

С. Н. КАШУБИН, О. В. ПЕТРОВ, Е. Д. МИЛЬШТЕЙН, И. Ю. ВИНОКУРОВ, Е. А. АНДРОСОВ,  
Ю. С. ГОЛЫШЕВА, Н. Н. ЕФИМОВА, Т. М. ЯВАРОВА (ВСЕГЕИ), А. Ф. МОРОЗОВ (Роснедра)

### Структура земной коры зоны сочленения поднятия Менделеева с Евразийским континентом (по геофизическим данным)

По результатам современных глубинных сейсмических исследований и интерпретации аномалий силы тяжести в зоне сочленения поднятия Менделеева с мелководным шельфом Северной Евразии установлены основные черты глубинного строения земной коры и верхней мантии этого региона. Приведены скоростные и плотностные модели северной части Чукотской складчатой системы, поднятия Врангеля-Геральда, Северо-Чукотского прогиба, поднятия Менделеева, Чукотской впадины и Чукотского плато. По системе взаимосвязанных скоростных и плотностных моделей демонстрируются связи между этими структурами с обсуждением предполагаемого геологического строения региона.

Ключевые слова: сейсморазведка ГСЗ и МОВ-ОГТ, скоростные и плотностные модели земной коры, поднятие Менделеева, Северо-Чукотский прогиб, континентальная земная кора.

S. N. KASHUBIN, O. V. PETROV, E. D. MILSHEIN, I. YU. VINOKUROV, E. A. ANDROSOV,  
YU. S. GOLYSHEVA, N. N. EFIMOVA, T. M. YAVAROVA (VSEGED), A. F. MOROZOV (Rosnedra)

### Earth's crust structure of the Mendeleev Rise and its connection with Eurasian continent (by geophysical data)

The Earth's crust and the upper mantle structure in junction zone between the Mendeleev Rise and Northern Eurasia shallow water shelf have been identified by the interpretation of current deep seismic and gravity anomalies. The Chukchi Fold Belt, the Wrangel-Herald Ridge, the North Chukchi Trough, the Mendeleev Rise, the Chukchi Basin and the Chukchi Plateau velocity and density models are described in the paper. Structural relations between these taxa and their geological structure are discussed according to coordinated 3D system of velocity and density models.

Keywords: DSS and CDP seismics, velocity and density models, the Mendeleev Rise, the North Chukchi Trough, continental crust.

**Введение.** Геолого-геофизическим исследованием области перехода от северного шельфа Евразии к глубоководной части Арктического бассейна в последние годы придается особое значение. Недоступность большей части арктической акватории для прямых геологических наблюдений сделала геофизические построения основным источником информации об этой важнейшей с точки зрения геолого-тектонической позиции области. Интерес к этому региону возрос еще и в связи с подготовкой приарктическими государствами заявок на расширение своего континентального шельфа в Арктике. В статье представлены результаты современной обработки и интерпретации глубинных сейсмических исследований, полученных в 2005–2012 гг. российскими высокоширотными экспедициями, и интерпретации аномального поля силы тяжести по материалам Международного проекта «Атлас геологических карт Циркумполярной Арктики» [36] (рис. 1).

**Основные представления о геологическом строении.** В одной из первых обобщающих работ по рассматриваемому региону Р. М. Деменицкая и Ю. Г. Киселев на основе анализа геомагнитных (аэромагнитные съемки масштабов

1 : 2 000 000–1 : 4 000 000) и сейсмических данных (авиадесантные зондирования методом отраженных волн), полученных в 1950–1960-е годы НИИГА–ВНИИОкеангеология и ГУНиО, пришли к выводу, что хр. Менделеева – это часть погруженной Гиперборейской платформы, в прошлом единое целое с Канадско-Гренландской платформой и котловинами Макарова и Подводников [6, 15, 22]. Было отмечено, что поднятие асейсмично и для него типично глыбовое строение. Тепловой поток характеризуется небольшими значениями. Гравитационное и магнитное поля характерны для платформенных структур.

Тесная связь поднятия Менделеева с Восточно-Сибирским континентальным шельфом обосновывалась исходя из анализа аномалий потенциальных полей [3]. Профиль ГСЗ, выполненный в 2000 г. на НИС «Академик Федоров», пересек поднятие Менделеева в северной части. Общая мощность земной коры на профиле достигает 30–32 км. Осадочный чехол состоит из двух комплексов общей мощностью 2–4 км. Скорость в верхнем комплексе 1,7–3,2, в нижнем – 4,3–5,2 км/с [7, 37].

Большинство российских и зарубежных исследователей Арктики сходятся на том, что на поднятие Менделеева вместе с хр. Альфа распространена

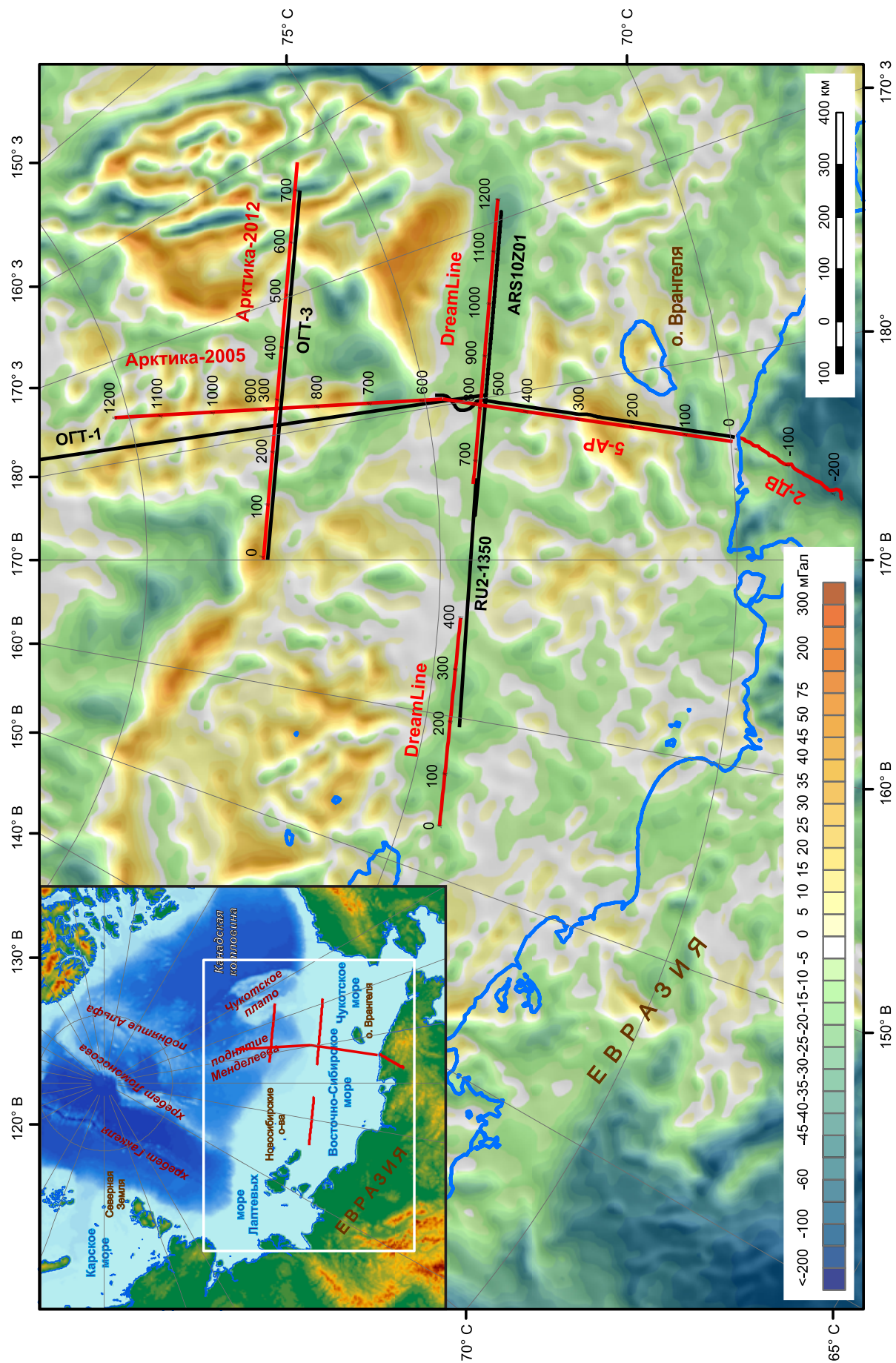


Рис. 1. Расположение профилей глубинных сейсмических исследований в зоне сочленения поднятия Менделеева с Евразией на карте аномалий силы тяжести Циркумплярной Арктики [36]

Красные линии – профили ГСЗ с разбивкой в километрах, черные – линии наблюдений МОВ-ОГТ вдоль этих профилей



крупная Арктическая вулканическая провинция мелового возраста (High Arctic Large Igneous Province – HALIP) [31]. Обсуждается вопрос о геодинамической обстановке проявления вулканизма и природе подстилающей провинцию коры. Российскими геологами поднятие Менделеева интерпретируется как часть рифтогенно растянутой пассивной континентальной окраины, переработанной меловым базитовым вулканизмом [38]. По мнению многих западных ученых, поднятие Менделеева – меловая вулканическая структура, образовавшаяся в результате воздействия на океаническую кору Американо-Северо-Азиатского бассейна горячего пятна мантии [33, 34]. Эти расхождения позволили Комиссии по границам континентального шельфа при ООН при рассмотрении первого варианта заявки Российской Федерации в 2002 г. классифицировать поднятие Менделеева как океанический хребет на океанической коре.

Исследования восточно-арктических акваторий сейчас получили новый импульс. В основе лежат три фактора: проведение работ по обоснованию внешней границы континентального шельфа (ВГКШ) Российской Федерации в Северном Ледовитом океане; завершение регионального этапа геолого-разведочных работ на западно-арктическом шельфе и переход к планомерному изучению шельфов восточно-арктических морей; интерес многочисленных российских и зарубежных компаний к шельфам восточно-арктических морей в связи со значительными перспективами их нефтегазоносности. Так, за последние 10 лет на восточно-арктическом шельфе отработано более 50 000 пог. км сейсмических профилей МОВ-ОГТ и почти 3000 км профилей глубинных сейсмических зондирований (ГСЗ).

В частично пересмотренном представлении относительно внешней границы континентального шельфа в Северном Ледовитом океане к окраинно-континентальным отнесены структуры континентального шельфа Сибири и Аляски, Чукотский бордерленд и поднятие Менделеева (подводные возвышенности, являющиеся естественными компонентами материковой окраины в соответствии со ст. Art.76.6 [16]), котл. Подводников (как террасированный континентальный склон Восточно-Сибирской окраины – также естественный компонент континентальной окраины в соответствии со ст. Art.76) и присибирский сегмент хр. Ломоносова (тоже подводная возвышенность в соответствии со ст. Art.76.6). В российской обновленной заявке к структурным элементам глубоководного ложа океана отнесены котловины Канадская, Макарова, Амундсена, Нансена и хр. Гаккеля.

Согласно современным взглядам российских исследователей, большую часть акватории занимают тектонические образования с континентальным типом земной коры [10, 12]. Западными коллегами из структур области Центрально-Арктических поднятий как однозначно континентальные до недавнего времени рассматривались лишь хр. Ломоносова и Чукотский бордерленд, включающий Чукотское плато, впадину Нортвинд и хр. Нортвинд, особенно после того, как американскими геологами на хр. Нортвинд были драгированы карбонатные и терригенные отложения раннепалеозойского возраста (A. Grantz et al., 1998).

Время формирования континентальной коры почти везде докембрийское, хотя, возможно,

на отдельных участках оно позднерифейское и палеозойское. Почти повсюду докембрийско-палеозойский фундамент перекрыт формациями плитного чехла. На сейсмических разрезах местами в комплексах палеозойско-мезозойского фундамента отмечаются многоэтапные рифтогенные прогибы. Развитие мощных деструктивных процессов, приведших к созданию современного тектонического плана, началось в конце юры в Канадской котловине, достигнув (конец мела – кайнозой) региона хр. Гаккеля и прилегающих котловин Нансена и Амундсена, что привело к образованию спредингового Евразийского бассейна (Н. П. Лавров и др., 2012; A. G. Dore et al., 2015).

Один из крупнейших рифтогенных прогибов – Северо-Чукотский – расположен в зоне сочленения поднятия Менделеева с шельфом северо-восточной окраины Евразийского континента. На происхождение прогиба, возраст, состав слагающих его толщ и тектоническую позицию существует ряд точек зрения. Ранее преобладали представления о «безграницитной» коре в депоцентре прогиба. Считалось, что его осевую зону образует глубокий рифт [4], которому отвечают утонение консолидированной коры и воздымание кровли мантии. Борты рифта сопровождаются высокими градиентами мощности осадочного чехла и сбросами. Углы падения слоев до 11° и сбросы в южном борту уверенно установлены сейсмопрофилеированием. Мощность осадочного чехла в прогибе оценивалась по результатам плотностного моделирования в 22, по сейсмическим данным в 15–16 км (М. К. Косыко и др., 2008). Несмотря на появление новых сейсмических данных (МОВ-ОГТ и ГСЗ), оценка мощности осадочного чехла бассейна существенно колеблется от 14–16 (Н. А. Малышев и др., 2010; В. Е. Хаин и др., 2009) до 20–24 км [2, 3, 5, 23, 25] с промежуточным вариантом около 18 км [1, 36, 38]. Неоднозначно трактуется и стратиграфическое расчленение осадочного бассейна. Одни исследователи начинают разрез осадочного чехла с нижнеэлсмирского комплекса, другие с верхнеэлсмирского, третьи с бофортского или брукского. Нет единого представления и о строении фундамента. Так, академик В. Е. Хаин считал, что данный бассейн «имеет апт-кайнозойский возраст. Он наложен как на среднемеловые дислокации континентальной плиты Восточной Арктики, так и на ее ненарушенный чехол. Система рифтогенных грабен, заполненных терригенными и карбонатными породами каменноугольного–неокомского возраста, синхронными элсмирскому и бофортскому комплексам, образует его фундамент» (В. Е. Хаин и др., 2009). Другими словами, В. Е. Хаин выделяет переходный комплекс, или складчато-метаморфический фундамент. Некоторые исследователи считают, что консолидированная кора в основании прогиба не содержит «гранитно-метаморфического слоя» и прогнозируют непосредственно под осадочным чехлом «серпентинизированную мантию» (S. S. Drachev, 2016).

Очевидно, что зона сочленения поднятия Менделеева с северо-восточным шельфом Евразийского континента еще не до конца расшифрована. Главным дискуссионным вопросом является непрерывность прослеживания верхнего слоя кристаллической коры в погруженную часть континентального шельфа Северо-Восточной Евразии, решение которого и предлагается в данной статье.

**Методика сейсмических исследований.** Полевые наблюдения ГСЗ и МОВ-ОГТ по сети профилей Арктика-2005, 5-АР, Dream-Line, Арктика-2012, образующих взаимосвязанный каркас сейсмических профилей (рис. 1), выполнялись с 2005 по 2012 г. Основные технологии сейсмических наблюдений в зависимости от ледовой обстановки на профилях: наблюдения ГСЗ с донными станциями с использованием пневмоисточников большой мощности (5-АР, Dream-line, Арктика-2012); **наледные наблюдения** ГСЗ с использованием взрывных источников (Арктика-2005); наблюдения МОВ-ОГТ с длинной буксируемой косой «по открытой воде» (RU2-1350, ARS10Z01, 5-АР, Арктика-2012, ОГТ-3); наблюдения МОВ-ОГТ с короткой буксируемой косой, дополненные зондированиями МПВ, с ледокольной проводкой исследовательского судна (Арктика-2012, ОГТ-1). Кроме того, в зоне перехода суша–море на южном окончании профиля 5-АР выполнены дополнительные наблюдения ГСЗ, когда донные станции, расположенные на профиле 5-АР, зарегистрировали серию взрывов с сухопутного профиля 2-ДВ, а регистраторы на профиле 2-ДВ записали воздействия от пневмоисточников.

Основные сведения о методике полевых работ приведены в табл. 1 и 2. Совокупность всех сейсмических наблюдений позволила создать взаимосвязанный каркас профилей, обеспеченных как глубинными сейсмическими зондированиями, несущими информацию о строении и скоростных параметрах земной коры и верхней мантии, так и наблюдениями МОВ, позволяющими детально учесть строение верхней части разреза.

**Сводный профиль 2-ДВ–5-АР, Арктика-2005.** Профиль ГСЗ Арктика-2005 протяженностью 650 км вдоль гребня глубоководного поднятия Менделеева отработан ФГУП «ВНИИОкеангеология» авиадесантным способом с НЭС «Академик Федоров» в 2005 г. [27]. В 2008–2010 гг. ФГУНПП «Севморгео» выполнены сейсмические наблюдения ГСЗ с донными станциями по 550-километровому профилю 5-АР (Т. С. Сакулина и др., 2011), непосредственно примыкающему к профилю Арктика-2005 с юга, совместно с наблюдениями суша–море по

220-километровому отрезку наземного профиля 2-ДВ. Кроме того, по линии профиля 5-АР выполнены наблюдения МОВ-ОГТ с буксируемой косой длиной 8100 м и интервалом возбуждения 50 м, а в 2012 г. вблизи профиля Арктика-2005 выполнены наблюдения МОВ-ОГТ с 600-метровой буксируемой косой и интервалом возбуждения 50 м. С учетом всех этих сейсмических наблюдений удалось построить сводную скоростную модель земной коры и верхней мантии по 1400-километровому профилю, протянувшемуся с континентальной части суши на юге через Южно-Чукотский осадочный бассейн (прогиб Лонга), Врангелевское поднятие и прогиб Вилькицкого (Северо-Чукотский осадочный бассейн) до глубоководного поднятия Менделеева на севере.

**Профиль Dream-line.** Глубинные сейсмические зондирования с донными станциями по профилю Dream-line протяженностью 925 км в Восточно-Сибирском и Чукотском морях выполнены ФГУНПП «Севморгео» по заказу компании British Petroleum в 2009 г. По материалам этих исследований и фондовым данным МОВ-ОГТ по профилям RU2-1350 и ARS10Z01, близким по расположению к линии профиля ГСЗ Dream-line, построены скоростные модели  $V_p$  и  $V_p/V_s$  земной коры и верхней мантии Северо-Чукотского прогиба (Т. С. Сакулина и др., 2016).

**Профиль ГСЗ Арктика-2012** протяженностью 740 км пересекает поднятие Менделеева примерно на широте  $77^\circ$  с. ш. На профиле силами ОАО «Севморгео» проведены комплексные сейсмические исследования ГСЗ и МОВ-ОГТ. Наблюдения ГСЗ выполнялись с донными станциями при расстоянии между ними 10–20 км, наблюдения МОВ-ОГТ – с 4500-метровой буксируемой косой и интервалом возбуждения 50 м. По этим данным построены скоростные модели  $V_p$  и  $V_p/V_s$  земной коры и верхней мантии поднятия Менделеева [11].

**Обработка материалов МОВ-ОГТ.** Основная цель – построение структурных и скоростных моделей осадочного чехла, выступающих для глубинных разрезов ГСЗ в качестве верхней части

Таблица 1

Методика полевых работ ГСЗ

Основные параметры системы наблюдений	Профили				
	2-ДВ суша–море	5-АР	Арктика-2005	Dream-line	Арктика-2012
Протяженность профиля, км	220	550	650	925	740
Тип источника	Взрывы в водоемах	Пневмоисточники СИН-6	Взрывы в воде	Пневмоисточники СИН-6, СИН-6М	Пневмоисточники СИН-6
Мощность источника	4–10 т тротила	80 л	0,2–1,2 т тротила	80 л; 120 л	120 л
Интервал возбуждения	15–70 км	250 м	50 км	250 м	312 м
Регистрирующая аппаратура	Роса-А. Байкал-АС	АДСС СМ26	Дельта-Геон	АДСС СМ26	АДСС СМ26
Интервал между станциями, км	6	10	5–6	10	10–20
Регистрируемые компоненты	Z	X, Y, Z, H	Z	X, Y, Z, H	X, Y, Z, H
Длина годографа, км	220	200–250	150–250	200–250	200–250

разреза. Получены временные разрезы, обеспечивающие детальное сейсмическое изображение отражающих границ в осадочном чехле. Кроме того, на основе скоростного анализа данных ОГТ сформированы разрезы интервальных скоростей в осадочном чехле с максимально возможной детальностью по оси времён. Построение глубинного разреза МОВ-ОГТ выполнялось с использованием комбинированной скоростной модели, учитывающей в первую очередь результаты скоростного анализа данных ОГТ для осадочного чехла, а во-вторых, скорости по данным ГСЗ для толщи, подстилающей осадочный чехол. Обработка сейсмических материалов проводилась в системе Echos (разработка компании Paradigm). В граф обработки включались следующие основные процедуры [11]: формирование геометрии профиля ОГТ в системе координат профиля ГСЗ; исключение постоянной составляющей амплитуд; подавление низкочастотного шума за счет частотной фильтрации; интерполяция пропущенных сейсмограмм ОТВ; подавление кратных волн с использованием технологии SRME; коррекция амплитуд за сферическое расхождение волнового фронта; подавление когерентных помех, нерегулярного шума по сейсмограммам ОТВ; «посейсмограммная» нормировка амплитуд; интерактивный анализ скоростей суммирования по ОГТ; деконволюция сжатия; получение временного разреза – суммирование по ОГТ; формирование скоростной модели для миграции на основе поля скоростей ОГТ в области осадочного чехла и с учётом скоростной модели по данным ГСЗ в области консолидированной коры; миграция Кирхгофа после суммирования; FX-деконволюция; формирование скоростной модели для пересчета временного разреза в глубинный; построение глубинного разреза.

Глубинные сейсмические разрезы по данным МОВ-ОГТ служили основой для построения

верхней части сводных скоростных моделей земной коры, совмещенных с данными ГСЗ.

#### Обработка и интерпретация материалов ГСЗ.

Основная цель – построение увязанных в местах пересечения профилей скоростных моделей земной коры и верхней мантии. Для уточнения скоростных моделей  $V_p$  по профилям ГСЗ использованы следующие данные: исходные скоростные модели Арктика-2005 [27], 5-AP (Т. С. Сакулина и др., 2011), Dream-line (Т. С. Сакулина и др., 2016), Арктика-2012 [11]; данные батиметрии о положении морского дна (цифровая модель рельефа дна International Bathymetric Chart of the Arctic Ocean, IBCAO, v.2.23 [http://www.ngdc.noaa.gov/bathymetry/arctic]); глубинные и скоростные разрезы МОВ-ОГТ по профилям RU2-1350, ARS10Z01, 5-AP, Арктика-2012 (ОГТ-1, 2 и 3), пересчитанные на соответствующие линии наблюдений ГСЗ. В местах пересечения профилей количество слоев в моделях и значения скоростей увязывались между собой, предпочтение отдавалось более детальным наблюдениям с использованием донных станций и данных МОВ-ОГТ, полученных с более длинными косами.

Основным подходом к построению скоростных моделей являлся метод лучевого моделирования (С. А. Zelt et al., 1992). Параметры модели (геометрия границ и скоростей) подбирались таким образом, чтобы расхождения между временами прихода волн, рассчитанными для заданной модели на основе решения прямой задачи, и наблюдаемыми временами были минимальными. В результате анализа волновых полей на всех профилях ГСЗ выделены следующие группы волн: связанных с границами в осадочном чехле; с верхней консолидированной корой; с нижней корой; отраженных и преломленных волн от границы Мохоровичича.

Построение и корректировка скоростных моделей выполнялись в программе SeisWide. Подбор

Таблица 2

#### Методика полевых работ МОВ-ОГТ

Основные параметры системы наблюдений	Профили				
	RU2-1350	ARS10Z01	5-AP	Арктика-2012 (ОГТ-3)	Арктика-2012 (ОГТ-1)
Тип сейсмической косы	SEAL Sentinel Fluid, 24 bit	Sercel SEAL Streamer	SEAL Sentinel Solid, 24 bit	Sercel SEAL Streamer	
Количество каналов	408	636	648	360	48
Шаг между центрами групп, м	25	12,5	12,5	12,5	12,5
Минимальное удаление, м	125	100	130	100	100
Максимальное удаление, м	10 300	8038	8217,5	4588	688
Активная длина косы, м	10 200	7950	8100	4500	600
Тип источника	G-Gun	Tuned Bolt array	Input/Output Sleeve guns	BOLT APG 8500 SERIES	
Суммарный объем, куб. дюйм	4820	5000	4010	2050	2050
Рабочее давление, psi	2000	2000	2000	2000	2000
Интервал возбуждения, м	50	37,5	50	50	50
Кратность ОГТ	102	106	81	45	6
Длина записи, с	18	12	15	15	15



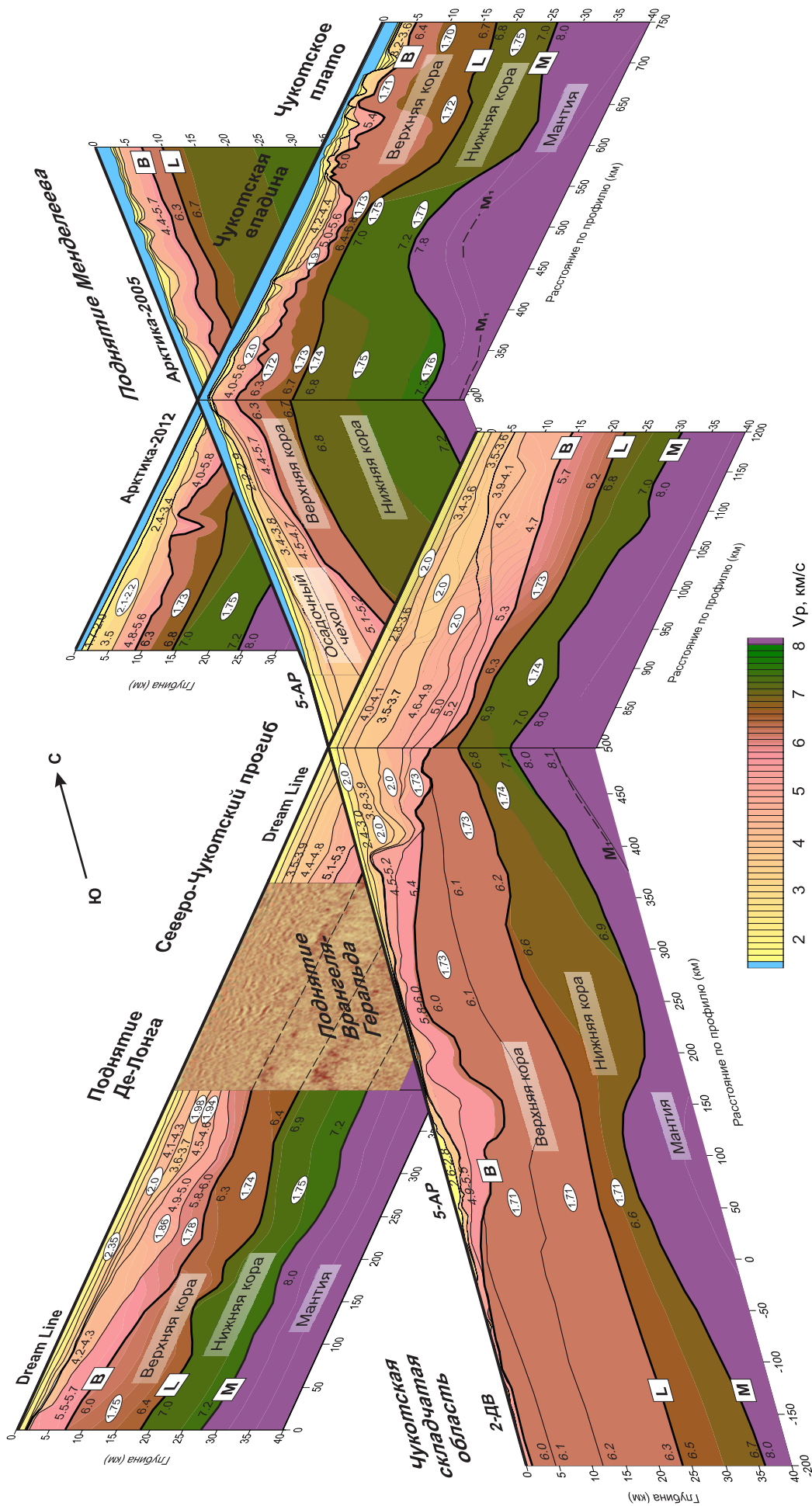


Рис. 2. Скоростные модели земной коры и верхней мантии по сети профилей ГСЗ в зоне сочленения поднятия Менделеева с Евразией

В — кровля верхней коры; L — кровля нижней коры; М — граница Мохоровичича; М<sub>1</sub> — граница в верхней мантии. Цифры на разрезах — скорость продольных волн в км/с, шифры в эллипсах — отношение скоростей V<sub>p</sub>/V<sub>s</sub>

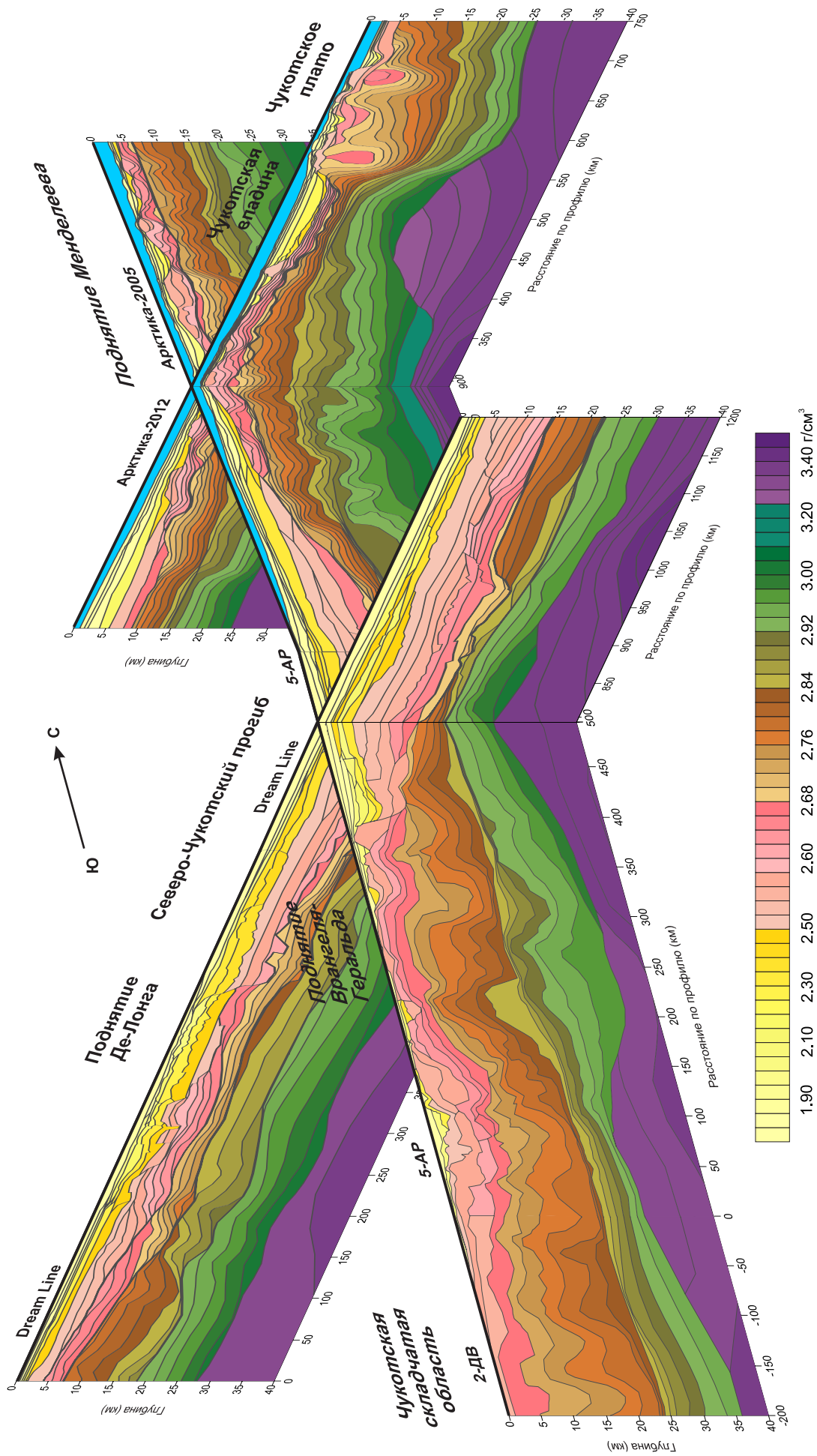


Рис. 3. Плотностные модели земной коры и верхней мантии по сети профилей ГСЗ в зоне сочленения поднятия Менделеева с Евразией

скоростных моделей осуществлялся для всех волн последовательно сверху вниз. Рассчитанные от моделей годографы накладывались на сейсмограммы, представленные в соответствующей редукции. Корректировка модели осуществлялась вручную путем изменения скоростей, глубины и геометрии границ в области, освещаемой лучами с соответствующих пунктов возбуждения-приема. Процедура решения прямой задачи повторялась каждый раз после корректировки модели для всех пунктов наблюдения до достижения удовлетворительного совпадения расчетных и наблюдаемых годографов всех видов волн.

Система увязанных между собой скоростных моделей по профилям ГСЗ приведена на рис. 2. На моделях четко прослеживаются комплексы осадочного чехла, верхней и нижней коры, верхней части мантии, отражающие особенности глубинного строения крупных тектонических структур региона.

**Методика построения плотностных моделей земной коры и верхней мантии.** Сейсмические модели, созданные по материалам ГСЗ, увязанные с данными МОБ-ОГТ, представляют собой наиболее достоверную информацию по вертикальной делимости земной коры и верхней мантии. Однако особенности метода ГСЗ определяют слабую латеральную разрешенность моделей. Для выявления латеральных особенностей строения земной коры и верхней мантии созданы плотностные модели по каркасу сейсмических профилей.

Исходными данными для построения плотностных моделей по сети глубинных сейсмических профилей были фрагмент карты аномалий поля силы тяжести масштаба 1 : 5 000 000 (С. Gaina et al., 2011) и данные батиметрии (модель IBCAO 3.0, <https://www.ngdc.noaa.gov/mgg/bathymetry/arctic/>). В качестве априорной информации использованы результаты сейсмических исследований. Глубинные разрезы МОБ-ОГТ учтены при детализации верхней части разреза (определение положения подошвы осадочного чехла и внутреннее строение осадочных бассейнов). Скоростные модели использовались для оценки общего тренда нарастания плотности с глубиной.

Методика плотностного моделирования [19] рассматривает результирующую плотностную модель как совокупность двух моделей: региональной (модель градиентного нарастания плотности с глубиной) и модели локальных плотностных неоднородностей. Региональные 2D модели рассчитываются на основе скоростных сейсмических моделей. Модель локальных плотностных неоднородностей представляет 3D решение обратной задачи гравиметрии в спектральной области с последующим независимым снижением неоднозначности решения по двум параметрам (глубине и интенсивности локальных неоднородностей) на основе априорной информации — соответствие выделенной подошвы земной коры среднему уровню границы М региона и общемировые петрофизические обобщения [17, 18, 24, 28, 30].

Результирующая модель представляет собой гетерогенно-градиентную модель с выделением четырех глобальных сред (водный слой, осадочный чехол, консолидированная земная кора, верхняя мантия) с принципиально различным законом распределения плотностных неоднородностей.

Помимо соответствия наблюдаемому полю, итоговая модель удовлетворяет параметрам глобальной модели Земли (PREM) и не противоречит структурно-физическим параметрам сейсмических (МОБ-ОГТ и ГСЗ) моделей. Корректировка стартовой модели выполнялась в программном модуле GM-SYS (Geosoft, Oasis Montaj) при аппроксимации градиентной модели тонкослоистой моделью с перепадом плотности между слоями в  $0,02 \text{ г/см}^3$ .

Итоговая модель (рис. 3) представляет собой совокупность взаимосвязанных плотностных моделей по линиям четырех глубинных сейсмических профилей и удовлетворяет исходному полю со среднеквадратической погрешностью менее 5 мГал. Плотностные параметры осадочного чехла соответствуют диапазону  $2,10\text{--}2,65 \text{ г/см}^3$  (при изменении мощности от 1 до 16 км), плотность консолидированной земной коры в среднем  $2,85 \pm 0,04 \text{ г/см}^3$  (при изменении мощности от 11 до 39 км), верхней мантии  $3,36 \pm 0,06 \text{ г/см}^3$  (при глубине от 30 до 40 км).

**Особенности глубинного строения земной коры и верхней мантии.** На рис. 2 и 3 отчетливо видны основные черты глубинного строения крупных геоструктур области сочленения поднятия Менделеева с Евразийским континентом: относительно мощная древняя кора поднятия Врангеля-Геральда (Врангелевского кратонного блока или срединного массива), подвергнутая деструкции утоненная кора основания Северо-Чукотского прогиба, земная кора поднятия Менделеева с относительно повышенной мощностью и преобладанием нижнего слоя, расположенная чуть западнее древняя кора поднятия Де-Лонга и чуть восточнее — древняя, существенно сиалическая кора Чукотского плато с повышенной мощностью верхнего корового слоя. Особенности глубинного строения этих геоструктур определяются закономерно организованной следующей совокупностью комплексов: недислоцированного осадочного чехла; дислоцированных и метаморфизованных образований супракрустальной части консолидированной коры; метаморфических и магматических образований верхней и нижней коры; верхов верхней мантии.

**Верхняя мантия.** Представленные глубинные модели свидетельствуют о вертикальной и латеральной неоднородности подкорового субстрата. На ряде участков в верхней мантии выделяется отражающая граница ( $M_1$ ), расположенная на 5–15 км ниже подошвы земной коры.

Отличительной особенностью плотностной модели этой части разреза является выраженная латеральная неоднородность, соотносящаяся с положением основных геоструктур. Так, в районе Чукотской впадины и восточной части поднятия Менделеева мантийные образования непосредственно ниже границы М обладают относительно низкими плотностями  $3,27\text{--}3,32 \text{ г/см}^3$  при довольно высоком положении внутримантийной сейсмической границы  $M_1$  (примерно на 8 км ниже М). Здесь фиксируется своеобразная линза с пониженными плотностями, в то время как под Северо-Чукотским прогибом и большей частью поднятия Менделеева мантийные образования непосредственно ниже границы М имеют плотность  $3,34$ , а под Чукотским плато —  $3,36 \text{ г/см}^3$ . Под западной и центральной частями поднятия Менделеева верхние мантии характеризуются повышенной плотностью



(3,40–3,42 г/см<sup>3</sup>), что позволяет предполагать экологитовый состав верхней мантии в этом районе.

Большая часть верхнемантийного «слоя» с плотностью 3,34–3,38 г/см<sup>3</sup> в соответствии с общими представлениями может быть сопоставлена с типичной мантией, развитой под континентами. Это может быть слабодеплетированная мантия, состав которой (Н. Я. Кунин, 1989) приближается к дунитам или пикритам.

*Земная кора.* По строению земной коры на представленных глубинных моделях четко обособляются следующие крупные блоки (с юга на север): *Чукотская складчатая область* с относительно мощной низкоскоростной консолидированной корой; *поднятие Врангеля-Геральда (Врангелевский кратонный блок)*, имеющее аналогичную мощность предположительно древней (Остров Врангеля ... , 2003) земной коры; *Северо-Чукотский прогиб* с существенно утоненной консолидированной корой и аномально мощным осадочным чехлом; *поднятие Менделеева* с относительно мощной земной корой, отличающейся повышенной мощностью нижнего слоя; *поднятие Де-Лонга* (западнее Северо-Чукотского прогиба), древняя кора которого отвечает среднему значению мощности для региона; *Чукотское плато* (восточнее поднятия Менделеева) с предположительно древней земной корой, в строении которой преобладает верхняя кора.

*Поднятие Врангеля-Геральда (Врангелевский тектонический блок)* с корой мощностью 30–35 км, уменьшающейся на север в сторону Северо-Чукотского прогиба. Южная граница блока может быть проведена по резким изменениям глубины залегания кровли верхней коры и по увеличению мощности коры за счет ее кристаллической части. Кристаллическая кора северной периферии блока фиксируется под предположительно складчатонадвиговой структурой в южном борту рифтогенного Северо-Чукотского прогиба.

Совокупность скоростной и плотностной моделей (рис. 2 и 3) свидетельствует о более резком снижении мощности верхней коры в северной периферии блока, в то время как в направлении к Чукотской складчатой области существенно снижается мощность нижней коры. Различия в южной и северной периферии блока фиксируются и в скоростях нижней коры. На наш взгляд, это свидетельство рифтогенных процессов, наложенных на северный борт Врангелевского поднятия в конце девона – начале карбона, а затем и в середине юры. Латеральная неоднородность физических параметров, более ярко выраженная в плотностной модели, по всей вероятности, обусловлена как дизъюнктивной тектоникой, так и изменениями вещественного состава коры, в том числе преобразованиями, связанными с полихронным рифтогенезом в районе Северо-Чукотского прогиба.

В расположенном севернее *поднятии Менделеева*, как и во Врангелевском кратонном блоке, можно выделить ряд латеральных блоков. Они отличаются друг от друга прежде всего плотностными параметрами кристаллической коры. Менее детальные данные ГСЗ по профилю Арктика-2005 по сравнению с профилями 5-АР и Арктика-2012 не позволили уловить различий в скоростных характеристиках нижней и верхней коры блоков поднятия Менделеева. Однако в целом нижняя кора здесь характеризуется повышенными скоростями распространения продольных волн от 6,8 до 7,2 км/с.

В пределах всего поднятия отмечается выдержанная по простиранию мощная, до 20 км, нижняя кора при общей мощности всей коры 32–34 км.

Южный блок поднятия Менделеева погребен под осадочным комплексом рифтогенного Северо-Чукотского прогиба. Блок является, по-видимому, проработанной постэлмирическим рифтогенезом окраинной частью поднятия, на что может указывать небольшая мощность верхней коры от 5 до 8 км, нарастающая в северном направлении. В том же направлении растет и мощность нижней коры, увеличиваясь на коротком отрезке почти в два раза – от 12 до 20 км.

Центральный блок поднятия Менделеева в районе пересечения профилей Арктика-2005 и Арктика-2012 характеризуется выдержанной и увеличенной мощностью нижней коры (18–20 км), что принято связывать с магматическим андерплейтингом из-за внутриплитного основного вулканизма и формированием магматической провинции HALIP в этой части Арктики [38].

Северный блок, выделяемый на окончании профиля Арктика-2005, представляет собой, по нашему мнению, ядро данной геоструктуры – поднятия Менделеева. В целом строение коры подобно таковому предыдущего блока. Правда, намечается тенденция к увеличению в северном направлении мощности верхней коры от 8 до 14 км при сокращении нижней коры до 15 км. Это может свидетельствовать об уменьшении влияния мелового базальтового магматизма на процессы в нижней коре в северном направлении. Такое различие может объясняться как нахождением под центральной частью поднятия Менделеева мантийного диапира с экологитовым ядром, так и процессами базификации коры. Не исключено, что границы между описываемыми блоками имеют тектоническую природу.

Особенности нижней коры в изучаемом разрезе определяются двумя обстоятельствами. Во-первых, скоростные свойства отличаются от сопоставимых данных по другим морским регионам повышенным уровнем значений (приблизительно на 0,3–0,4 км/с), а во-вторых, слагающие ее комплексы распространены прерывисто. Эти особенности отражают региональную специфику глубинного строения данного региона и заслуживают определенного внимания.

Скоростные параметры, аналогичные вышеприведенным, нередко встречаются в пределах Евразийской континентальной коры. Так, в нижней коре Свекофеннской и Карельской провинций Балтийского щита отмечается увеличение скоростей  $V_p$  до 7,2–7,3 км/с, начиная с глубины 35 км (Т. Janik et al., 2007). **Относительно высокоскоростным** является и кристаллический фундамент Сибирской платформы. В нижней коре скорость достигает максимальных значений – 7,2 км/с (Атлас «Опорные геолого-геофизические профили России», 2013). При этом участки с нижней корой этого типа имеют значительные латеральные размеры (несколько сот километров) [13].

Строение и предполагаемый состав верхней коры имеют важнейшее значение для решения вопросов тектонического районирования и, по общему мнению, служат, наряду с мощностью коры, определяющими признаками для отнесения коры региона к континентальному типу. В пределах поднятия Менделеева по сравнению с общепризнано

континентальным Чукотским поднятием мощность земной коры практически не уменьшается, но существенно утончается верхняя кора (до 10–12 км). Еще меньше мощность верхней коры в пределах рифтогенных прогиба Вилькицкого (около 8 км) и Чукотской впадины (менее 5 км). Этот тип коры (с нормальной или несколько уменьшенной общей мощностью, но существенно увеличенной мощностью нижней коры) редко встречается на континентах, но характерен для большинства Центрально-Арктических поднятий. Результаты плотностного моделирования (рис. 3) ярко демонстрируют латеральную изменчивость верхней консолидированной коры. В данный комплекс, прослеживаемый вдоль профиля Арктика-2012, включены слои со скоростью 6,0–6,5 км/с и плотностью от 2,69 до 2,83 г/см<sup>3</sup>. Их мощность от 5 (Чукотская впадина) до 20 км (Чукотское плато). Как скорости, так и плотности в пределах верхней коры нарастают с градиентом, примерно в 3–5 раз превышающим градиент нарастания этих параметров в нижней коре. Таким образом, верхняя кора здесь является самой гетерогенной частью разреза, что весьма типично для континентального типа земной коры.

Между поднятиями Врангеля-Геральда на юге и Менделеева на севере расположен наложенный рифтогенный *Северо-Чукотский прогиб*. Под ним фиксируется растянутая кора общей мощностью 28–30 км. Из них до 14–16 км занимает осадочный чехол, 2–4 км супракрустальный (переходный) комплекс и менее 10–12 км приходится на кристаллическую кору. Мощность верхней коры со скоростью распространения продольных волн около 6,2 км/с и отношением  $V_p/V_s$  1,71–1,73 в центральной части данного блока сокращается до 3–5 км.

Переходный комплекс, выделяемый по скоростным и плотностным параметрам, по-видимому, включает в себя дислоцированные и в разной степени метаморфизованные структурно-вещественные образования супракрустальной части земной коры, залегающие на раннедокембрийской континентальной кристаллической коре кратона Арктида (Гиперборея) и Врангелевского кратонного блока. В пределах практически всех профилей складчато-метаморфический (переходный) комплекс мощностью от 2 до 5 км может быть сложен позднедокембрийскими(?) и палеозойскими отложениями чехла кратона, в который, по мнению авторов, могут входить позднепротерозойские (для поднятий Врангелевское и Де-Лонга), франклинские (кембрий–девон) и элсмирские (карбон – средняя юра) комплексы.

Драгированные обломки гранитогнейсов с поднятия Менделеева, по материалам высокоширотных экспедиций «Арктика-2000» и «Арктика-2005» [8, 9, 26], показали исключительно архейский возраст, габродолериты – неопротерозойский, а обломочные цирконы из песчаников дали неопротерозойские и палеозойские определения. Кроме того, опробование эскарпов в ходе экспедиции «Арктика-2012» убедительно показало, что таких пород на поверхности поднятия Менделеева довольно много (и в коренных выходах на морское дно, и в элювии, и в перемещенных обломках) [20, 21, 35]. Карбонатные и терригенные породы палеозойского платформенного чехла в составе акустического фундамента характеризуются некоторым метаморфизмом, что может свидетельствовать о мезозойских крупных тектонических событиях в регионе.

Собственно кровлю акустического фундамента (подшву осадочного чехла) почти повсеместно на поднятия Менделеева слагает вулканогенная толща базитов, характеризующаяся в сейсмической записи мелкой рябью. Исследования сейсмических материалов, проведенные В. Бруволл с соавторами [29], позволили им предположить, что размытый характер границы акустического фундамента вызван наличием в составе его верхних горизонтов лав и туфов базальтов, сходных с базальтами плато Оттонг-Ява и значительно отличающихся от базальтов срединно-океанических хребтов. Возраст базальтов предположительно раннемеловой (120 млн лет). В юрско-меловое время поднятие Менделеева скорее всего представляло собой низкостоящую сушу со множеством отдельных островов, снос с которого шел в том числе и в облекающий его с юго-запада прогиб Вилькицкого [14].

На шельфе Чукотского моря и в Южно-Чукотском прогибе почти все российские и американские исследователи датируют осадочный чехол второй половиной нижнего мела – кайнозойем. Это и понятно, поскольку акватория располагается в области позднемезозойской складчатости, установленной на Чукотке, о-ве Врангеля и западном побережье Аляски. Здесь выделяется так называемая Новосибирско-Чукотско-Брукская орогенная область (В. Е. Хаин и др., 2009).

На структуру, возраст и состав осадочного выполнения Северо-Чукотского прогиба существует несколько точек зрения, кратко изложенных в начале статьи. Невысокие в целом скоростные характеристики разреза осадочного чехла в пределах этой структуры (скорость распространения продольных волн 5,2–5,5 км/с для пород на глубине около 15–16 км, лежащих непосредственно на фундаменте) и сейсмическая запись на временных разрезах МОВ-ОГТ говорят о преимущественно терригенном составе осадочного выполнения прогиба. Например, в американской скв. Попкорн, вскрывшей элсмирский комплекс, значения скорости для формации Лисберн, преимущественно карбонатной, на глубинах 2380–3110 м установлены от 3350 до 6100 м/с при средней 4980 м/с [39]. С нашей точкой зрения соотносится и мнение некоторых зарубежных исследователей, согласно которым прогиб в основном заполнен меловыми и кайнозойскими осадками [32, 40].

Предложенная нами ранее [14] модель развития осадочного выполнения Северо-Чукотского прогиба с наличием в разрезе волновода и двух залегающих один под другим бассейнов, различающихся источниками сноса, подтверждает тезис о формировании осадочного чехла за счет денудации «северной» суши при формировании нижнебрукского, а возможно, и нижележащего бофортского комплексов в раннемеловое время. При переходе из прогиба Вилькицкого на поднятие Менделеева мощность комплекса снижается до 200–300 м и только в локальных прогибах возрастает до 1000 м, что тоже косвенно может подтверждать наличие здесь континентальных условий для осадконакопления.

**Заключение.** Рассмотренные выше особенности глубинного строения земной коры и верхней мантии области сочленения Центрально-Арктических поднятий Американо-Чукотского бассейна с шельфовыми структурами северо-восточной окраины

Евразийского континента позволяют прийти к определенным выводам.

*Поднятые Врангеля-Геральда (Врангелевский кратонный блок)* предположительно обладает наиболее древней континентальной корой. По общей мощности и высокой степени дифференцированности, которая говорит о завершенности процессов консолидации, земная кора этого блока резко отличается от таковой смежных геоструктур.

*Кратонный блок Менделеева* объединяет поднятие Менделеева, Чукотскую впадину и Чукотский бордерленд. По структурному рисунку плотностной модели, общей мощности коры (до 32–34 км) и соотношению верхней и нижней коры собственно поднятие Менделеева отчетливо делится на западную и восточную части. В западном блоке доля верхней коры сокращена. Восточный блок выглядит более сиаличным; мощность верхней коры в нем резко уменьшается в сторону Чукотской впадины.

Аномальными зонами с контрастным чередованием высоко- и низкоплотных/скоростных объектов в разрезе выделяются участки с интенсивно проявленным меловым базальтовым вулканизмом HALIP, предопределяющим базификацию коры и повышенную мощность ее нижней части (до 20 км). Куполовидное поднятие высокоскоростной мантии в западной и центральной частях поднятия Менделеева представляется сводом мантийного диапира (в терминах плюм-тектоники), в прошлом разогrevшего HALIP. Скоростные и плотностные параметры коры позволяют представить поднятие Менделеева как блок с двухслойной раннедокембрийской континентальной корой мощностью около 30 км и предположить наличие в составе акустического фундамента поднятия Менделеева верхнедокембрийских(?) и палеозойских отложений чехла кратона Арктида, которые слагают переходный комплекс мощностью от 5 до 12 км, расположенный ниже акустического фундамента, предположительно включающих доэлсмирские (кембрий–девон) и элсмирские (карбон–юра) образования.

В пределах собственно поднятия Менделеева, по сравнению с общепризнанно континентальными поднятиями – Чукотским, Де-Лонга и Врангелевским, мощность земной коры практически не уменьшается, но существенно утончается верхняя кора (до 10–12 км). Подтверждается выделение особого типа континентальной коры с нормальной или несколько уменьшенной мощностью, но существенно увеличенной нижней корой.

*Чукотская впадина* резко отличается по глубинному строению от прилегающих с запада и востока поднятия Менделеева и Чукотского плато и представляет собой рифтогенную клинораздвиговую структуру между двумя жесткими глыбами континентальной коры. Она четко отделена предполагаемыми глубинными разломами от окружающих ее с запада и востока структур. Ее консолидированная кора утончена до 12–15 км, а маломощная верхняя кора обладает аномально высокой плотностью порядка 2,80 г/см<sup>3</sup>.

*Чукотское поднятие*, вероятнее всего, представляет собой осколок древнего кратона (Арктида?). Высокая сиаличность земной коры этой структуры (мощность верхней коры значительно превышает мощность нижней) сопряжена как с отсутствием здесь мелового основного магматизма, широко проявленного на поднятии Менделеева, так и с пограничным характером структуры перед

фронтом каледонских и/или мезозойских деформаций, по-видимому, находящейся между Чукотским поднятием и хр. Нортвинд.

*Северо-Чукотский прогиб* рассматривается как рифтогенный с двумя этапами развития: постэлсмирским и мезозойским. Прогиб в разрезе характеризуется большой мощностью осадочного чехла (до 14–16 км), ясно выраженным двучленным его строением в плотностной модели (2,3 и 2,5 г/см<sup>3</sup>). Низы осадочного разреза, по-видимому, слагают рифтовый бофортский комплекс, отличающийся резко повышенными скоростными и плотностными значениями и характерной четкостью отражателей по сравнению с вышележащими отложениями. Фундамент характеризуется значительной раздробленностью, сбросами и, возможно, сдвигами. В глубинном строении структура характеризуется маломощной (не более 30 км), плотной и высокоскоростной корой, представленной нижним слоем (до 25 км), и маломощной сиалической верхней корой (до 5 км).

Подчеркнем, что каркас протяженных пересекающихся сейсмических профилей, обеспечивающих оценку скоростных (ГСЗ) и структурных (МОВ-ОГТ) параметров, стал надежной основой для создания 3D модели глубинного строения земной коры и верхней мантии одного из сложнейших регионов Арктического шельфа России. Фактическими данными подтверждена не только непрерывность типичного для континентальной коры верхнекорового слоя, который непосредственно прослеживается от Чукотки складчатой области через фундамент мощного Северо-Чукотского осадочного бассейна к поднятию Менделеева, но и отмечено, что в юрско-меловое время последнее представляло собой источник сноса, что еще раз подтверждает его континентальную природу.

1. Арктический бассейн (геология и морфология). – СПб.: ВНИИОкеангеология, 2017. – 291 с.

2. *Виноградов В.А., Горячев Ю.В., Гусев Е.А.* и др. Осадочный чехол Восточно-Арктического шельфа России и условия его формирования в системе материк–океан // 60 лет в Арктике, Антарктике и Мировом океане / под ред. В.Л. Иванова. – СПб.: ВНИИОкеангеология, 2008. – С. 63–78.

3. Геологическое строение СССР и закономерности размещения полезных ископаемых. Т. 9: Моря Советской Арктики / под ред. И.С. Грамберга, Ю.В. Погребницкого. – Л.: Недра, 1984. – 280 с.

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

5. *Дараган-Сушова Л.А.* К обоснованию стратиграфической привязки опорных сейсмических горизонтов на Восточно-Арктическом шельфе и в области Центрально-Арктических поднятий / Л.А. Дараган-Сушова, Н.Н. Соболев, Е.О. Петров, Л.Р. Гринько, Н.А. Петровская, Ю.И. Дараган-Сушов // Регион. геология и металлогения. 2014. № 58. – С. 5–21.

6. *Деменицкая Р.М.* Кора и мантия Земли. 2-е изд. – М.: Недра, 1975. – 256 с.

7. *Заманский Ю.Я., Иванова Н.Н., Лангинен А.Е., Сорokin М.Ю.* Сейсмические исследования земной коры в экспедиции «Арктика-2000» // Геолого-геофизические характеристики литосферы Арктического региона. Вып. 4. – СПб.: ВНИИОкеангеология, 2002. – С. 24–31.

8. *Кабаньков В.Я., Андреева И.А.* О геологической истории глубоководной части Американо-Чукотского суббассейна



// 60 лет в Арктике, Антарктике и Мировом океане / под ред. В.Л. Иванова. – СПб.: ВНИИОкеангеология, 2008. – С. 293–305.

9. Кабаньков В.Я., Андреева И.А., Иванов В.Н. О происхождении донных осадков, поднятых на геотраверзе «Арктика-2000» в Северном Ледовитом океане (район поднятия Менделеева) // Докл. РАН. 2004. Т. 399. № 2. – С. 224–226.

10. Кашубин С.Н. Типы земной коры Циркумполярной Арктики / С.Н. Кашубин, Н.И. Павленкова, О.В. Петров, Е.Д. Мильштейн, С.П. Шокальский, Ю.М. Эринчек // Регион. геология и металлогения. 2013. № 55. – С. 5–20.

11. Кашубин С.Н. Глубинное строение земной коры и верхней мантии поднятия Менделеева по профилю ГСЗ Арктика-2012 / С.Н. Кашубин, О.В. Петров, И.М. Артемьева, А.Ф. Морозов, Д.В. Вяткина, Ю.С. Гольшева, Т.В. Кашубина, Е.Д. Мильштейн, А.В. Рыбалка, Ю.М. Эринчек, Т.С. Сакулина, Н.А. Крупнова // Регион. геология и металлогения. 2016. № 65. – С. 16–35.

12. Кашубин С.Н. Карта мощности земной коры Циркумполярной Арктики / С.Н. Кашубин, О.В. Петров, Е.А. Андросов, А.Ф. Морозов, В.Д. Каминский, В.А. Поселов // Регион. геология и металлогения. 2011. № 46. – С. 5–13.

13. Кашубин С.Н. Типы земной коры Центральной и Северо-Восточной Азии, Дальневосточной и Арктической областей перехода континент–океан / С.Н. Кашубин, О.В. Петров, Е.Д. Мильштейн, Е.А. Андросов, И.Ю. Винокуров, С.П. Шокальский // Регион. геология и металлогения. 2018. № 73. – С. 6–18.

14. Кашубин С.Н. Волновод в осадочном разрезе Северо-Чукотского прогиба: сейсмические данные и возможные геологические модели / С.Н. Кашубин, О.В. Петров, Т.М. Яварова, И.Ю. Винокуров, Н.А. Крупнова, Т.С. Сакулина // Регион. геология и металлогения. 2017. № 72. – С. 5–14.

15. Киселев Ю.Г., Деменицкая Р.М. Хребет Менделеева – погруженная структура Канадско-Гренландской литосферной плиты // Геофизические методы разведки в Арктике. Вып. 9. – Л.: Ротапринт НИИГА, 1974. – С. 102–104.

16. Конвенция Организации Объединенных Наций по морскому праву. 1982. – 277 с.

17. Красовский С.С. Гравитационное моделирование глубинных структур земной коры и изостазия. – Киев: Наукова думка, 1989. – 248 с.

18. Красовский С.С. Отражение динамики земной коры континентального типа в гравитационном поле. – Киев: Наукова думка, 1981. – 112 с.

19. Мильштейн Е.Д., Петров Б.В. и др. Развитие методологических основ и технологий геологической интерпретации глубинных геофизических данных на опорных и региональных профилях с созданием специализированной геолого-картографической продукции и переоценкой минерагенического потенциала территорий // Известия ВСЕГЕИ. Т. 7 (55). – СПб.: Изд-во ВСЕГЕИ, 2008. – С. 135–155.

20. Морозов А.Ф. Новые геологические данные, обосновывающие континентальную природу области Центрально-Арктических поднятий / А.Ф. Морозов, О.В. Петров, С.П. Шокальский, С.Н. Кашубин, А.А. Кременецкий, М.Ю. Шкатов, В.Д. Каминский, Е.А. Гусев, Г.Э. Грикуров, П.В. Рекант, С.С. Шевченко, С.А. Сергеев, В.В. Шатов // Регион. геология и металлогения. 2013. № 53. – С. 34–55.

21. Морозов А.Ф., Шкатов М.Ю., Корнеев О.Ю., Кашубин С.Н. Комплексная геолого-геофизическая экспедиция «Арктика-2012» по обоснованию континентальной природы поднятия Менделеева в Северном Ледовитом океане // Разведка и охрана недр. 2014. № 3. С. 22–27.

22. Океанология: геофизика океанского дна / под ред. Ю.П. Непрочнова. – М.: Наука, 1979. – 470 с.

23. Петровская Н.А., Савишкина М.А. Сопоставление сейсмокомплексов и основных несогласий в осадочном чехле шельфа Восточной Арктики // Нефтегазовая гео-

логия. Теория и практика. – 2014. Т. 9. № 3. [http://www.ngtr.ru/rub/4/39\\_2014.pdf](http://www.ngtr.ru/rub/4/39_2014.pdf) (дата обращения: 06.10.2017).

24. Петрофизика: Справочник. В трех книгах. Книга третья: Земная кора и мантия / под ред. Н.Б. Дортман. – М.: Недра, 1992. – 286 с.

25. Поселов В.А., Жолондз С.М., Трухалев А.И. и др. Карта мощности осадочного чехла Северного Ледовитого океана // Геолого-геофизические характеристики литосферы Арктического региона. – СПб.: ВНИИОкеангеология, 2012. – С. 8–14 (Тр. ВНИИОкеангеология. Т. 223. Вып. 8).

26. Поселов В.А. Строение и эволюция земной коры области сочленения поднятий Американо-Сибирского суббассейна с Восточно-Арктическим шельфом (в связи с проблемой ВГКШ Российской Федерации в СЛО) / В.А. Поселов, В.Д. Каминский, В.Л. Иванов, Г.П. Аветисов, В.В. Буценко, А.И. Трухалев, В.К. Паламарчук, С.М. Жолондз // Строение и история развития литосферы. – М.: Paulsen, 2010. – С. 599–635.

27. Поселов В.А., Аветисов Г.П., Каминский В.Д. и др. Российские арктические геотраверсы. – СПб.: ВНИИОкеангеология, 2011. – 172 с.

28. Artemieva I.M. Lithosphere: an interdisciplinary approach. – NY: Cambridge University Press, 2011. – 773 pp.

29. Bruvold V. The nature of the acoustic basement on Mendeleev and northwestern Alpha ridges, Arctic Ocean / V. Bruvold, Y. Kristoffersen, B.J. Coakley, J.R. Hopper, S. Planke, A. Kandilarov // Tectonophysics. 2012. Vol. 514–517. – P. 123–145.

30. Christensen N.I., Mooney W.D. Seismic velocity structure and composition of the continental crust: A global view // J. Geophys. Res. 1995. Vol. 100. – P. 9761–9788.

31. Coffin M.F., Eldholm O. Large igneous provinces: Crustal structure, dimensions, and external consequences // Reviews of Geophysics. 1994. Vol. 32. – P. 1–36.

32. Drachev S.S., Malyshev N.A., Nikishin A.M. Tectonic history and petroleum geology of the Russian Arctic Shelves: an overview // Petroleum Geology Conference series. 2010. Vol. 7. – P. 591–619.

33. Forsyth D., Morel A.L., Huissier P., Asudeh I., Green A. Alpha Ridge and iceland-products of the same plume? // J. Geodyn. 1986. Vol. 6. – P. 197–214.

34. 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. 2011. 116. – P. 1–26.

35. Gusev E. Morphology of seamounts at the Mendeleev Rise, Arctic Ocean / E. Gusev, P. Rekant, V. Kaminsky, A. Krylov, A. Morozov, S. Shokalsky, S. Kashubin // Polar Research, 2017. 36:1, 1298901, DOI:10.1080/17518369.2017.1298901. – P. 1–10.

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

37. 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. 165. – P. 527–544.

38. 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.

39. Sherwood K.W., Craig J.D., Lothamer R.T., Johnson P.P., Zerwick S.A. Chuckchi shelf assessment province // Undiscovered oil and gas resources, Alaska Federal offshore: U.S. Mineral Management Service OCS Monograph MMS 98-0054. 1998. – P. 115–196.

40. Thurston D.K., Theiss L.A. Geologic report for the Chukchi Sea planning area, Alaska // OCS Report MMS 87-0046. Anchorage. Alaska. 1987. 193 p.

1. Arkticheskij bassejn (geologiya i morfologiya) [The Arctic basin (geology and morphology)]. St. Petersburg: VNIIOkeanogeologiya. 2017. 291 p.

2. Vinogradov V.A., Goryachev Yu.V., Gusev E.A. i dr. Sedimentary cover of the East Arctic shelf of Russia and the conditions of its formation in the continental–ocean system. *60 years in the Arctic, Antarctic and the World Ocean*. Ed. V.L. Ivanova. St. Petersburg: VNIIOkeangeologiya. 2008. Pp. 63–78. (In Russian).
3. Geologicheskoe stroenie SSSR i zakonmernosti razmeshcheniya poleznykh iskopaemykh. Morya Sovetskoy Ark'tiki [The geological structure of the USSR and the regularities of the location of minerals. The seas of the Soviet Arctic]. Vol. 9. Eds. by I.S. Gramberg, Yu.V. Pogrebickij. Leningrad: Nedra. 1984. 280 p.
4. Geologiya i poleznye iskopaemye Rossii. T. 5: Ark'ticheskie i dal'nevostochnnye morya. Kn. 1: Ark'ticheskie morya [Geology and minerals of Russia. Vol. 5: Arctic and Far Eastern seas. Book 1: Arctic Seas] St. Petersburg: VSEGEI. 2004. 468 p.
5. Daragan-Sushchova L.A., Sobolev N.N., Petrov E.O., Grin'ko L.R., Petrovskaya N.A., Daragan-Sushchov Yu.I. To the substantiation of the stratigraphic binding of the reference seismic horizons on the East Arctic shelf and in the region of the Central Arctic uplifts. *Region. geologiya i metallogeniya*. 2014. No 58, pp. 5–21. (In Russian).
6. Demenickaya R.M. Kora i mantiya Zemli [The Earth's crust and mantle]. 2-e izd. Moscow: Nedra. 1975. 256 p.
7. Zamanskij Yu.Ya., Ivanova N.N., Langinen A.E., Sorokin M.Yu. Seismic studies of the earth's crust in the expedition "Arctic 2000". *Geological and geophysical characteristics of the lithosphere of the Arctic region*. Iss. 4. St. Petersburg: VNIIOkeangeologiya. 2002. Pp. 24–31. (In Russian).
8. Kaban'kov V.Ya., Andreeva I.A. On the geological history of the deep-water part of the Amerasian sub-basin. *60 years in the Arctic, Antarctic and the World Ocean*. Eds. by V.L. Ivanov. St. Petersburg: VNIIOkeangeologiya. 2008. Pp. 293–305. (In Russian).
9. Kaban'kov V.Ya., Andreeva I.A., Ivanov V.N. On the origin of bottom sediments raised on geotraverse "Arctic 2000" in the Arctic Ocean (Mendeleev's uplifting region). *Dokl. RAN*. 2004. Vol. 399. No 2, pp. 224–226. (In Russian).
10. Kashubin S.N., Pavlenkova N.I., Petrov O.V., Mil'shtejn E.D., Shokal'skij S.P., Ehrinček Yu.M. Types of the Earth's crust of the Circumpolar Arctic. *Region. geologiya i metallogeniya*. 2013. No 55. Pp. 5–20. (In Russian).
11. Kashubin S.N., Petrov O.V., Artemieva I.M., Morozov A.F., Vyatkina D.V., Golysheva Yu.S., Kashubina T.V., Milshtejn E.D., Rybalka A.V., Erinček Yu.M., Sakulina T.S., Krupnova N.A. Deep structure of the Earth's crust and upper mantle of the Mendeleev Rise along the Arctic 2012 DSS line. *Region. geologiya i metallogeniya*. 2016. No 65, pp. 16–35. (In Russian).
12. Kashubin S.N., Petrov O.V., Androsov E.A., Morozov A.F., Kaminskij V.D., Poselov V.A. Map of the thickness of the Earth's crust of the Circumpolar Arctic. *Region. geologiya i metallogeniya*. 2011. No 46, pp. 5–13. (In Russian).
13. Kashubin S.N., Petrov O.V., Mil'shtejn E.D., Androsov E.A., Vinokurov I.Yu., Shokal'skij S.P. Tipy zemnoj kory Central'noj i Severo-Vostochnoj Azii, Dal'nevostochnoj i Ark'ticheskoj oblasti perekhoda kontinent – okean. *Region. geologiya i metallogeniya*. 2018. No 73, pp.6–18. (In Russian).
14. Kashubin S.N., Petrov O.V., Yavarova T.M., Vinokurov I.Yu., Krupnova N.A., Sakulina T.S. Volnovod v osadochnom razreze Severo-Chukotskogo progiba: sejsmicheskie dannye i vozmozhnye geologicheskie modeli. *Region. geologiya i metallogeniya*. 2017. No 72, pp. 5–14. (In Russian).
15. Kiselev Yu.G., Demenickaya R.M. Mendeleev Ridge – submerged structure of the Canadian-Greenlandic lithospheric plate. *Geophysical methods of exploration in the Arctic*. Iss. 9. Leningrad. 1974. Pp. 102–104. (In Russian).
16. Konvenciya Organizacii Ob"edinennykh Nacij po morskomu pravu [United Nations Convention on the Law of the Sea]. 1982. 277 p.
17. Krasovskij S.S. Gravitacionnoe modelirovanie glubinyh struktur zemnoj kory i izostaziya [Gravitational modeling of deep crustal structures and isostasy]. Kiev: Naukova dumka. 1989. 248 p.
18. Krasovskij S.S. Otrazhenie dinamiki zemnoj kory kontinental'nogo tipa v gravitacionnom pole [Reflection of the dynamics of the continental crust in the gravitational field]. Kiev: Naukova dumka. 1981. 112 p.
19. Mil'shtejn E.D., Petrov B.V. i dr. Development of methodological foundations and technologies for geological interpretation of deep geophysical data on reference and regional profiles with the creation of specialized geological and cartographic products and reassessment of the mineralogical potential of the territories. *Izvestiya VSGEUI. Vol. 7 (55)*. St. Petersburg: Izd-vo VSEGEI. 2008. Pp. 135–155. (In Russian).
20. Morozov A.F., Petrov O.V., Shokalsky S.P., Kashubin S.N., Kremenetsky A.A., Shkatov M.Yu., Kaminsky V.D., Gusev E.A., Griukurov G.E., Recant P.V., Shevchenko S.S., Sergeev S.A., Shatov V.V. New geological data, substantiating the continental nature of the Central Arctic uplifts area. *Region. geologiya i metallogeniya*. 2013. No 53, pp. 34–55. (In Russian).
21. Morozov A.F., Shkatov M.Yu., Korneev O.Yu., Kashubin S.N. Complex geological-geophysical expedition "Arctic-2012" to substantiate the continental nature of Mendeleev's uplift in the Arctic Ocean. *Razvedka i ohrana nedr*. 2014. No 3, pp. 22–27. (In Russian).
22. Okeanologiya: geofizika okeanskogo dna [Oceanology: geophysics of the ocean floor]. Ed. by Yu.P. Neprochnova. Moscow: Nauka. 1979. 470 p.
23. Petrovskaya N.A., Savishkina M.A. Comparison of seismic complexes and major disagreements in the sedimentary cover of the shelf of the Eastern Arctic. *Neftegazovaya geologiya. Teoriya i praktika*. 2014. Vol. 9. No 3. (In Russian). [http://www.ngtp.ru/rub/4/39\\_2014.pdf](http://www.ngtp.ru/rub/4/39_2014.pdf) (06.10.2017).
24. Petrofizika: Spravochnik. V trekh knigah. Kniga tret'ya. Zemnaya kora i mantiya [Petrophysics: Handbook. In three books. The third book. Earth crust and mantle]. Ed. by N.B. Dortman. Moscow: Nedra. 1992. 286 p.
25. Poselov V.A., Zholondz S.M., Truhalev A.I. i dr. Map thickness of the sedimentary cover of the Arctic Ocean. *Geological and geophysical characteristics of the lithosphere of the Arctic region*. St. Petersburg: VNIIOkeangeologiya. 2012. Pp. 8–14 (Proc. VNIIOkeangeologiya. Vol. 223. Iss. 8). (In Russian).
26. Poselov V.A., Kaminskij V.D., Ivanov V.L., Avetisov G.P., Bucenko V.V., Truhalev A.I., Palamarchuk V.K., Zholondz S.M. Structure and evolution of the earth's crust of the articulation of the uplifts of the Amerasian sub-basin with the East Arctic shelf (in connection with the problem of the Russian Arctic Fleet in the Arctic Ocean). *The structure and history of the development of the lithosphere*. Moscow: Paulsen. 2010. Pp. 599–635. (In Russian).
27. Poselov V.A., Avetisov G.P., Kaminsky V.D. et al. Rossijskie arkticheskie geotraversy [Russian Arctic Geotraverses]. St. Petersburg: VNIIOkeangeologia. 2011. 172 p.
28. Artemieva, I.M. 2011: Lithosphere: an interdisciplinary approach. Cambridge University Press, NY. 773.
29. Bruvoll, V. 2012: The nature of the acoustic basement on Mendeleev and northwestern Alpha ridges, Arctic Ocean. In Bruvoll, V., Kristoffersen Y., Coakley, B.J., Hopper, J.R., Planke, S., Kandilarov, A. (eds.): *Tectonophysics. Vol. 514–517*. 123–145.
30. Christensen, N.I., Mooney, W.D. 1995: Seismic velocity structure and composition of the continental crust: A global view. *J. Geophys. Res.* 100. 9761–9788.
31. Coffin, M.F., and Eldholm, O. 1994: Large igneous provinces: Crustal structure, dimensions, and external consequences. *Reviews of Geophysics*. 32. 1–36.
32. Drachev, S.S., Malyshev, N.A., Nikishin, A.M. 2010: Tectonic history and petroleum geology of the Russian Arctic Shelves: an overview. *Petroleum Geology Conference series. Vol. 7*. 591–619.
33. Forsyth, D., Morel, A.L., Huissier, P., Asudeh, I., Green, A. 1986: Alpha Ridge and iceland-products of the same plume? *J. Geodyn.* 6. 197–214.
34. 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.

35. Gusev, E. 2017: Morphology of seamounts at the Mendeleev Rise, Arctic Ocean. *In* Gusev, E., Rekant, P., Kaminsky, V., Krylov, A., Morozov A., Shokalsky, S., Kashubin, S. (eds.): *Polar Research*. 36:1, 1298901, DOI:10.1080/17518369.2017.1298901. 1–10.
36. Petrov, O.V., Smelror, M., Morozov, A.F. 2016: International project. Atlas of geological maps of the Circumpolar Arctic. St. Petersburg: VSEGEI Publishing House. 64.
37. 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.
38. Petrov, O., Morozov, A., Shokalsky, S. et al. 2016: Crustal structure and tectonic model of the Arctic region. *Earth-Science Reviews*. Vol. 154. 29–71.
39. Sherwood, K.W., Craig, J.D., Lothamer, R.T., Johnson, P.P., Zerwick, S.A. 1998: Chuckchi shelf assessment province. *Undiscovered oil and gas resources, Alaska Federal offshore: U.S. Mineral Management Service OCS Monograph MMS 98-0054*. 115–196.
40. Thurston, D.K., Theiss, L.A. 1987: Geologic report for the Chukchi Sea planning area, Alaska. *OCS Report MMS 87-0046*. Anchorage. Alaska. 193.

---

*Кашубин Сергей Николаевич* – доктор геол.-минер. наук, профессор, зам. ген. директора, ВСЕГЕИ<sup>1</sup>. <sergey\_kashubin@vsegei.ru>

*Петров Олег Владимирович* – доктор геол.-минер. наук, доктор экон. наук, ген. директор, ВСЕГЕИ<sup>1</sup>. <vsegei@vsegei.ru>

*Мильштейн Евгения Дововна* – канд. геол.-минер. наук, зав. отделом, ВСЕГЕИ<sup>1</sup>. <evgenia\_milshtein@vsegei.ru>

*Винокуров Илья Юрьевич* – канд. геол.-минер. наук, зам. зав. отделом, ВСЕГЕИ<sup>1</sup>. <ilia\_vinokurov@vsegei.ru>

*Андросов Евгений Александрович* – вед. геофизик, ВСЕГЕИ<sup>1</sup>. <evgeiy\_androsov@vsegei.ru>

*Гольшиева Юлия Сергеевна* – геофизик, ВСЕГЕИ<sup>1</sup>. <juliya\_golysheva@vsegei.ru>

*Ефимова Наталья Николаевна* – вед. геофизик, ВСЕГЕИ<sup>1</sup>. <natalya\_efimova@vsegei.ru>

*Яварова Татьяна Михайловна* – геофизик, ВСЕГЕИ<sup>1</sup>. <tatyana\_yavarova@vsegei.ru>

*Морозов Андрей Федорович* – канд. геол.-минер. наук, зам. руководителя, Федеральное агентство по недропользованию (Роснедра). Ул. Б. Грузинская, 4/6, стр. 1, Москва, 125993, Россия. <amorozov@rosnedra.com>

*Kashubin Sergey Nikolaevich* – Doctor of Geological and Mineralogical Sciences, Professor, Deputy Director General, VSEGEI<sup>1</sup>. <sergey\_kashubin@vsegei.ru>

*Petrov Oleg Vladimirovich* – Doctor of Geological and Mineralogical Sciences, Doctor Economic Sciences, Director General, VSEGEI<sup>1</sup>. <vsegei@vsegei.ru>

*Milshtein Evgenia Dovovna* – Candidate of Geological and Mineralogical Sciences, Head of the entire department, VSEGEI<sup>1</sup>. <evgenia\_milshtein@vsegei.ru>

*Vinokurov Ilya Yurievich* – Candidate of Geological and Mineralogical Sciences, Deputy Head of the entire department. VSEGEI<sup>1</sup>. <ilya\_vinokurov@vsegei.ru>

*Androsov Evgeniy Aleksandrovich* – Leading geophysicist, VSEGEI<sup>1</sup>. <evgeniy\_androsov@vsegei.ru>

*Golysheva Yuliya Sergeevna* – Geophysicist, VSEGEI<sup>1</sup>. <juliya\_golysheva@vsegei.ru>

*Efimova Natalya Nikolaevna* – Candidate of Geological and Mineralogical Sciences, Leading geophysicist, VSEGEI<sup>1</sup>. <natalya\_efimova@vsegei.ru>

*Yavarova Tatyana Mikhailovna* – Geophysicist, VSEGEI<sup>1</sup>. <tatyana\_yavarova@vsegei.ru>

*Morozov Andrey Fedorovich* – Candidate of Geological and Mineralogical Sciences, Deputy Head of the Federal Agency of Mineral Resources (Rosnedra). 4/6 Bol'shaya Gruzinskaya, ctr. 1, Moscow, 125993, Russia. <amorozov@rosnedra.com>

<sup>1</sup> 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.