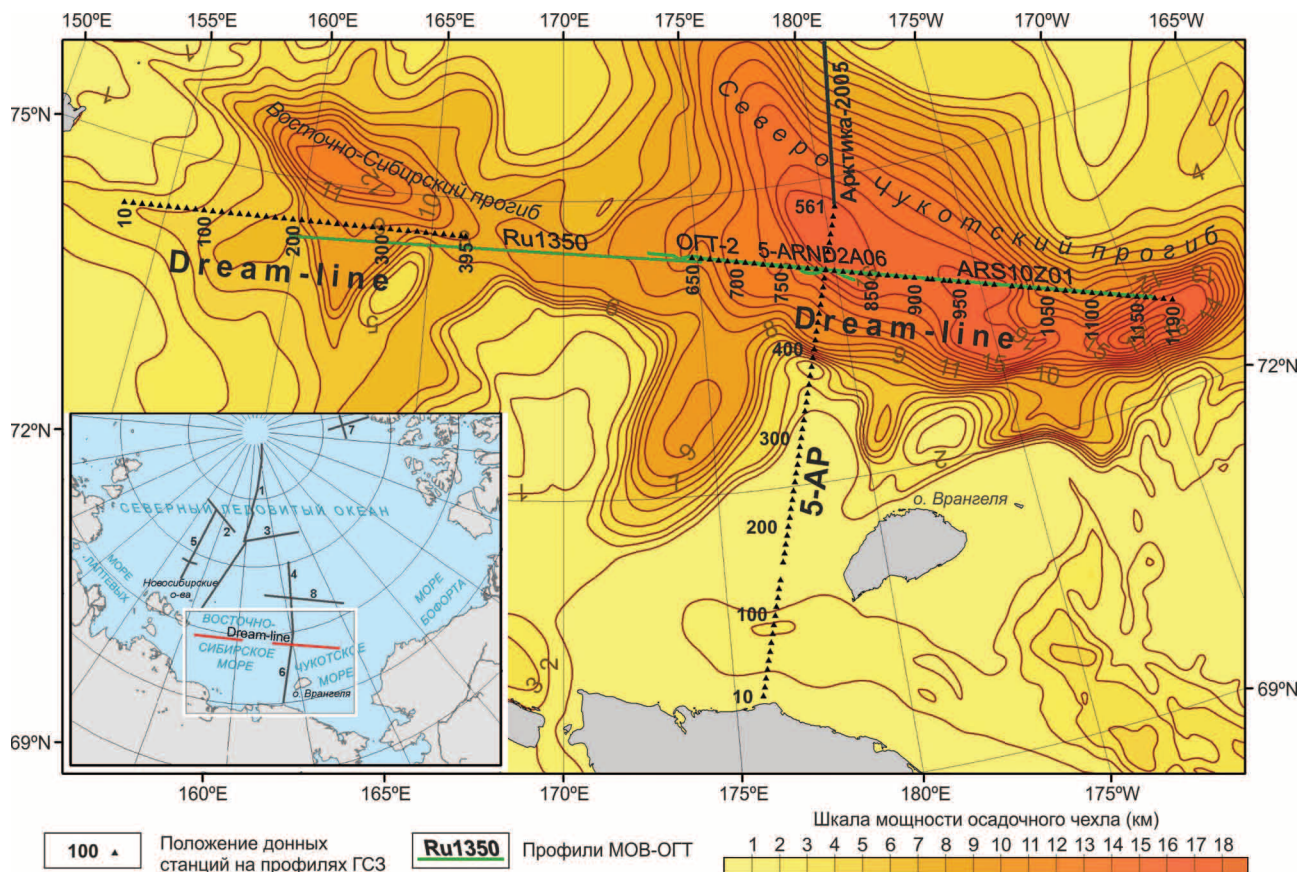


Рис. 1. Схема расположения профиля ГСЗ Dream-line на карте мощности осадочного чехла Циркумполярной Арктики [11, 14]

На врезке указаны номера профилей ГСЗ: 1 – Трансарктика 89-91 [7, 12]; 2 – Трансарктика-92 [7]; 3 – Арктика-2000 [7, 13]; 4 – Арктика-2005 [7]; 5 – Арктика-2007 [7]; 6 – 5-AP [8]; 7 – ARTA [10]; 8 – Арктика-2012 [4]

в Восточно-Арктическом регионе (рис. 1). Целью исследований было изучение тектонической эволюции континентальных окраин России, структуры земной коры в районе Восточно-Сибирского и Чукотского морей, а также создание основы для построения геодинамической модели развития этой части Арктики. Стояли серьезные задачи изучения строения земной коры на всю ее мощность, включая выявление основных границ раздела в земной коре ниже мощного осадочного чехла (поверхности фундамента, границ внутри консолидированной коры, границы Мохо) и увязку с ранее отработанным опорным профилем 5-AP [8] в месте их пересечения.

В статье приводится краткая информация о методике полевых работ и обработке данных ГСЗ по профилю Dream-line и МОВ ОГТ по профилям, частично совпадающим с профилем Dream-line; рассмотрены особенности волновых полей ГСЗ, скоростная модель земной коры и верхней мантии Северо-Чукотского прогиба, построенная по данным ГСЗ с учетом исследований МОВ-ОГТ.

Методика полевых наблюдений. Исследования ГСЗ выполнялись с целью изучения земной коры на всю ее мощность по обращенной системе наблюдений с перемещающимся по профилю источником возбуждения и неподвижными приемными устройствами. Технология проведения работ состоит в расстановке автономных донных сейсмических станций (АДСС), прохождении судна по профилю

с возбуждением упругих колебаний и подъеме АДСС.

На профиле Dream-line наблюдения ГСЗ были выполнены с двумя расстановками донных станций на двух участках общей протяженностью 925 км (рис. 1): западном (10–395 км по профилю) и восточном (650–1190 км по профилю). Разрыв линии наблюдений связан со сложной ледовой обстановкой во время проведения полевых работ.

Для записи сигналов использовались АДСС с четырехкомпонентной регистрацией – три компонента вектора смещения X , Y , Z (геофоны) и одна компонента всестороннего сжатия H (гидрофон). Шаг между станциями по профилю 10 км. Сейсмическая информация получена в 92 точках постановки донных станций, в том числе на 40 станциях в западной части профиля и 52 станциях в восточной.

Для возбуждения сейсмических сигналов применялся пневмоисточник СИН-6 (СИН-6М) объемом 80 и 120 л, буксируемый в воде на глубине 20–37 м. Временной интервал между возбуждениями составлял 2 мин (в плане 250 м), регистрация сейсмических колебаний от каждого возбуждения осуществлялась в течение 60 с с шагом дискретизации 8 мс. Полезные волны зарегистрированы на удалениях от источника в основном на 200–250 км.

На профиле 5-AP работы ГСЗ проводились по аналогичной методике. Протяженность профиля 550 км, сейсмические записи получены на 55 донных станциях. Полезные волны зарегистрированы

Полевые работы МОВ-ОГТ на профилях, совпадающих или близких к линии наблюдений ГСЗ Dream-line

Показатели	RU2-1350	ОГТ-2	ARS10Z01	5-AP, 5-ARND2A06
<i>Приемное устройство</i>				
Тип сейсмической косы	SEAL Sentinel Fluid, 24 bit	Sercel SEAL Streamer	Sercel SEAL	SEAL Sentinel Solid, 24 bit
Количество каналов	408	48	636	648
Шаг между центрами групп, м	25	12,5	12,5	12,5
Минимальное удаление, м	125	100	100	130
Максимальное удаление, м	10 300	688	8038	8217,5
Активная длина косы, м	10 200	600	7950	8100
<i>Источник колебаний</i>				
Тип источника	G-Gun	BOLT APG 8500 SERIES	Tuned Bolt array	Input/Output Sleeve guns
Суммарный объем пушек, куб. дюймов	4820	2050	5000	4010
Рабочее давление, psi	2000	2000	2000	2000
Интервал возбуждения, м	50	50	37.5	50
Кратность ОГТ	102	6	106	81
<i>Параметры регистрации</i>				
Длина записи, с	18	15	12	15
Шаг дискретизации, мс	2	2	2	2
Формат записи	SEG-D 8058	SEG-D 8058 IEEE	SEG-D 8058 IEEE	SEG-D 8058

на удалениях источник-приемник в среднем на 200 км; на некоторых зондированиях максимальные удаления достигают 300–400 км; в северной части профиля удаления, на которых прослежены полезные волны, уменьшаются до 100–180 км [8].

Исследования МОВ-ОГТ непосредственно по профилю Dream-line не проводились. Позднее, в 2010–2012 гг., в этом регионе выполняли работы МОВ ОГТ разные организации. При построении модели земной коры по профилю Dream-line использовались сейсмические материалы МОВ ОГТ по профилям, которые совпадают или близки по своему положению с профилем ГСЗ Dream-line (рис. 1): *профиль ARS10Z01* (2010 г., исполнитель – ОАО «Дальморнефтегеофизика» по договору с СВКНИИ ДВО РАН), *профиль RU2-1350* (2012 г., исполнитель – ОАО «Севморнефтегеофизика» по договору с ОАО «ГНИНГИ»), *профиль ОГТ-2* (2012 г., исполнитель – компания WGP Exploration Limited по договору с АО «Севморгео»).

Кроме того, в 2008 г. при комплексных геофизических исследованиях на опорном профиле 5-AP (АО «Севморгео») выполнены работы МОВ ОГТ на его субширотной рассечке 5-ARND2A06, частично перекрывающей профили ОГТ-2 и ARS10Z01. Краткие сведения о методике полевых работ на всех перечисленных профилях приведены в таблице.

Обработка сейсмических материалов МОВ-ОГТ.

Сейсмические материалы МОВ ОГТ по вышерассмотренным профилям обработаны в АО «Севморгео» в системе Focus 5.4 Paradigm Geophysical. Обработка данных МОВ ОГТ была направлена прежде всего на повышение информативности сводного сейсмического разреза осадочного чехла с целью уточнения модели строения верхней части разреза земной коры по профилю ГСЗ Dream-line.

Обработка сейсмических данных по всем профилям выполнялась по единому графу (за исключением профиля ОГТ-2, обработанного с короткой косой 600 м). Стандартный граф обработки был расширен включением таких процедур, как преобразование Радона в режиме моделирования и вычитания энергии кратных волн из входных сейсмических записей, миграция Кирхгофа до суммирования, деконволюция по разрезу в F-X области и др.

При работе над фондовыми материалами МОВ-ОГТ использовались два подхода:

- обработка каждого из профилей МОВ-ОГТ отдельно с последующей их сшивкой для формирования сводного разреза;

- обработка объединенного профиля, составленного путем сборки профилей в единый профиль на уровне исходных сейсмограмм с созданием единой геометрии.

Такая сборка предполагала исключение краевых эффектов при выполнении скоростного анализа и миграции до суммирования. Единый профиль был собран без исключения перекрытий отдельных интервалов. Однако из-за различий в системах наблюдений, технологии работ, технических средств объединение всех сейсмограмм в единый профиль привело к неравномерному шагу между точками CDP (6,25 и 12,5 м) и к значительным колебаниям кратности наблюдений (от 6 до 193) на разных участках объединенного профиля, а также к понижению разрешенности сейсмического разреза и к менее четкому выделению и прослеживанию сейсмических границ в областях стыковки профилей. В качестве окончательного был выбран сводный разрез, полученный путем объединения разрезов по отдельным профилям (рис. 2).

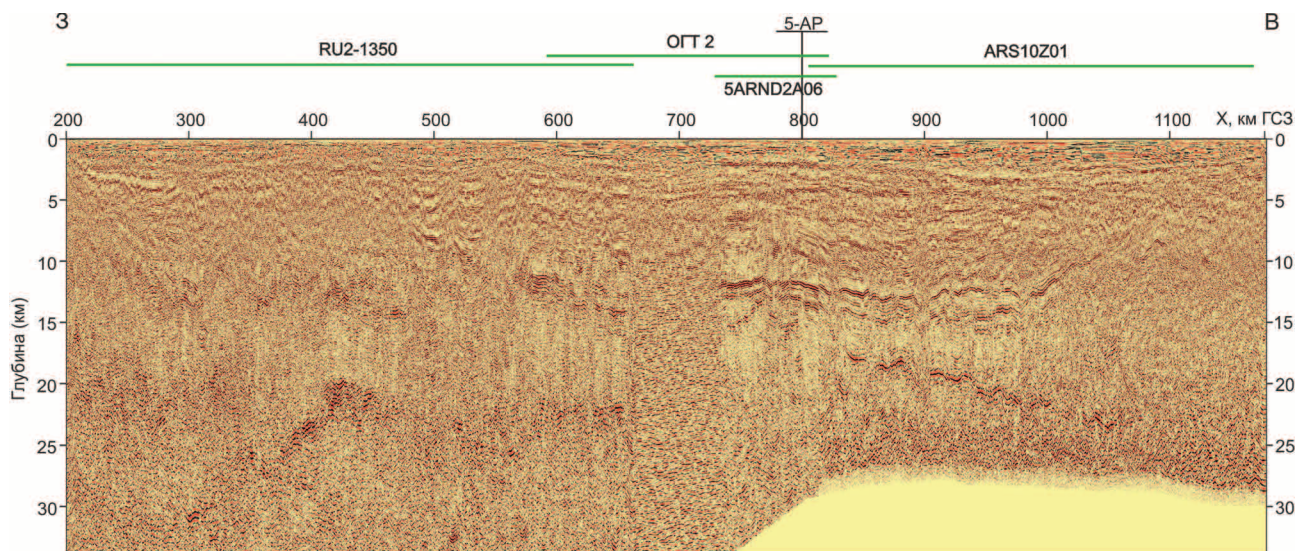


Рис. 2. Сводный глубинный сейсмический разрез МОВ ОГТ по профилю GC3 Dream-line

Над разрезом указаны номера профилей ОГТ и место пересечения с профилем GC3 5-AP (на 800 км)

Обработка сейсмических материалов GC3. Предварительно включалось преобразование записей донных регистраторов в сейсмограммы общей точки приема, ввод различных технологических поправок и формирование таблиц геометрии наблюдений.

Для сейсмических записей горизонтальных X -, Y -компонент осуществлялся пересчет волнового поля в радиальную R -компоненту (в плоскости распространения лучей) и трансверсальную T -компоненту (перпендикулярно к плоскости распространения лучей) [5]. Пересчет (поворот) горизонтальных компонент волнового поля выполнялся в системе обработки данных многокомпонентных скважинных сейсмических наблюдений 3С-INTERACT (НПП «ГЕТЭК», Москва). Угол поворота для каждого зондирования определялся по водной (прямой) волне P_0 или при малой глубине моря по головной волне, распространяющейся вдоль дна. Для расчета угла поворота использовались значения амплитуд X -, Y -, Z -компонент во временном окне 0,15 с на удалениях источник-приемник до 5–6 км.

Последующая динамическая обработка сейсмических записей всех компонент GC3 была направлена на повышение соотношения сигнал/шум и временной разрешенности сейсмозаписей для выделения в первых и последующих вступлениях преломленных (рефрагированных, головных) и отраженных (докритических, закритических) волн от границ в земной коре и верхней мантии. Обработка выполнялась в системе Focus 5.4 Paradigm Geophysical и включала следующие процедуры: частотная широкополосная фильтрация (2–4...24–40 Гц), ослабление аномальных амплитудных выбросов, деконволюция сжатия с последующей полосовой фильтрацией в более узкой полосе частот (2–4...12–16 Гц), нормирование амплитуд в заданном окне по среднему значению.

Подготовленные таким образом сейсмограммы зондирований использовались для кинематической обработки и интерпретации данных GC3.

Характеристика волновых полей GC3 (P-, PS- и S-волны). В результате анализа сейсмограмм GC3

были выделены основные волны, типичные для континентальной коры: волны, связанные с границами в осадочном чехле, с верхней и нижней консолидированной корой, а также с границей Мохо (рис. 3).

Продольные волны. В первых вступлениях на удалениях от источника до 40–60 км прослеживаются рефрагированные/преломленные волны с кажущимися скоростями от 1,7 до 5,5–5,8 км/с от границ в осадочном чехле (P_{sed}). После них в первые вступления выходят волны с кажущимися скоростями 5,8–6,4 км/с, связанные с верхней консолидированной корой (P_g), за которыми в первых, а иногда только в последующих вступлениях прослеживаются волны с кажущимися скоростями 6,7–7,2 км/с; эти волны связаны с нижней корой (P_L). На удалениях около 100–120 км в первые вступления выходит волна со скоростью около 8,0 км/с, преломленная в верхней мантии (P_n), но она наблюдается не на всех зондированиях.

Доминирующими волнами в последующих вступлениях являются отраженные волны от границы M ($P_M P$). Их отличительная особенность — амплитуда и многофазный характер записи. Годографы волны отличаются, как правило, хорошо выраженной криволинейностью и уменьшением кажущихся скоростей при увеличении расстояния источник-приемник; на больших удалениях они не превышают 6,8–7,2 км/с, что свидетельствует о значениях скоростей в нижней консолидированной коре, типичных для континентального типа коры.

Волны, связанные с нижней частью консолидированной коры, прослеживаются практически повсеместно, но часто они динамически очень слабо выражены. В последующих вступлениях с расстояний от источника 50–80 км наблюдается волна с характерной для годографов отраженных волн криволинейной формой ($P_L P$). Преломленная/рефрагированная волна P_L часто выпадает из годографов первых волн; тогда волна $P_L P$ может следовать за предыдущими волнами с разрывом по времени и становится первой вследствие затухания предыдущих волн.

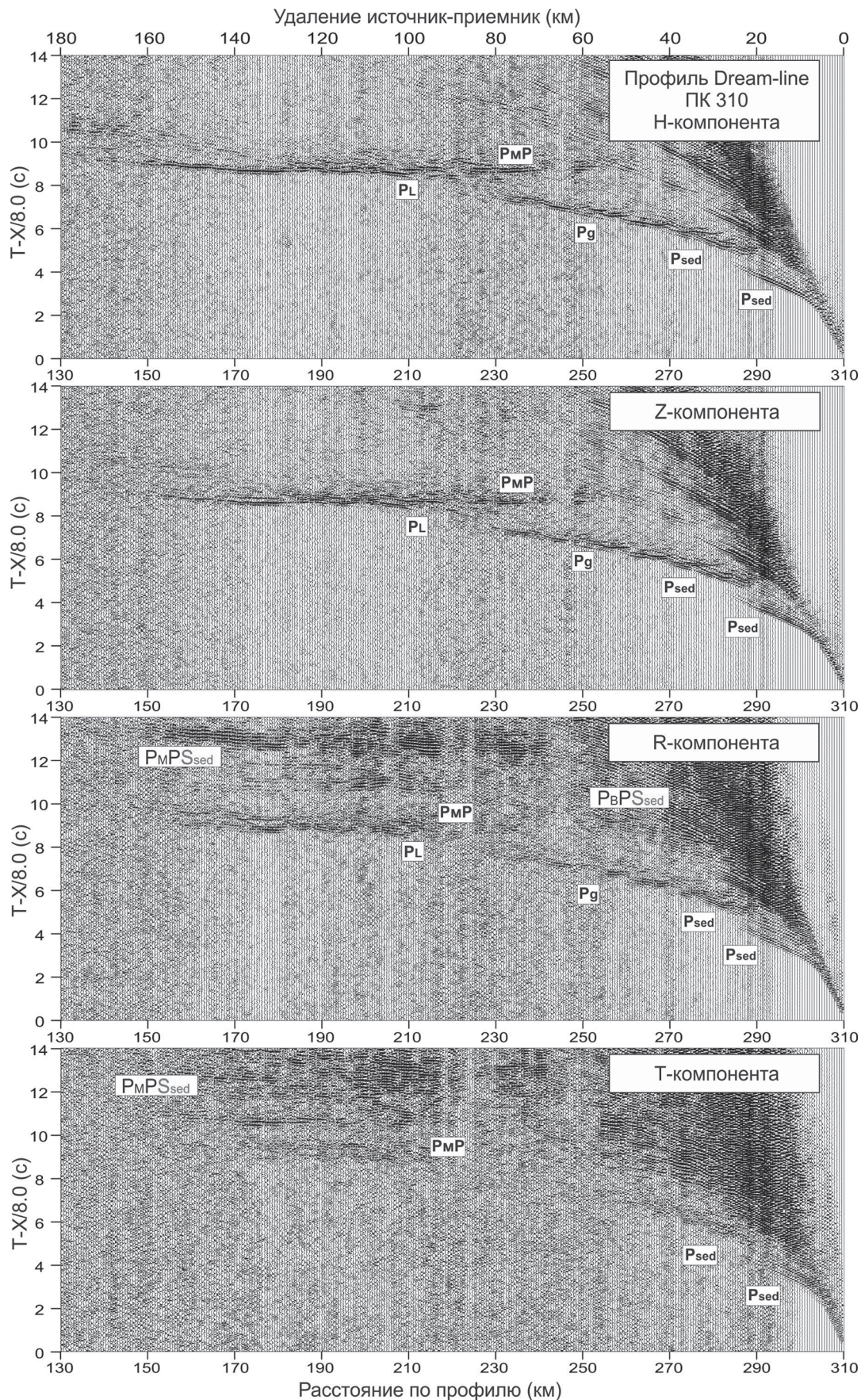


Рис. 3. Пример волновых полей ГСЗ, зарегистрированных ПК 310 на профиле Dream-line

P_{sed} – продольные головные (рефрагированные) волны в осадочном чехле; P_g – продольные головные волны по поверхности кристаллической коры; P_L – продольные рефрагированные волны в нижней части кристаллической коры; $P_M P$ – продольные отраженные волны от границы М; $P_B P_{sed}$, $P_M P_{sed}$ – обменные отраженные волны от верхней части кристаллической коры и от границы М

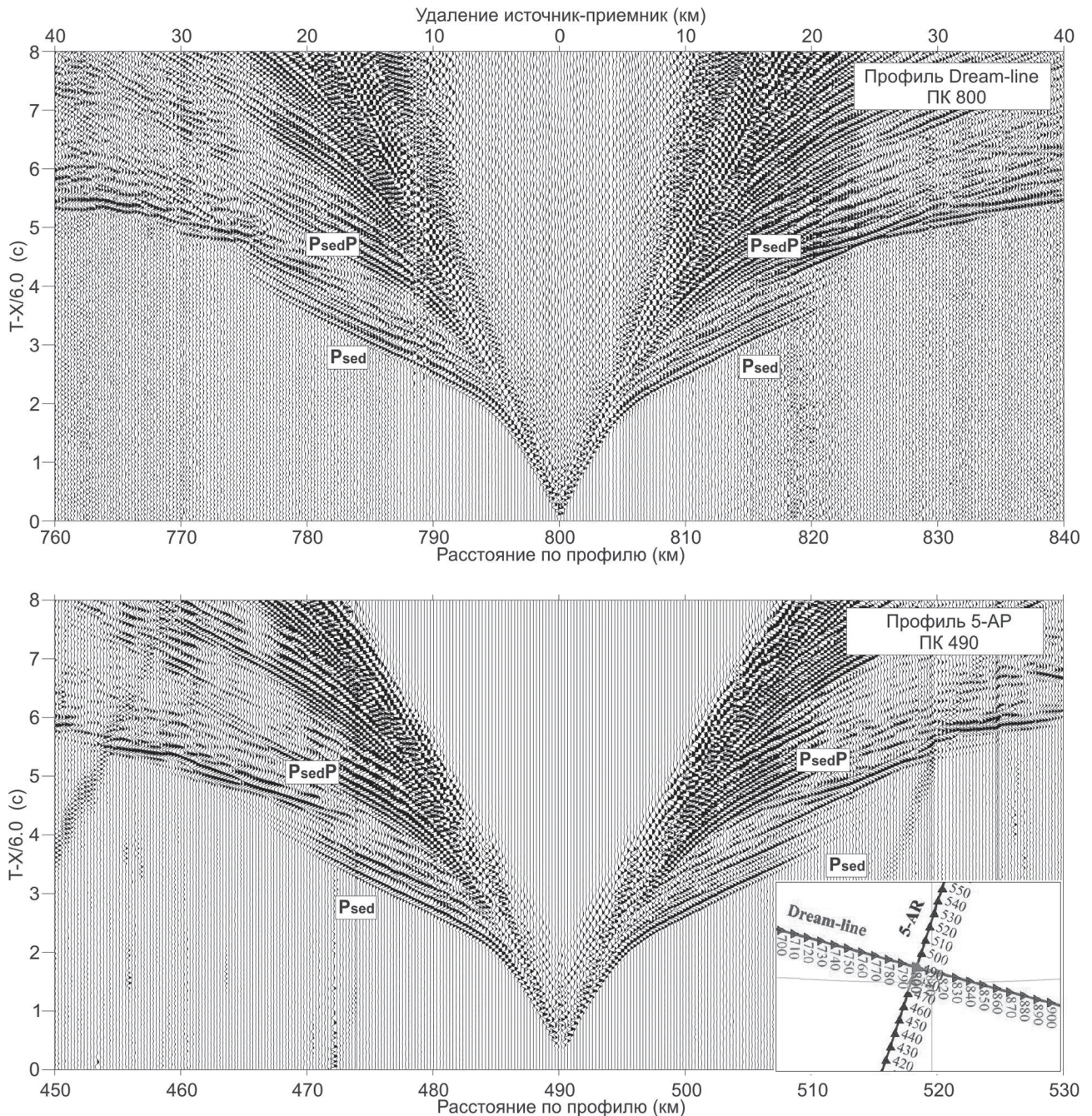


Рис. 4. Сопоставление волновых полей ГСЗ на пересечении профилей Dream-line и 5-AP

Psed – продольные головные (рефрагированные) волны в осадочном чехле, PsedP – продольные отраженные волны от границ в осадочном чехле

Волновое поле в восточной части профиля по сравнению с западной менее информативно для освещения нижней части земной коры, включая ее подошву, и носит более сложный характер.

Об основных особенностях, обуславливающих неоднозначность волнового поля.

На сейсмических записях АДСС 780-870, освещающих глубинное строение на интервале профиля ПК 820–900 км, волны от кровли консолидированной коры (фундамента) и от границы в нижней части коры приходят с близкими временами, что затрудняет разделение этих волн; на отдельных зондированиях отмечается выпадение волн от фундамента из первых вступлений. Это

свидетельствует об утонении верхней консолидированной коры.

На восточном конце профиля (ПК 1020–1190 км) волновое поле носит нерегулярный характер: криволинейная форма годографов, наличие дифрагированных волн, петли на годографах затрудняют корреляцию и разделение волн, а также отождествление волн, относящихся к одним и тем же границам. Такое неоднозначное волновое поле на сейсмограммах ГСЗ связано прежде всего со сложным геологическим строением осадочного чехла, что с очевидностью проявляется и на разрезе МОВ-ОГТ. Кроме того, в этой части профиля наблюдается уменьшение в целом кажущихся

скоростей волн, приуроченных к нижней части осадочного чехла.

Следует отметить одну особенность, проявляющуюся в волновых полях ГСЗ как в западной, так и в восточной частях профиля: на сейсмических записях на удалениях 15–30 км от центра зондирования наблюдается разрыв годографов в первых вступлениях. В западной части профиля разрыв годографов начинается с ПК 280 км, величина разрыва по времени увеличивается к ПК 340–350 км, а потом уменьшается к концу этой части профиля. К сожалению, отсутствие наблюдений ГСЗ на интервале профиля ПК 395–650 км не позволяет проследить, где кончается разрыв. В восточной части профиля разрыв годографов начинается с ПК 760–780 км, также сначала увеличивается, а потом уменьшается к концу профиля.

Разрыв годографов можно объяснить повышением скорости в верхней части разреза осадочного чехла на этих участках профиля, что находит отражение в кажущихся скоростях годографов первых волн: максимальные значения кажущихся на удалениях до 30 км от центра зондирования увеличиваются с 3,4–3,6 до 3,9–4,1 км/с. Возникает, вероятно, эффект экранирования по отношению к нижележащему слою со скоростями 3,5–3,8 км/с.

В районе пересечения профилей Dream-line и 5-AP наблюдается полное подобие волновых полей ГСЗ, включая разрыв годографов продольных волн в первых вступлениях (рис. 4).

Поперечные волны. Поперечные волны (будем рассматривать волны, распространяющиеся от источника в водном слое как продольные Р и меняющиеся на дне моря типы волн с продольных на поперечные S) прослеживаются лишь на некоторых сейсмических записях зондирования в западной части профиля. Поперечные волны динамически слабо выражены и представлены в основном волновыми пакетами, по которым трудно выполнить фазовую корреляцию.

Наиболее четко на сейсмических записях прослеживаются поперечные волны, связанные с осадочным чехлом. Они наблюдаются лишь на АДСС 310-370 на удалениях источник-приемник до 20 км. Поперечные волны от кровли консолидированной коры наблюдаются на отдельных сейсмических записях АДСС 40-110 в интервале удалений 40–70 км. Поперечные волны от подошвы земной коры (граница М) однозначно не выделяются из-за многофазности волнового пакета и отсутствия протяженных осей синфазности. Эти волны удается проследить лишь на участке профиля ПК 150–280 км на удалениях источник-приемник от 80–90 до 110–130 км на временах 15–16 с.

Обменные волны. Практически на всех сейсмических записях радиальной R-компоненты в последующих вступлениях наблюдаются достаточно интенсивные обменные волны, связанные с границами в осадочном чехле, в консолидированной коре, включая ее подошву (границу М). Обменные волны имеют кажущиеся скорости соответствующих продольных волн, но регистрируются с временной задержкой относительно времени прихода продольных волн.

Построение скоростной модели. Данные ГСЗ позволили построить скоростную модель земной

коры на всю ее мощность. Для построения модели использовалась методика интерактивного подбора её параметров (геометрии границ, значений скоростей) с последующей проверкой решением прямой задачи методом лучевого трассирования [15].

Решение прямой задачи выполнялось в программе кинематического моделирования SeisWide. Для заданной модели рассчитываются годографы целевых волн, которые сравниваются с наблюдаемыми волновыми полями зондирования. Параметры модели подбираются таким образом, чтобы расхождения между рассчитанными временами прихода волн и наблюдаемыми временами были минимальными. Подбор скоростей в модели осуществляется для всех волн последовательно сверху вниз по разрезу.

Моделирование Р-волн. Для моделирования продольных волн использовались сейсмические записи геофона (Z-компонента) и гидрофона (H-компонента). Скорость в водном слое была принята постоянной (1,43 км/с), слои в осадочном чехле и земной коре заданы как градиентные. При построении модели учитывались глубинные сейсмический и скоростной разрезы МОВ-ОГТ прежде всего для верхней, сложнопостроенной части разреза до фундамента.

При моделировании рассчитывались времена прихода продольных преломленных/рефрагированных и отраженных волн: в осадочном чехле использовались в основном преломленные/рефрагированные волны, в консолидированной коре – рефрагированные и отраженные волны. Пример моделирования продольных волн представлен на рис. 5.

Моделирование PS- и S-волн. Для моделирования поперечных и обменных волн использовались сейсмические записи радиальной R-компоненты. Для расчета теоретических годографов обменных и поперечных волн в качестве исходной была принята модель, построенная по продольным волнам. Подбор скоростей поперечных волн выполнялся путем задания коэффициента Пуассона в каждом слое, при этом геометрия границ и скорости продольных волн зафиксированы.

Анализ волновых полей показал, что наиболее интенсивные поперечные волны прослеживаются преимущественно на участке профиля ПК 310-370. Пример моделирования поперечных волн в осадочном чехле представлен на рис. 6.

Наиболее интенсивные обменные волны, регистрируемые на горизонтальной компоненте с временной задержкой относительно продольных волн и повторяющиеся кинематику последних, соответствуют схеме обмена Р-волны на S-волну на входящем луче на границе в осадочном чехле, где контраст скоростей максимален [2, 5, 9]. В нашем случае такой границей является граница в осадочном чехле, на которой скачок скоростей продольных волн составляет 1,2 км/с (рис. 7).

Скоростная модель земной коры и верхней мантии, построенная по продольным, поперечным и обменным волнам вдоль профиля Dream-line с учетом глубинного разреза МОВ-ОГТ, представлена на рис. 8.

Общая мощность земной коры вдоль профиля Dream-line составляет 27–30 км с отдельными локальными увеличениями мощности в восточной части профиля до 31–32 км.

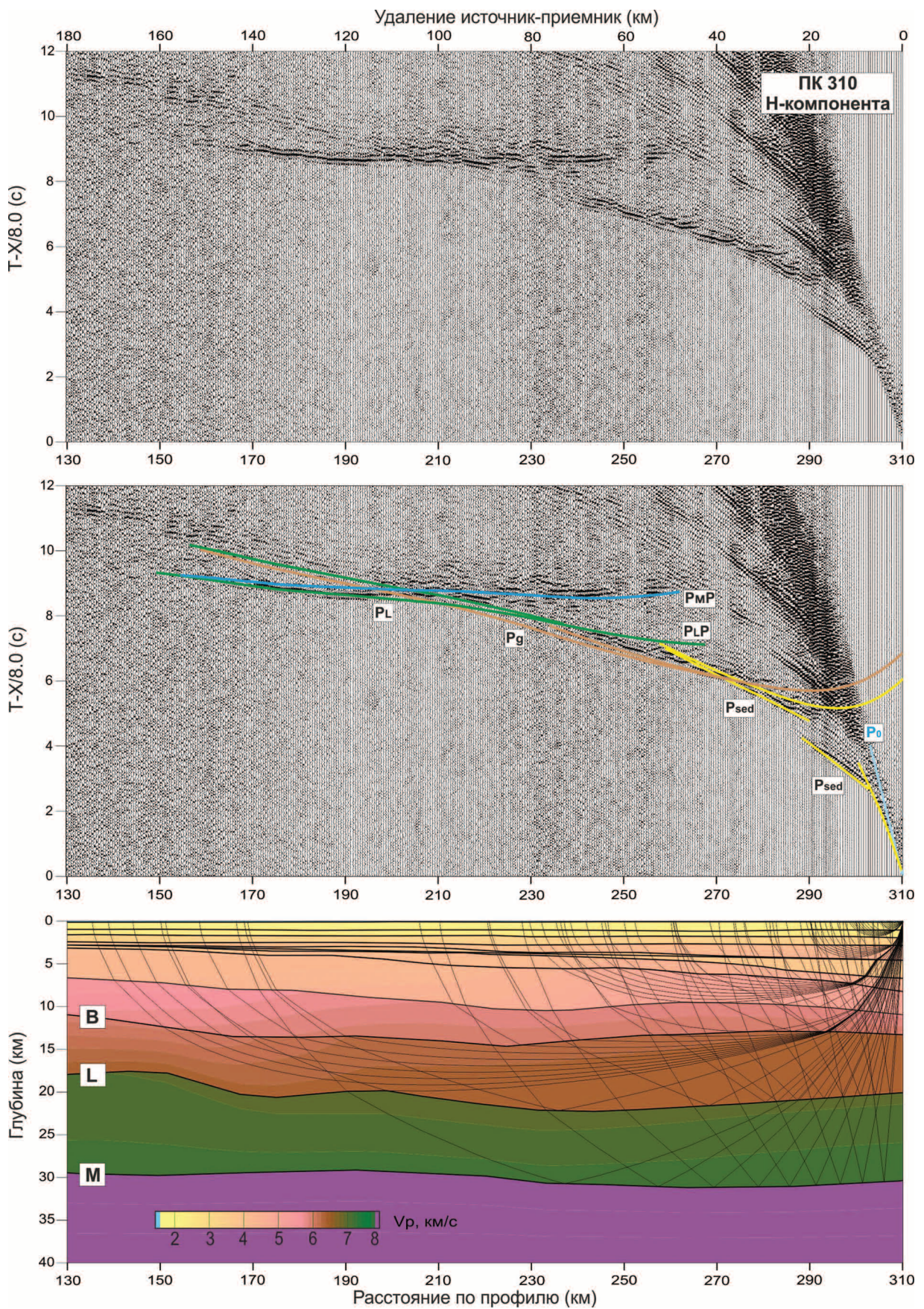


Рис. 5. Пример лучевого моделирования рефрактированных и отраженных Р-волн в земной коре и верхней мантии по профилю GC3 Dream-line (ПК 310, Н-компонента)

P_0 – прямая волна в водном слое (ост. обозн. см. на рис. 3); В – кровля верхней коры (поверхность фундамента); L – кровля нижней коры; М – кровля верхней мантии (граница М)

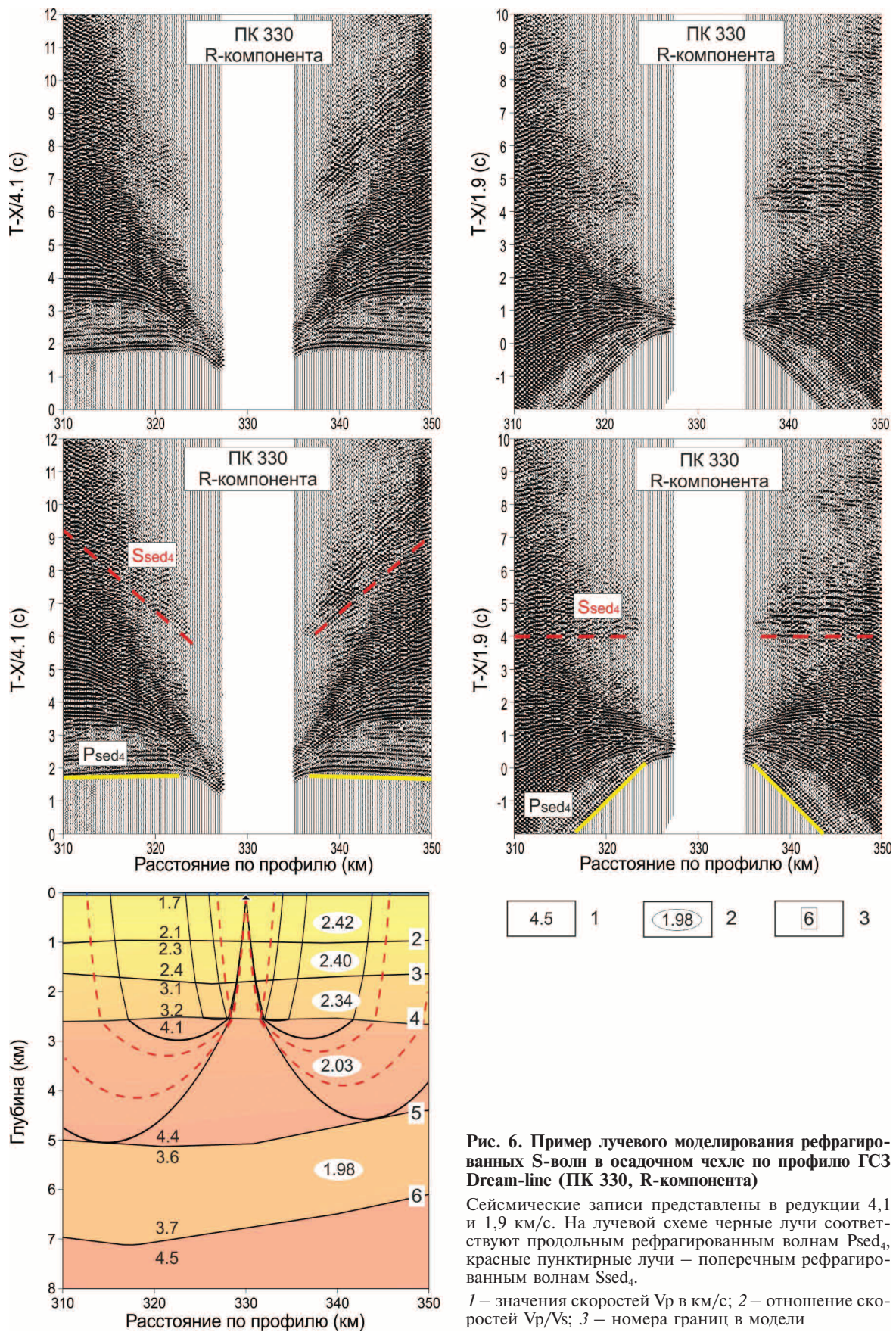


Рис. 6. Пример лучевого моделирования рефракгированных S-волн в осадочном чехле по профилю ГСЗ Dream-line (ПК 330, R-компонента)

Сейсмические записи представлены в редукции 4,1 и 1,9 км/с. На лучевой схеме черные лучи соответствуют продольным рефракгированным волнам P_{sed4}, красные пунктирные лучи – поперечным рефракгированным волнам S_{sed4}.

1 – значения скоростей V_p в км/с; 2 – отношение скоростей V_p/V_s; 3 – номера границ в модели

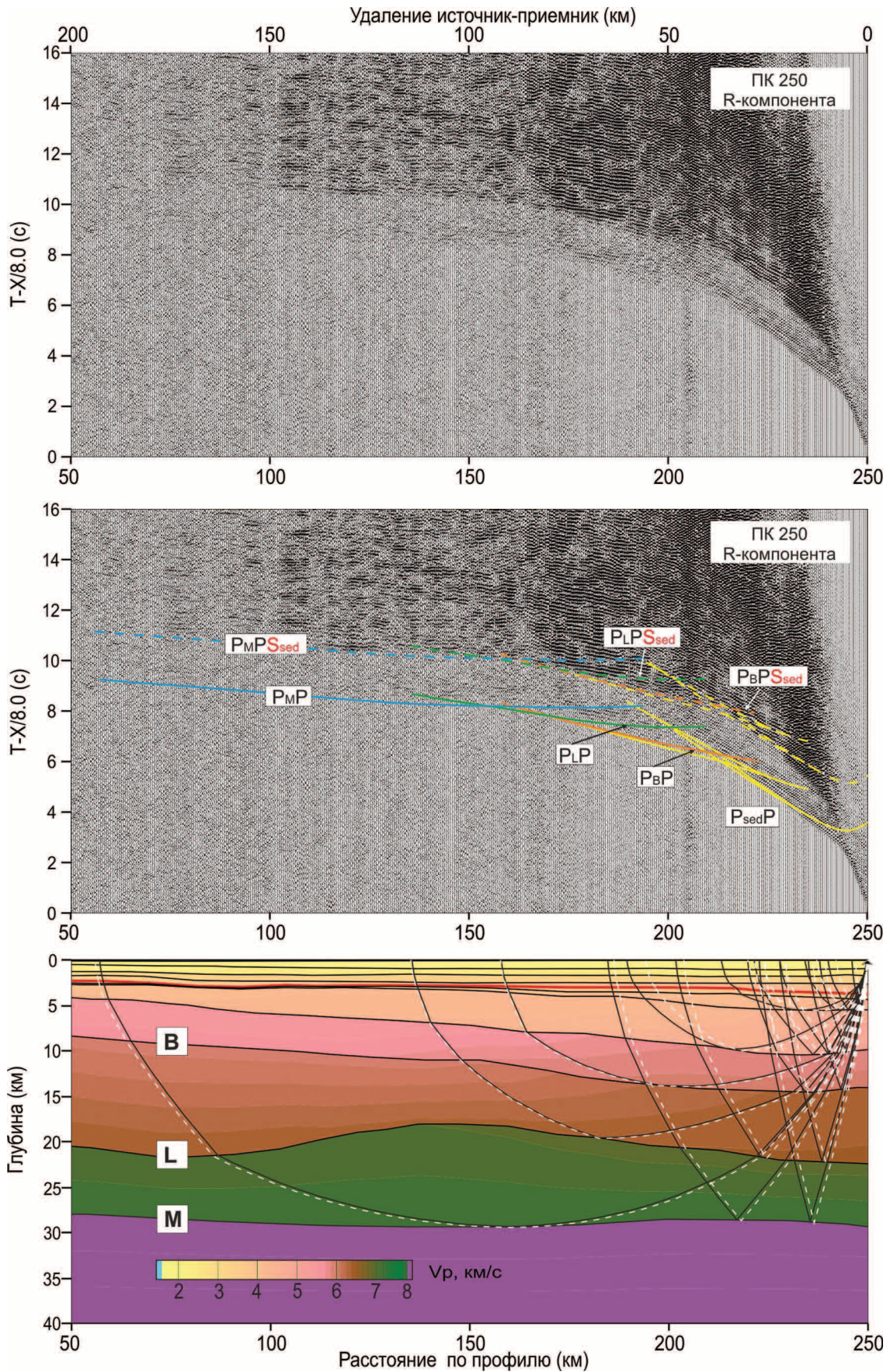


Рис. 7. Пример лучевого моделирования отраженных P- и PS-волн в земной коре и верхней мантии по профилю GC3 Dream-line (ПК 250, R-компонента)

Лучевая схема приведена для обращенной системы наблюдения. Сплошные черные лучи соответствуют продольным отраженным волнам, пунктирные светлые лучи – обменным отраженным волнам. Обмен произошел на восходящем луче на границе в осадочном чехле (сплошная красная линия). Ост. обозн. см. на рис. 3 и 5

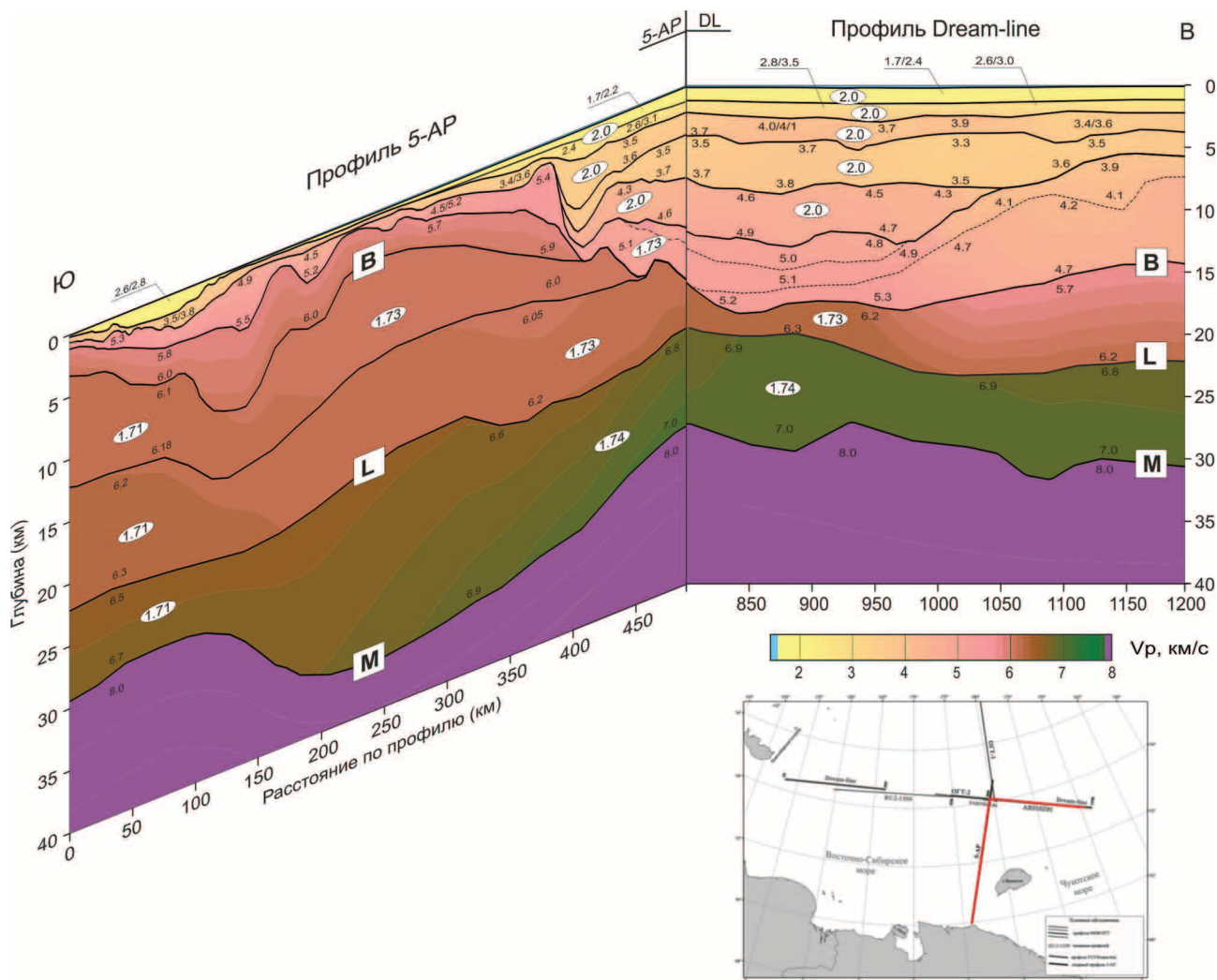


Рис. 9. Взаимувязанная модель по профилям ГСЗ Dream-line и 5-AP

Усл. обозн. см. на рис. 8

Осадочный чехол. Мощность осадочного чехла меняется от 7–8 км в западной части профиля до 15–16 км в восточной части. Скорость в осадочном чехле возрастает с глубиной от 1,6 км/с в кровле верхнего слоя до 4,9–5,3 км/с в подошве нижнего. В пределах осадочного чехла на двух участках профиля выделен слой с относительно повышенной скоростью. Отношения скоростей V_p/V_s в осадках меняются от 1,86 до 2,4.

Промежуточный комплекс со скоростями продольных волн 4,6–6,0 км/с и V_p/V_s 1,8 отличается от осадочных толщ по характеру сейсмической записи на разрезе МОВ-ОГТ (рис. 2). Кровля промежуточного комплекса уверенно прослеживается на сейсмических записях западной расстановки профиля (на рис. 8 – сплошная зеленая линия). На восточной расстановке профиля в нижней части осадочного чехла в скоростную модель введены границы (на рис. 8 – пунктирные линии), которые прослеживаются на разрезах ОГТ, но не всегда выделяются в волновых полях ГСЗ.

Кровля кристаллической коры моделировалась по рефрагированным/ преломленным волнам с кажущимися скоростями от 5,7–6,3 км/с, которые уверенно прослеживаются в первых вступлениях (P_g).

Мощность верхней коры в западной части профиля 7–12, в восточной части 6–10 км, существенно уменьшается до 2–4 км в районе 800–1050 км профиля. Отношения скоростей V_p/V_s в верхней части кристаллической коры от 1,73 до 1,75.

Граница раздела в нижней части коры (L). Глубина залегания этой границы изменяется от 18 до 24 км. Мощность нижней части коры 7–12 км. Скорость в кровле слоя 6,6–6,9, в подошве слоя 6,9–7,2 км/с. Отношения скоростей V_p/V_s в нижней коре 1,74.

Граница M залегает на глубинах 27–30 км. Скорость продольных волн в верхней мантии 8,0 км/с.

Следует отметить, что наиболее надежно оценки значений V_p/V_s выполнены вдоль профиля Dream-line по обменным волнам для осадочных комплексов. Для средней и нижней коры вдоль всего профиля Dream-line, вследствие недостаточно уверенного прослеживания поперечных волн от границ L и M, значения V_p/V_s подбирались с учетом результатов исследований по профилю 5-AP.

На рис. 9 показано, как увязываются скоростные модели земной коры и верхней мантии по профилям ГСЗ Dream-line и 5-AP. Можно видеть хорошее

совпадение разрезов в месте пересечения профилей как по глубине залегания основных границ, так и по значениям скоростей V_p и отношению скоростей V_p/V_s .

Заключение. По результатам исследований на профиле Dream-line получена новая информация, позволяющая сделать следующие выводы:

– методика, реализованная при наблюдениях ГСЗ с донными станциями, дает возможность выделять и использовать для интерпретации продольные, поперечные и обменные волны, связанные с границами в осадочном чехле, верхней и нижней кристаллической корой и границей М;

– разрезы ГСЗ по двум пересекающимся профилям – Dream-line и 5-AP хорошо увязываются между собой и демонстрируют модель земной коры и верхней мантии, типичную для континентальных глубоких впадин с наличием мощного осадочного чехла, утоненной верхней и мощной нижней кристаллической коры [3, 6].

Авторы благодарят коллективы British Petroleum, ОАО «Дальморнефтегеофизика», СВКНИИ ДВО РАН, ОАО «Севморнефтегеофизика», ОАО «ГНИН-ГИ», WGP Exploration Limited и АО «Севморгео», выполнявшие полевые исследования, и своих коллег-геологов М. Л. Вербу и И. Ю. Винокурова за плодотворное обсуждение результатов геофизических построений.

1. Геология и полезные ископаемые России. Т. 5: Арктические и дальневосточные моря. Кн. 1: Арктические моря. – СПб.: ВСЕГЕИ, 2004. – 468 с.

2. Кашубин С.Н. Сейсмическая анизотропия и эксперименты по ее изучению на Урале и Восточно-Европейской платформе. – Екатеринбург: УрО РАН, 2001. – 182 с.

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

4. Кашубин С.Н., Петров О.В., Артемьева И.М. и др. Глубинное строение земной коры и верхней мантии поднятия Менделеева по профилю ГСЗ Арктика-2012 // Регион. геология и металлогения. 2016. № 65. – С. 16–35.

5. Кашубин С.Н., Сакулина Т.С., Павленкова Н.И., Лукашин Ю.П. Особенности волновых полей продольных и поперечных волн при глубинных сейсмических исследованиях на акваториях // Технологии сейсморазведки. 2011. № 4. – С. 88–102.

6. 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.

7. Поселов В.А., Аветисов Г.П., Каминский В.Д. и др. Российские арктические геотравессы. – СПб.: ФГУП «ВНИИОкеангеология» им. И.С. Грамберга, 2011. – 172 с.

8. Сакулина Т.С., Верба М.Л., Кашубина Т.В. и др. Комплексные геолого-геофизические исследования на опорном профиле 5-AP в Восточно-Сибирском море // Разведка и охрана недр. 2011. № 10. – С. 17–23.

9. Яварова Т.М., Кашубин С.Н., Рыбалка А.В., Сакулина Т.С. Поперечные и обменные волны в морских исследованиях ГСЗ (результаты математического моделирования) // Геофизические методы исследования земной коры: Материалы Всерос. конференции, посвященной 100-летию со дня рождения акад. Н.Н. Пузырева (Новосибирск, 8–13 декабря 2014). – Новосибирск: Изд-во ИНГТ СО РАН, 2014. – С. 291–296.

10. Funck T., Jackson H.R., Shimeld J. The crustal structure of the Alpha Ridge at the transition to the Canadian Polar

Margin: Results from a seismic refraction experiment // J. Geophys. Res. Solid Earth 116. 2011. – P. 1–26.

11. International project. Atlas of geological maps of the Circumpolar Arctic / Eds. O.V. Petrov (VSEGEI), M. Smelror (NGU), A.F. Morozov (Rosnedra). – Spb.: VSEGEI Publishing House, 2016. – 64 p.

12. Lebedeva-Ivanova N.N., Gee D.G., Sergeyev M.B. Crustal structure of the East Siberian continental margin, Podvodnikov and Makarov basins, based on refraction seismic data (TransArctic 1989–1991) // Arctic Petroleum Geology. Geological Society of London, 2011. Chapter 26. Memoirs 35. – P. 395–411.

13. Lebedeva-Ivanova N.N., Zamansky Y.Y., Langinen A.E., Sorokin M.Y. Seismic profiling across the Mendeleev Ridge at 82°N: Evidence of continental crust // Geophys. J. Int. 2006. Vol. 165. – P. 527–544.

14. Petrov O., Morozov A., Shokalsky S. et al. Crustal structure and tectonic model of the Arctic region // Earth-Science Reviews. 2016. Vol. 154. – P. 29–71.

15. Zelt C.A., Smith R.B. Seismic traveltimes inversion for 2D crustal velocity structure // Geophys. J. Int. 1992. Vol. 108. – P. 16–34.

1. Geologiya i poleznye iskopaemye Rossii. T. 5: Arkticheskie i dal'nevostochnye morya. Kn. 1: Arkticheskie morya [Geology and Mineral Resources of Russia. Vol. 5: Arctic and Far East Seas. Book 1: Arctic Seas]. St. Petersburg: VSEGEI. 2004. 468 p.

2. Kashubin S.N. Seismic anisotropy and experiments on its studying in the Urals and the East European Platform [Seismic anisotropy and experiments on its studying in the Urals and the East European Platform]. Ekaterinburg: URO RAN. 2001. 182 p.

3. Kashubin S.N., Pavlenkova N.I., Petrov O.V. i dr. Crustal types of the Circumpolar Arctic. *Region. geologiya i metallogeniya*. 2013. No 55, pp. 5–20. (In Russian).

4. Kashubin S.N., Petrov O.V., Artemieva I.M. i dr. Deep structure of the earth's crust and upper mantle of the Mendeleev Rise along the DSS Arctic-2012 Profile. *Region. geologiya i metallogeniya*. 2016. No 65, pp. 16–35. (In Russian).

5. Kashubin S.N., Sakulina T.S., Pavlenkova N.I., Lukashin Yu.P. Features of wavefields of P- and S-waves in the course of deep seismic studies in water areas. *Tekhnologii seysmorazvedki*. 2011. No 4, pp. 88–102. (In Russian).

6. Pavlenkova N.I., Kashubin S.N., Pavlenkova G.A. Earth's crust of deep platform depressions of Northern Eurasia and their generation. *Fizika Zemli*. 2016. No 5, pp. 150–164. (In Russian).

7. Poselov V.A., Avetisov G.P., Kaminsky V.D. i dr. Rossiyskie arkticheskie geotraversy [Russian Arctic geotraverses]. St. Petersburg: FGUP «VNIIOkeangeologiya» im. I.S. Gramberga. 2011. 172 p.

8. Sakulina T.S., Verba M.L., Kashubina T.V. i dr. Comprehensive geological and geophysical studies along the 5-AP reference profile in the East Siberian Sea. *Razvedka i ohrana nedr*. 2011. No 10, pp. 17–23. (In Russian).

9. Yavarova T.M., Kashubin S.N., Rybalka A.V., Sakulina T.S. S-waves and converted waves in DDS marine studies (mathematic modelling results). *Geophysical methods for studying the Earth's crust: Proceeding of the Russian conference dedicated to the 100th anniversary of academician N.N. Puzyrev (Novosibirsk, December 8–13, 2014)*. Novosibirsk: Publishing House of INGG SB RAS. 2014. Pp. 291–296. (In Russian).

10. Funck, T., Jackson, H.R., Shimeld, J., 2011: The crustal structure of the Alpha Ridge at the transition to the Canadian Polar Margin: Results from a seismic refraction experiment. *J. Geophys. Res. Solid Earth* 116, 1–26.

11. Petrov, O.V., Smelror, M., Morozov, A.F. (Eds.) 2016: International project. Atlas of geological maps of the Circumpolar Arctic. St. Petersburg: VSEGEI Publishing House. 64.

12. Lebedeva-Ivanova, N.N., Gee, D.G., Sergeyev, M.B., 2011: Crustal structure of the East Siberian continental margin, Podvodnikov and Makarov basins, based on refraction seismic

data (TransArctic 1989–1991). *Arctic Petroleum Geology. Chapter 26. Geological Society of London*, 35, 395–411.

13. Lebedeva-Ivanova, N.N., Zamansky, Y.Y., Langinen, A.E., Sorokin, M.Y., 2006: Seismic profiling across the Mendeleev Ridge at 82°N: Evidence of continental crust. *Geophys. J. Int.* 165, 527–544.

14. Petrov, O., Morozov, A., Shokalsky, S. et al., 2016: Crustal structure and tectonic model of the Arctic region. *Earth-Science Reviews*, 154, 29–71.

15. Zelt, C.A., Smith, R.B., 1992: Seismic traveltime inversion for 2D crustal velocity structure. *Geophys. J. Int.*, 108, 16–34.

Сакулина Тамара Сергеевна – канд. физ.-мат. наук, зав. лабораторией, АО «Севморгео»¹. <sakoulina@gmail.com>

Кашубин Сергей Николаевич – доктор геол.-минер. наук, профессор, зам. ген. директора, ВСЕГЕИ².

<sergey_kashubin@vsegei.ru>

Петров Олег Владимирович – доктор. геол.-минер. наук, доктор экон. наук, ген. директор, ВСЕГЕИ².

<OPetrov@vsegei.ru>

Морозов Андрей Федорович – канд. геол.-минер. наук, зам. руководителя, Федеральное агентство по недропользованию (Роснедра). Ул. Б. Грузинская, 4/6, Д242, ГСП5, Москва, 125993, Россия. <amorozov@rosnedra.com>

Крупнова Наталья Александровна – канд. физ.-мат. наук, науч. сотрудник, АО «Севморгео»¹. <n_krupnova@mail.ru>

Дергунов Николай Тимофеевич – зав. лабораторией, АО «Севморгео»¹. <dnt@sevmorgeo.com>

Разматова Анна Валериановна – инженер АО «Севморгео»¹. <anek_raz@bk.ru>

Табырца Светлана Николаевна – вед. инженер, АО «Севморгео»¹. <ivas@sevmorgeo.com>

Кашубина Татьяна Викторовна – вед. геофизик, ВСЕГЕИ². <tatiana_kashubina@vsegei.ru>

Яварова Татьяна Михайловна – геофизик, ВСЕГЕИ². <tatyana_yavarova@vsegei.ru>

Sakulina Tamara Sergeevna – Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Head of the laboratory, JSC «Sevmorgeo»². <sakoulina@gmail.com>

Kashubin Sergey Nikolaevich – Doctor of Geological and Mineralogical Sciences, Professor, Deputy Director General, VSEGEI¹. <sergey_kashubin@vsegei.ru>

Petrov Oleg Vladimirovich – Doctor of Geological and Mineralogical Sciences, Doctor Economic Sciences, Director General, VSEGEI¹. <OPetrov@vsegei.ru>

Morozov Andrey Fedorovich – Candidate of Geological and Mineralogical Sciences, Deputy Head, Federal Agency on Mineral Resources (Rosnedra). 4/6, Bolshaya Gruzinskaya Street, D424, GSP5, Moscow, 125993, Russia. <amorozov@rosnedra.com>

Krupnova Natal'ya Aleksandrovna – Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Researcher, JSC «Sevmorgeo»². <n_krupnova@mail.ru>

Dergunov Nikolay Timofeevich – Head of the laboratory, JSC «Sevmorgeo»². <dnt@sevmorgeo.com>

Razmatova Anna Valerianovna – Engineer, JSC «Sevmorgeo»². <anek_raz@bk.ru>

Tabyrtca Svetlana Nikolaevna – Leading Engineer, JSC «Sevmorgeo»². <ivas@sevmorgeo.com>

Kashubina Tatiana Viktorovna – Lead Geophysicist, VSEGEI¹. <tatiana_kashubina@vsegei.ru>

Yavarova Tatiana Mihaylovna – Geophysicist, VSEGEI¹. <tatyana_yavarova@vsegei.ru>

¹ АО «Севморгео». Ул. Розенштейна, д. 36, Санкт-Петербург, 198095, Россия.

JSC «Sevmorgeo». 36, Rosenstein St., St. Petersburg, 198095, Russia.

² Всероссийский научно-исследовательский геологический институт им. А.П. Карпинского (ВСЕГЕИ). Средний пр., 74, Санкт-Петербург, 199106, Россия.

A.P. Karpinsky Russian Geological Research Institute (VSEGEI). 74, Sredny Prospect, St. Petersburg, 199106, Russia.