

УДК [551.24]:[550.834+550.831](268.56)

## СТРУКТУРНАЯ СВЯЗЬ ЧУКОТСКОГО БОРДЕРЛЕНДА И ШЕЛЬФА ЧУКОТСКОГО МОРЯ: ГЕОФИЗИЧЕСКОЕ 3D МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗЕМНОЙ КОРЫ<sup>1</sup>

© 2024 г. А. Л. Пискарев<sup>1, 2, \*</sup>, А. А. Киреев<sup>1</sup>, Г. И. Ованесян<sup>1</sup>, В. А. Поселов<sup>1</sup>, В. А. Савин<sup>2</sup>, О. Е. Смирнов<sup>1</sup>, С. Н. Табырца<sup>1, 2</sup>

<sup>1</sup>Всероссийский научно-исследовательский институт геологии и минеральных ресурсов Мирового Океана им. акад. И.С. Грамберга (ВНИИОкеангеология), д. 1, Английский пр., 190121 Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup>Санкт-Петербургский государственный университет – Институт наук о Земле, д. 7–9, Университетская наб., 199134 Санкт-Петербург, Россия

\*e-mail: apiskarev@gmail.com

Поступила в редакцию 11.04.2024 г.

После доработки 25.04.2024 г.

После повторной доработки 23.08.2024 г.

Принята в печать 30.08.2024 г.

Авторами составлена и рассчитана 3D модель строения земной коры региона, охватывающего Чукотский бордерленд с прилегающими океаническими акваториями и Чукотско-Аляскинским шельфом. Особенностью строения земной коры региона является трехсторонняя обособленность Чукотского бордерленда и наличие переходной области на юге, связывающей бордерленд с Чукотско-Аляскинским шельфом. Прослежена связь между Чукотским бордерлендом и Врангелевским поднятием шельфа Чукотского моря через Северо-Чукотское поднятие, расположенное между Северо-Чукотским прогибом и прогибом Ханна. Отодвигание Чукотского бордерленда с поворотом по часовой стрелке началось с раннемелового времени, так как базальты, залегающие в низах разрезов осадочных толщ вдоль восточной и южной границ Чукотской котловины, имеют обратную намагниченность, т.е. их излияние происходило до начала мелового суперхрона, ~121 млн лет назад. Вблизи верхней границы неокома происходило масштабное сдвиговое перемещение блоков земной коры вдоль восточной границы Чукотского поднятия, имевшей до того надвиговой характер. Данные проведенного геофизического 3D моделирования показывают, что Чукотский бордерленд и Чукотская котловина являются структурными элементами континентальной окраины, так как имеют тесную геологическую связь с континентальным шельфом Чукотского моря.

**Ключевые слова:** Чукотский бордерленд, Чукотско-Аляскинский шельф, сейсморазведка, гравитационные и магнитные аномалии, геофизическое 3D моделирование, земная кора, тектоника

**DOI:** 10.31857/S0016853X24050024, **EDN:** EFXCYW

### ВВЕДЕНИЕ

Установление геологической связи между континентальным шельфом Чукотского моря и Чукотским бордерлендом на протяжении многих десятилетий являлось задачей многочисленных геолого-геофизических исследований. В последнее время эта задача приобрела дополнительную актуальность в связи с разработкой нового варианта Заявки Российской Федерации на расширение в этой области внешней границы континентального шельфа. В рамках решения этой задачи составлена и рассчитана 3D геофизическая модель строения земной коры региона.

Чукотский бордерленд представляет собой выдвинутый в сторону глубоководного бассейна фрагмент континентальной окраины. Чукотское плато, которое является западной частью Чукотского бордерленда, имеет простое строение, выраженное в обширную платообразную вершинную поверхность, и имеет тесную пространственную связь с шельфом. В зоне сочленения с плато шельф образует узкий выступ к северу, бровка шельфа при этом теряет свою выразительность, поскольку внутренний склон имеет здесь малый, менее одного градуса, угол наклона (рис. 1).

Вершинная поверхность Чукотского плато сочленяется с внутренним склоном через седловину. Поверхность плато располагается на глубинах 400–800 м, седловина погружена относительно сопредельных участков всего на 100–200 м.

<sup>1</sup> Дополнительные материалы размещены в электронном виде по DOI: 10.31857/S0016853X24050024, доступны для авторизованных пользователей.

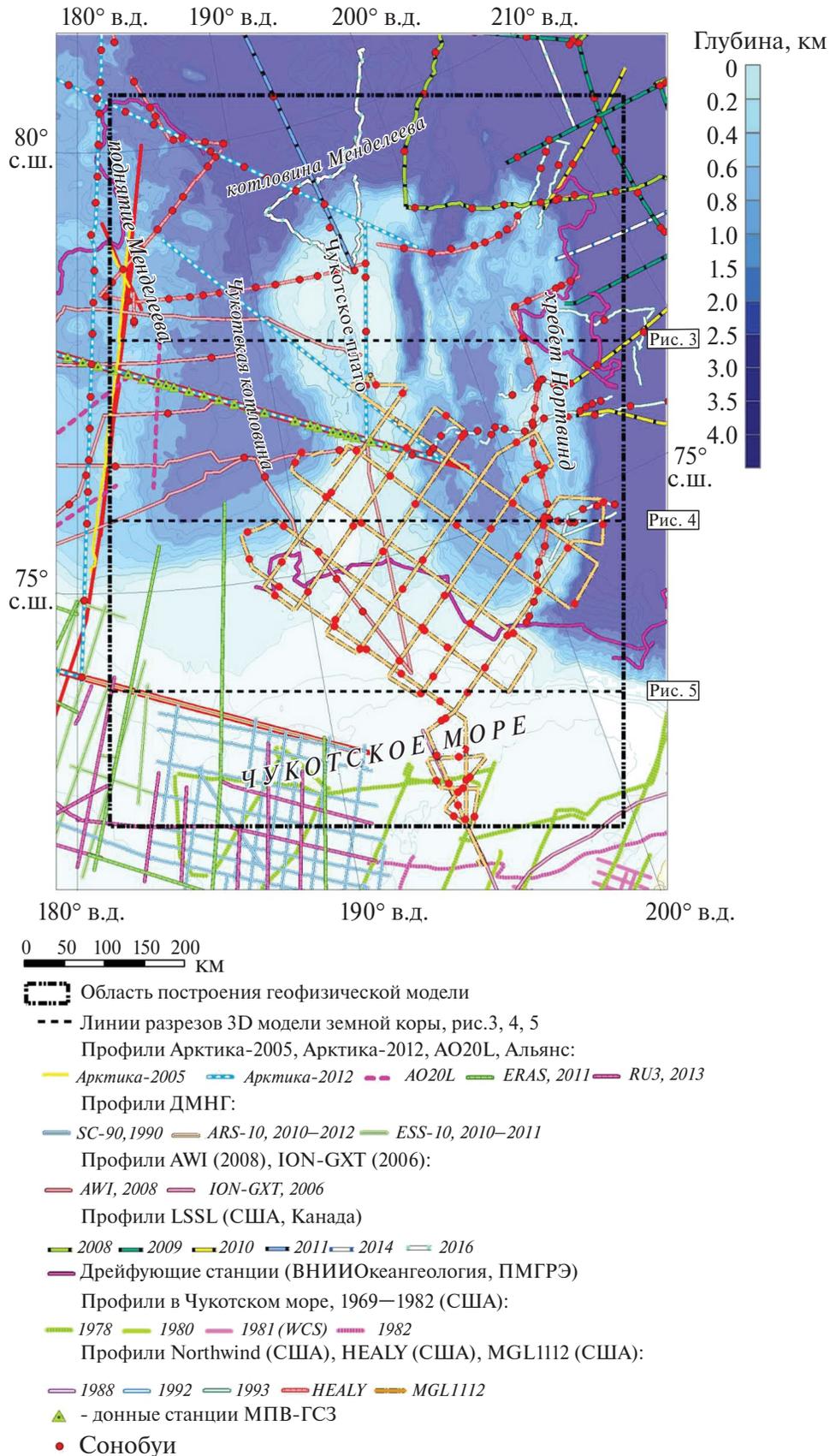


Рис. 1. Батиметрическая карта Чукотского бордерленда и прилегающей части шельфа Чукотского моря сейсмические данные, использованные при 3D моделировании (по данным [14]).

Хребет Нортвинд, занимающий восточную часть Чукотского бордерленда, в наиболее приподнятых частях характеризуются глубинами ~400 м. Хребет Нортвинд погружен (незначительно – на первые сотни метров) относительно шельфа Чукотского моря, но седловина хребта приподнята над абиссальной равниной дна Канадской котловины более чем на 2000 м.

В регионе были выполнены магнитные и гравиметрические съемки различных масштабов и с различными уровнями погрешностей.

Первые аэромагнитные съемки Чукотского бордерленда проводились в конце 1970-х годов по сети маршрутов с межпрофильным расстоянием 10–18 км. В 1997 г. площадь была закрыта американскими исследователями съемкой масштаба 1:100 000 [2].

В 1966–67 гг. в регионе были начаты российскими исследователями наледные и авиадесантные гравиметрические измерения. Погрешность измерения аномалий силы тяжести составляла при этом  $\pm 1.2$ – $1.7$  мГал [2].

В 1996 г. в регионе были выполнены американскими исследователями аэрогравиметрические работы масштаба 1 : 1 000 000, погрешность съемки составила  $\pm 1.8$  мГал. В 2014–2015 гг. юго-западная часть региона была закрыта съемками масштаба 1 : 500 000 с погрешностью  $\pm 0.7$  мГал [12].

В 2000-е годы Чукотская котловина и восточный борт хребта Менделеева были закрыты российскими аэрогеофизическими съемками масштаба 1:500 000 с погрешностью измерений магнитных аномалий в пределах  $\pm 1$ – $4$  нТл, и аномалий силы тяжести  $\pm 0.7$ – $1.2$  мГал [1].

В основу приведенных в нашей статье карт аномалий потенциальных полей и при выполнении модельных расчетов мы использовали обновленные в 2022 г. цифровые модели аномалий гравитационного поля в свободном воздухе и аномального магнитного поля. Карта аномалий магнитного поля была заново построена на основе современной компьютерной обработки цифровой информации [7]. Цифровая модель гравитационных аномалий в свободном воздухе построена на основе обновленной спутниковой модели DTU17 [9].

Плотность сейсморазведочных работ МОВ МПВ и МПВ ГСЗ в исследуемом районе невысокая, с чем и связаны большие допуски в определении границ в осадочном чехле и земной коре.

По данным МОВ МПВ, полученным в 2005 г. в ходе научно-исследовательской экспедиции на

ледоколе USCGC *Healy* (WAGB-20) (Seattle, USA), в зоне перехода от поднятия Менделеева к котловине Менделеева мощность осадочного чехла в северо-западной части изучаемой площади составляет 400–600 м [14] (см. рис. 1). Под осадочным чехлом находится акустический фундамент, скорость продольных волн по его поверхности составляет 3.8–4.0 км/с, на глубине ~3 км под дном котловины Менделеева скорость достигает 6.3 км/с.

На восточном склоне поднятия Менделеева при погружении фундамента по направлению к Чукотской котловине мощность осадочного чехла также колеблется в пределах 400–600 м, скорость акустических продольных волн в акустическом фундаменте в ~3 км от поверхности осадочного чехла достигает значений 4.5–5.8 км/с [11].

По данным исследований, проведенных в рейсе в 2008 г. в Арктику на ледоколе *Healy*, было рассмотрено строение осадочного чехла хребта Нортвинд [10]. По ходу профиля, расположенного вдоль хребта Нортвинд, кайнозойские осадочные толщи, разделенные на Unit 1 (неоген) и Unit II (палеоген), имеют мощность ~1–1.5 км, за исключением локальных поднятий на окончаниях этого профиля, где мощность осадочных толщ уменьшается (см. рис. 1).

Для осадочных пород, залегающих на склоне хребта Нортвинд, уходящем в Канадский бассейн, характерно спокойное покровное залегание только для толщи Unit 1 (неоген). Осадочная толща Unit II (палеоген) вовлечена в тектонические перемещения.

В экспедиции Института полярных и морских исследований им. Альфреда Вегенера (Бремерхафен, Германия – Alfred-Wegener-Institut für Polar und Meeresforschung, AWI) в 2008 г. на ледоколе *Polarstern* были выполнены работы МОВ-ОГТ с постановкой сонобуев на профилях в Чукотской котловине и на Чукотском плато.

В южной части Чукотской котловины на глубине моря 2.2–2.4 км мощность осадочных толщ, включающих отложения, начиная с раннемеловых, составляет от 1.7 до 4 км. В центральной части котловины (глубина моря ~2 км) осадочные толщи, начиная с позднемеловых, имеют мощность <1 км [19].

На юго-западной окраине Чукотского плато мощность толщ олигоцена и неогена составляет ~1.5 км.

На западной границе площади нашего исследования, в южной части поднятия Менделеева осадочные толщи, начиная с раннемеловых отло-

жений, составляют ~5 км. Наибольшая мощность осадочных толщ, >12 км, начиная с раннемеловых отложений, зафиксирована исследованиями в Чукотском море на северо-восточном склоне Северо-Чукотского бассейна [1].

В регионе исследования находятся профили МОВ МПВ 01, 04 и 18, полученные в ходе экспедиции «Арктика-2012» на атомном ледоколе «Россия» (Мурманск, Россия) [1].

Профиль МОВ МПВ-04 пересекает котловину Менделеева в северо-западной части изучаемой площади. Мощность мел–кайнозойского чехла в пределах данного профиля составляет 1–2 км, в локальном грабене в зоне сочленения котловины и Чукотского поднятия мощность чехла увеличивается до 3000–3500 м. В юго-восточной части профиля МОВ МПВ-04 в эскарпах Чукотского плато наблюдаются выходы пород акустического фундамента к поверхности морского дна. Подобный разрез осадочной толщи зафиксирован и на профиле МОВ МПВ-18, проходящем вдоль Чукотского плато [1].

Сейсмический профиль МОВ МПВ-01 пройден с юга на север, от шельфа Восточно-Сибирского моря, вдоль осевой части поднятия Менделеева, до и вдоль западной границы изучаемой площади. Непрерывно вдоль линии профиля МОВ МПВ-01 прослеживается покровный сейсмокомплекс, характеризующийся ненарушенным залеганием и облекающий современную морфоструктуру Центрально-Арктических поднятий. Сейсмокомплекс имеет выдержанную мощность ~200 м и коррелируется с миоцен–четвертичной толщей осадков, вскрытых скважиной АСЕХ-302 на хребте Ломоносова.

Общая мощность осадочного чехла вдоль профиля МОВ МПВ-01 варьирует от 200–300 м на возвышенностях до 3 км в грабенах, разделяющих поднятия, где большая часть разреза сложена мел–эоценовыми отложениями [1].

Профиль МОВ МПВ-03 пересекает Чукотскую котловину и Чукотское плато в центральной части изучаемой площади. Покровный сейсмокомплекс мощностью ~200 м прослеживается вдоль всего профиля. В пределах Чукотской котловины осадочный чехол имеет мощность до 5 км. Основную часть разреза слагают мел–палеоценовые отложения. Мощность чехла Чукотского плато варьирует от 200–300 м на возвышенном блоке до 5000 м в грабене центральной части плато. На восточном склоне Чукотского плато акустический фундамент обнажается в эскарпе высотой 1600 м [1].

## ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ ИСТОРИЯ ФОРМИРОВАНИЯ ЧУКОТСКОГО БОРДЕРЛЕНДА

В 2011г. для установления связи между Чукотским шельфом и Чукотским бордерлендом на площади, покрывающей области сочленения этих структур, были проведены работы на исследовательском судне *Marcus G. Langseth* (MGL-2011) (Lamont-Doherty Earth Observatory (LDEO) of Columbia University), которое является частью флота университета University-National Oceanographic Laboratory System (UNOLS) [21].

В работы входили сейсморазведка МОВ ОГТ (в том числе работы с использованием сонобуев), гравиразведка и магнитометрия. Верхний неогеновый осадочный комплекс на всей исследованной площади имеет мощность от 400 до 800 м, локально увеличивающийся по мощности до 1.5 км в трог, разделяющем Чукотское поднятие и хребет Нортвинд.

Палеогеновый осадочный комплекс имеет наибольшую (до 4 км) мощность в юго-западной части площади проведенных исследований, в пределах северо-восточного склона Северо-Чукотского прогиба. Мощность этого комплекса уменьшается в северо-восточном направлении до нескольких сотен метров. Исключение составляет трог, разделяющий Чукотское поднятие и хребет Нортвинд, где мощность толщ палеогена возрастает до 2 км.

Мощность предположительно меловых отложений на юго-западе площади превышает 8 км, мощность этих отложений быстро уменьшается в направлении на северо-восток к границе Северо-Чукотского прогиба до ~1 км, на Чукотском бордерленде – до первых сотен метров.

Профили МПВ ГСЗ выполнены в экспедициях [1]:

- «Арктика-2012» на атомном ледоколе «Россия» (Россия) – профиль МПВ-03;
- «Арктика-2005» на НИС ААНИИ «Академик Федоров» (Россия) (профиль Арктика-2005).

На сейсмическом разрезе ГСЗ вдоль профиля МПВ-03 «Арктика-2012» непрерывно прослеживаются структурные комплексы консолидированной коры между поднятием Менделеева и Чукотским плато.

### *Поднятие Менделеева*

Поднятие Менделеева характеризуется максимальной мощностью земной коры и глубиной залегания границы Мохо (до 34 км), повышен-

ными значениями скоростей продольных волн (7.2–7.3 км/с) в нижнем слое коры. Утонение верхнего слоя коры до 7–9 км на Поднятии Менделеева и увеличение мощности нижнего слоя коры до 18–19 км связаны с повышенной вулканической активностью в раннемеловое время. В области Чукотского поднятия мощности верхнего и нижнего слоев коры почти одинаковы [1].

На сейсмическом разрезе ГСЗ экспедиции Арктика-2005, проходящем, как и профиль 2012-01, вдоль западной границы изучаемой площади, прослежены два осадочных комплекса, разделенных региональным несогласием. Суммарная мощность осадочных комплексов достигает максимума ~12 км в депоцентре Северо-Чукотского прогиба, на поднятии Менделеева мощность осадочных комплексов не превышает ~2.5 км.

В Северо-Чукотском прогибе выделяется дополнительно третий осадочный комплекс со скоростями 4.7–5.9 км/с, мощность этого слоя в депоцентре составляет ~4 км. Общая мощность осадочных комплексов в депоцентре Северо-Чукотского прогиба составляет около 16 км [6].

Мощность верхней коры составляет 2–3 км под Северо-Чукотским прогибом, на поднятии Менделеева мощность варьирует в интервале 4–7 км. Глубина залегания раздела Мохо изменяется от 28 до 29 км под Северо-Чукотским прогибом до 31–34 км под поднятием Менделеева. Мощность кристаллической коры на шельфе составляет ~13 км, на поднятии Менделеева она увеличивается до 26 км.

### **Чукотский бордерленд**

Широко известны следующие представления о строении Чукотского бордерленда как обособленной тектонической структуры:

– отделение Чукотского бордерленда вместе с Чукотским шельфом и Аляской от Канадского архипелага в процессе ротационного раскрытия Канадского бассейна с последующим вращением по часовой стрелке, которое образовало Чукотскую котловину [15, 21];

– отделение Чукотского бордерленда в процессе образования Канадского бассейна от окраины моря Бофорта [14].

Наиболее древними из изученных в районе Чукотского бордерленда пород являются мелководные карбонаты кембрийского и ордовикского возраста, аналогичные по составу одновозрастным породам арктической части Канады. Образцы этих пород были взяты на хребте Нортвинд [16].

В экспедиции на ледоколе *Healy* при выполнении драгирования на склоне в северной части Чукотского плато были подняты метаморфические породы силура [24]:

- кристаллические и зеленые сланцы,
- ортогнейсы,
- граниты,
- аплиты.

В пределах Чукотского бордерленда были обнаружены также отложения, аналогичные по составу отложениям бассейна Свердруп:

- карбон–раннепермские мелководные отложения, преимущественно карбонатные;
- пермские красноцветные породы;
- среднетриасовые турбидиты.

Эти данные поддерживают представление о том, что Чукотское плато первоначально было присоединено к арктической Канаде [16].

Самые ранние синрифтовые отложения, отобранные на хребте Нортвинд, имеют раннеюрский возраст [10]. Согласно этим данным, рифтогенез Чукотского бордерленда должен был произойти почти одновременно с раскрытием Американо-Азиатского бассейна (153–127 млн лет назад) и формированием хребта Альфа–Менделеева (120–78 млн лет назад). Это подразумевает длительный период тектонического затишья от начала апта, характеризующийся очень медленным и ненарушенным пелагическим осадконакоплением.

Начиная с апта, Северо-Чукотский бассейн частично заполнялся базальтами провинции HALIP [17].

В интервале 118–112 млн лет на хребте Нортвинд происходит извержение базальтов с низким содержанием титана, мантийный источник при этом характеризуется как часть субконтинентальной литосферы [25]. Здесь открыты вулканические породы сходные с позднемезозойскими базальтами острова Элсмир и Земли Франца-Иосифа, принадлежащими к континентальным трапповым образованиям [28].

В интервале 105–100 млн лет на отроге Хили Спер к северу от хребта Нортвинд произошло извержение толеитовых базальтов с высоким содержанием титана. Бимодальное по составу распределение образцов базальтов характерно для плюмовых континентальных магматических провинций [25]. На хребте Нортвинд отобраны и сенноман–туронские туфогенные песчаники и пепловые туфы кислого состава с Ar–Ar возрастом  $90.6 \pm 2.1$  млн лет [10].

Пепловые прослои из этих пород не содержат терригенного материала, что свидетельствует об изолированности хребта Нортвинд от прилегающего континента. В интервале 90–70 млн лет на отроге Хили Спер происходило извержение толеитовых базальтов с высоким содержанием титана. Отобраны образцы базальтов возраста 86 и 75.5 млн лет [11]. Состав базальтов также характерен для плюмовых континентальных магматических провинций.

Чукотский бордерленд характеризуется растянутой, утоненной континентальной корой [16, 30]. В одном из вариантов палеорекоплекций предполагаются следующие два варианта развития бордерленда:

- блок выдвинут из Северо-Чукотского бассейна [18];
- блок отодвинут от континентальной окраины о. Бэнкс [18, 23, 29, 32].

В других вариантах предрифтовое расположение Чукотского бордерленда находилось в море Бофорта [14]. Отмечается, что между хребтом Нортвинд и Чукотским плато наблюдаются сдвиговые деформации [15]. На поднятии четко проявлен западно-восточный характер позднеюрско–раннемелового растяжения [10].

Новые данные свидетельствуют о том, что до начала образования Американо-Чукотского бассейна, в девоне, палеогеографическое положение Чукотского бордерленда соответствовало непосредственному примыканию к островам Элсмир и Аксель-Хейберг [26]. Эти данные поддерживают и уточняют широко цитируемые ротационные модели раскрытия Канадского бассейна.

Однако геологическая взаимосвязь Чукотского бордерленда с шельфом Чукотского моря определяется тем обстоятельством, что на Чукотском плато и на южном борту Чукотской котловины наблюдается обратная корреляция магнитных аномалий и рельефа; при этом расчетная величина намагниченности 5–10 А/м, соответствует плато-базальтам мезозойского возраста, с наибольшей вероятностью – раннемеловым [5], излившимся в период обратной полярности магнитного поля, более 121.4 млн лет назад [27].

Было прослежено раннемеловое несогласие в низах разреза осадочной толщи, протягивающееся из Северо-Чукотского бассейна, где оно фиксируется под 16-и км толщиной меловых и кайнозойских отложений, на южную окраину Чукотского бордерленда [21]. По этим данным осадочная толща находится в своем современном положении

относительно Чукотского шельфа с самого начала раннего мелового периода.

Также отмечено, что мантия Чукотской впадины имеет высокую плотность ( $3.27\text{--}3.31\text{ г/см}^3$ ) и низкую скорость продольных волн ( $V_p = \sim 7.8\text{ км/с}$ ), что объясняется 5–10% серпентинизацией мантийного перидотита на глубине 22–35 км в результате растяжения земной коры и проникновения морской воды [22].

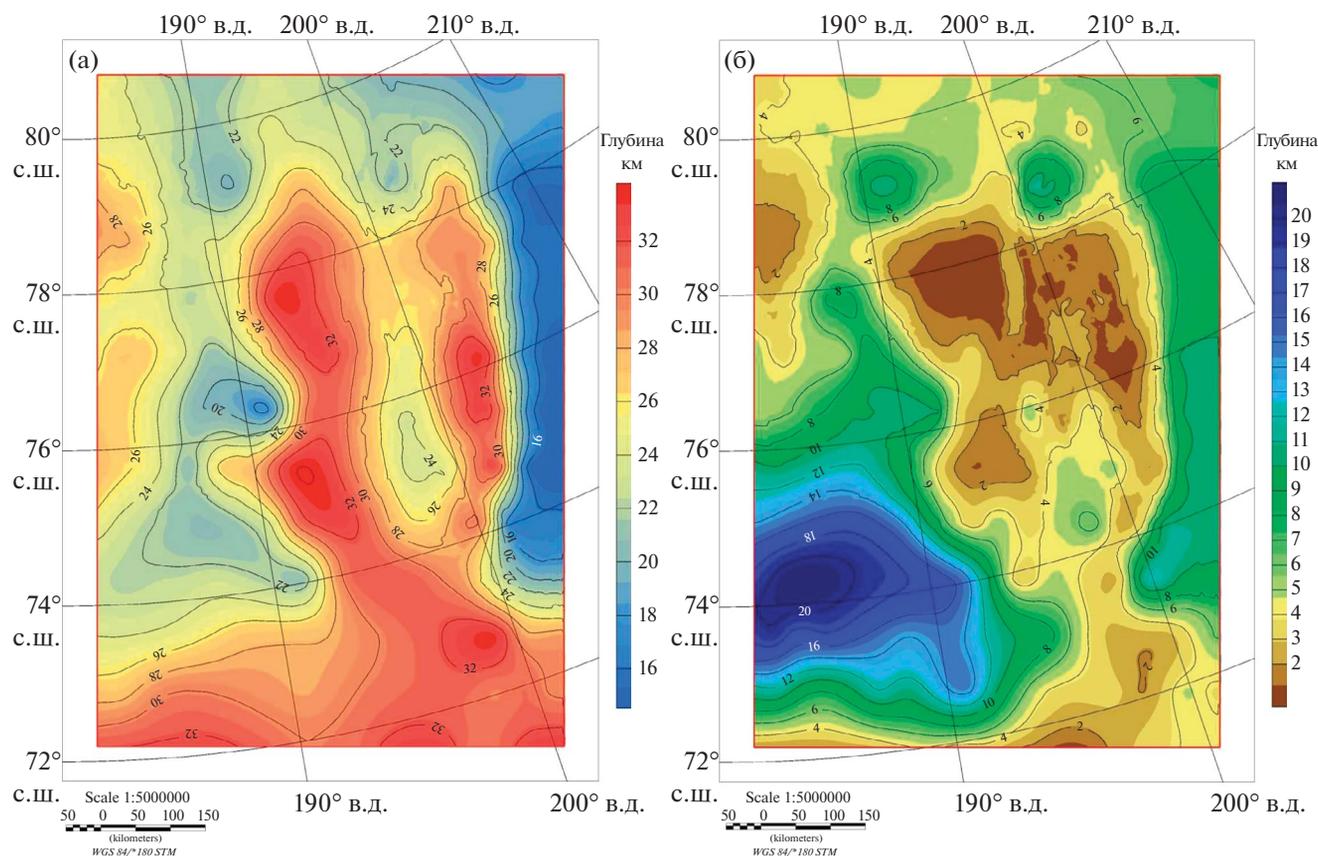
Задачей построения 3D модели земной коры в области перехода от Чукотского бордерленда и Чукотской котловины к шельфу Чукотского моря явилось прослеживание структур, соединяющих поднятия фундамента к югу и востоку от Северо-Чукотской впадины с поднятиями фундамента на Чукотском бордерленде. Показаны контуры площади построения 3D модели и линии профилей (см. рис. 1).

### 3D МОДЕЛЬ СТРОЕНИЯ ЗЕМНОЙ КОРЫ ЧУКОТСКОГО БОРДЕРЛЕНДА

Численные расчеты проводились нами в программах Grav3D (Development of Geophysical Software) [31] и Oasis Montaj [33], позволяющих рассчитывать гравитационные аномалии в процессе итерационного подбора плотностной структуры земной коры. В расчетные модели вводились сейсмические данные о геометрии разреза с последующим расчетом избыточной плотности тел. В Grav3D [31] определялась предварительная конфигурация блоков фундамента и слоев земной коры. Программа Oasis Montaj (Geosoft) [33] использовалась для детализации формы объектов, вызывающих аномалии силы тяжести.

Первоначально 3D модель земной коры региона строилась по программе GRAV3D [31], где вычисления проводились по 13-ти профилям, располагающимся на расстоянии 80 км друг от друга. Общая площадь модели составила 960×670 км, глубина модели 40 км.

Оптимальный выбор числа осадочных толщ и прослеживание горизонтов, являющихся для этих толщ граничными, представляет нелегкую задачу для всего Арктического бассейна, в котором отсутствуют картировочные скважины. Сложность задачи иллюстрирует работа [13], в которой представлено 17 прослеживаемых от отложений поздней юры до настоящего времени региональных несогласий, выявленных в сравнительно хорошо изученных мезо–кайнозойских разрезах осадочных толщ Канадской Арктики.



**Рис. 2.** Карты глубины поверхности Мохоровичича (а) и глубины поверхности фундамента (б), извлеченные из 3D модели земной коры Чукотского бордерленда и Чукотской котловины, рассчитанной и построенной с использованием программного обеспечения Grav3D [31] и Oasis Montaj [33].

Каждое такое несогласие отображает значительную тектоническую перестройку в Арктическом регионе. Нами в качестве опорных, разделяющих осадочные толщи несогласий выбраны горизонты:

- UBf (предполагаемый возраст 34 млн лет – начало олигоцена);
- mBU (65 млн лет – начало Кайнозоя);
- LCU (134 млн лет – готерив).

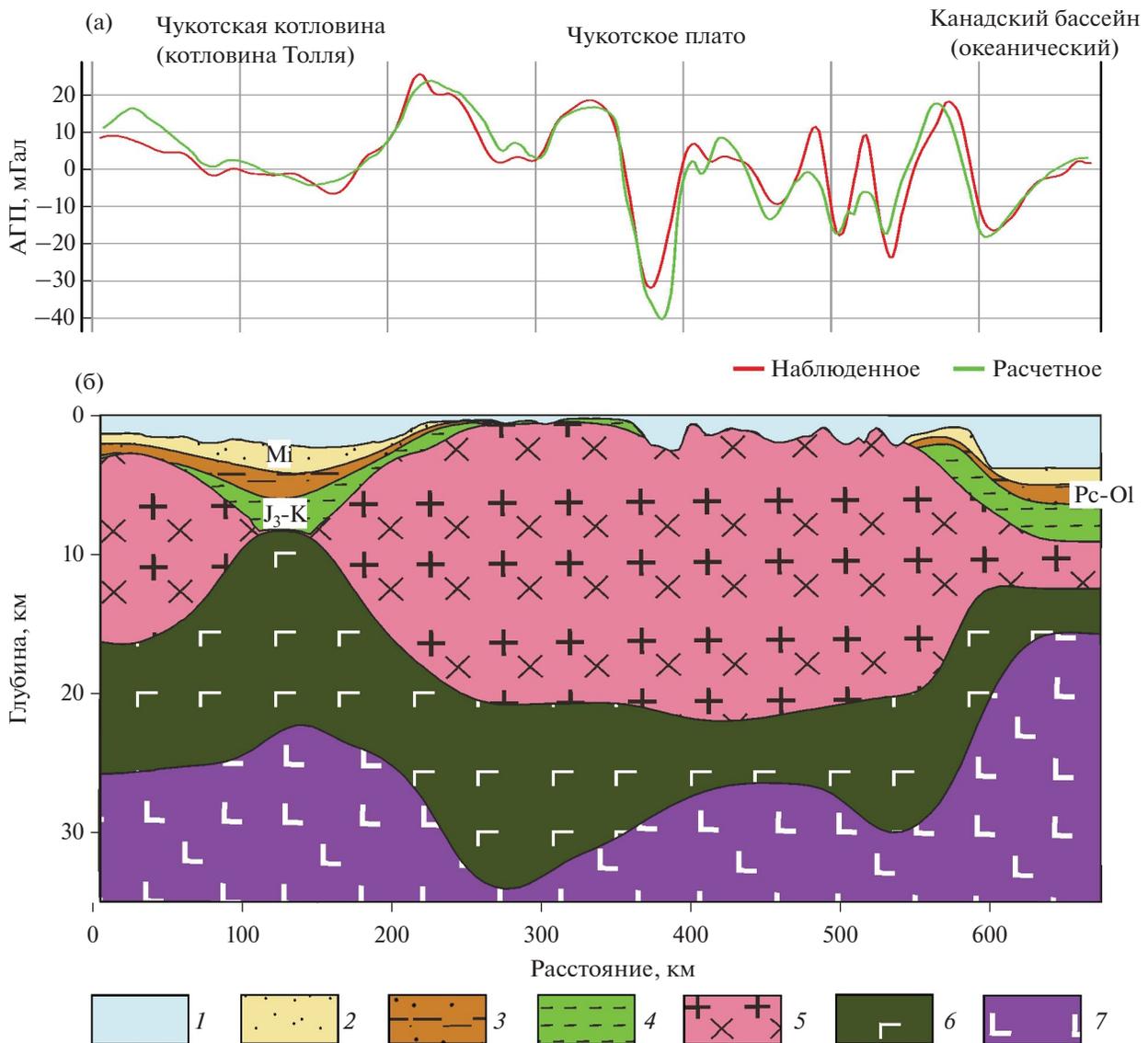
Хотя для последней границы раздела есть не меньше оснований отнести ее к началу апта – 124 млн лет. Там, где в разрезах появляются более древние толщи, они залегают на общей для всего региона поверхности акустического фундамента.

При построении модели использованы данные расчетов 2D моделей в регионе, в частности 2D модели вдоль профиля, пересекающего Поднятие Менделеева, Чукотскую котловину и Чукотское плато, построенной во ВСЕГЕИ (г. Санкт-Петербург, Россия) по результатам наблюдений в экспедиции «Арктика-2012» [22]. По данным этой модели в структуру Чукотской впадины входят:

- маломощная кора 18 км;
- осадочный чехол мощностью 6–8 км;
- верхняя/средняя кора мощностью 3–6 км (наименьшая мощность 3–4 км под Чукотским бассейном);
- нижняя кора 9–10 км.

Мощную кору имеют Чукотское плато (28–29 км) и поднятие Менделеева (33–34 км), подстилаемую нормальной мантией ( $V_p = \sim 8.0$  км/с). Эти построения так же, как приведенные данные сейсморазведки МОВ, зондирований МПВ и глубинных сейсмических зондирований (ГСЗ) были использованы для построения начальной модели для расчетов по программе GRAV3D [31].

После многочисленных итерационных корректировок модели была достигнута сходимость расчетных и наблюдаемых аномалий гравитационного поля в пределах 3–5 мГал. Далее модель окончательно формировалась в программе Oasis Montaj [33], затем расчетные точки гридов различных поверхностей располагались в плане по сети  $5 \times 5$  км (Приложение 1: 3D модель).



**Рис. 3.** Разрез 3D модели земной коры по профилю Чукотская котловина—Чукотское плато—хребет Нортвинд—Канадский бассейн.

Положение профиля — см. рис. 1.

(а) — графики наблюдаемых и рассчитанных аномалий гравитационного поля;

(б) — разрез модели земной коры.

1 — морская вода; 2 — осадочные породы Неогена; 3 — осадочные породы Палеогена; 4 — осадочные породы мелового возраста; 5 — верхняя кора; 6 — нижняя кора; 7 — мантия

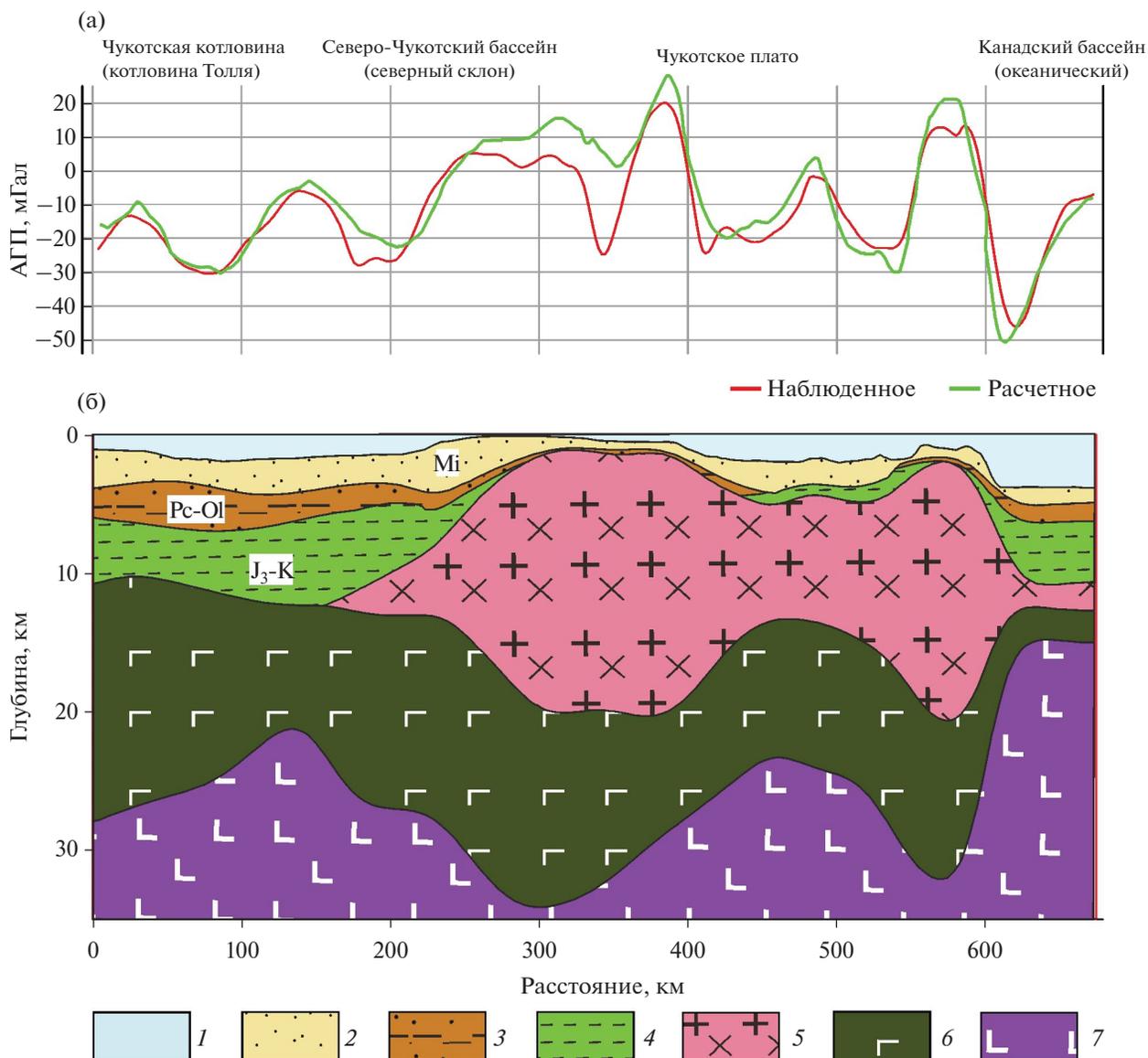
Приведены карты глубин поверхности Мохоричича и поверхности фундамента, извлеченные из 3D модели земной коры Чукотского бордерленда и Чукотской котловины (рис. 2).

На картах показаны основные особенности строения земной коры региона — трехсторонняя обособленность Чукотского бордерленда и наличие с юга переходной области, связывающей бордерленд с Чукотско-Аляскинским шельфом (см. рис. 2).

Рассмотрим детали строения земной коры региона вдоль субширотных сечений модели (см. рис. 1).

Нами приведен разрез земной коры по профилю, пересекающему Чукотское поднятие в его северной части, от Чукотской котловины до Канадского бассейна (рис. 3).

При сравнении графиков наблюдаемых и рассчитанных аномалий силы тяжести показано, что отдельные локальные формы рельефа не нашли



**Рис. 4.** Разрез 3D модели земной коры по профилю Чукотская котловина–северный склон Северо-Чукотского бассейна–Чукотское поднятие–Канадский бассейн.

Положение профиля – см. рис. 1.

(а) – графики наблюдаемых и рассчитанных аномалий гравитационного поля;

(б) – разрез модели земной коры.

1 – морская вода; 2 – осадочные породы Неогена; 3 – осадочные породы Палеогена; 4 – осадочные породы мелового возраста; 5 – верхняя кора; 6 – нижняя кора; 7 – мантия

отражения в наблюдаемых аномалиях, что можно связать с отсутствием приближенных к земной поверхности гравитационных съемок. Спутниковые наблюдения, являющиеся для больших площадей Арктического бассейна единственным источником информации, дают локальные аномалии в сглаженном виде.

В западной части профиля между пикетами 50 и 200 км ярко выражена структура Чукотской котловины, – структуры растяжения земной коры,

характеризующейся ее общим утонением, разрывом верхней хрупкой кристаллической коры и увеличением до 6 км мощности осадочных отложений, возраст которых, вероятнее всего, начинается с позднеюрского.

На Чукотском поднятии выделяется трог Егiazарова – глубокая (до 2 км глубины) грабенообразная структура (пикеты 360–390), ограничивающая с востока Чукотское плато. Далее наблюдается пониженный рассеченный рельеф дна с маломощ-

ным осадочным чехлом или с полным отсутствием осадочных пород и северная часть хребта Нортвинд (между пикетами 540–600), после которого рельеф дна резко опускается в Канадский бассейн до глубины ~4 км.

В разрезе хребта Нортвинд и Канадского бассейна осадочный чехол содержит отложения, возраст которых начинается с позднеюрского, что предполагалось еще первыми исследователями строения Канадского бассейна [32].

Более древние осадочные породы, образцы которых были отобраны на этих площадях, литифицированные и смятые в складки, входят в состав акустического фундамента, – верхней части верхней коры на модельном разрезе.

Далее приводим разрез по расположенной южнее линии, которая пересекает часть северного склона Северо-Чукотского бассейна до пикета 220 км (рис. 4).

Ось позднеюрского–раннемелового растяжения четко просматривается на этом разрезе в районе пикета 130 км, где общая мощность земной коры утоняется до 20 км, а мощность осадочного чехла возрастает до 10 км. Восточнее, при пересечении Чукотского поднятия, мощность земной коры возрастает до 34 км в районе Чукотского плато и до 31 км под хребтом Нортвинд, падая до ~22 км под трогом Егиазарова, разделяющим эти две структуры.

Общая мощность земной коры под Канадской котловиной составляет на профиле 12 км, мощность кристаллической части земной коры составляет всего ~4 км. Такая структура характерна скорее для растянутой континентальной коры, чем для земной коры океанического типа. Осадочный чехол на Чукотском поднятии имеет мощность ~1 км, возрастая в понижениях до 2–3 км.

Расположенный южнее, уже на шельфе Чукотского моря, разрез модели показывает сложное строение как Северо-Чукотского бассейна, так и зоны его сочленения с бассейном Колвилл, и его части – трогом Ханна (рис. 5).

Мощность земной коры, которая под Северо-Чукотским бассейном составляет 24 км, увеличивается в области Северо-Чукотского поднятия до 34 км. Название положительной структуры «Северо-Чукотское поднятие» было дано геологами, изучавшими структуры Аляски [20] и не принявшими во внимание, что к северу от этой структуры уже есть наименование «Чукотское поднятие» для Чукотского бордерленда.

Восточнее поверхность Мохоровичича в прогибе Ханна поднимается до отметки 29–30 км. Большая по мощности верхняя кора наблюдается под Чукотским поднятием, а под прогибом Ханна ее мощность становится меньше. В области Северо-Чукотского прогиба, где мощность осадочных пород достигает 20 км, верхняя кора или отсутствует, или имеет незначительную мощность.

Основной объем осадочных пород в Северо-Чукотском бассейне составляют позднемезозойские толщи. Мощность палеогеновых отложений увеличивается до нескольких километров в зоне перехода от Северо-Чукотского бассейна к Северо-Чукотскому поднятию.

Области развития и соотношение выделяемых на отдельных разрезах структур очерчиваются на картах поверхностей различных горизонтов земной коры, построенных по результатам моделирования (см. рис. 2). На карте глубины поверхности Мохоровичича четко выделяются области развития континентальной земной коры с мощностью >30 км (см. рис. 2, а):

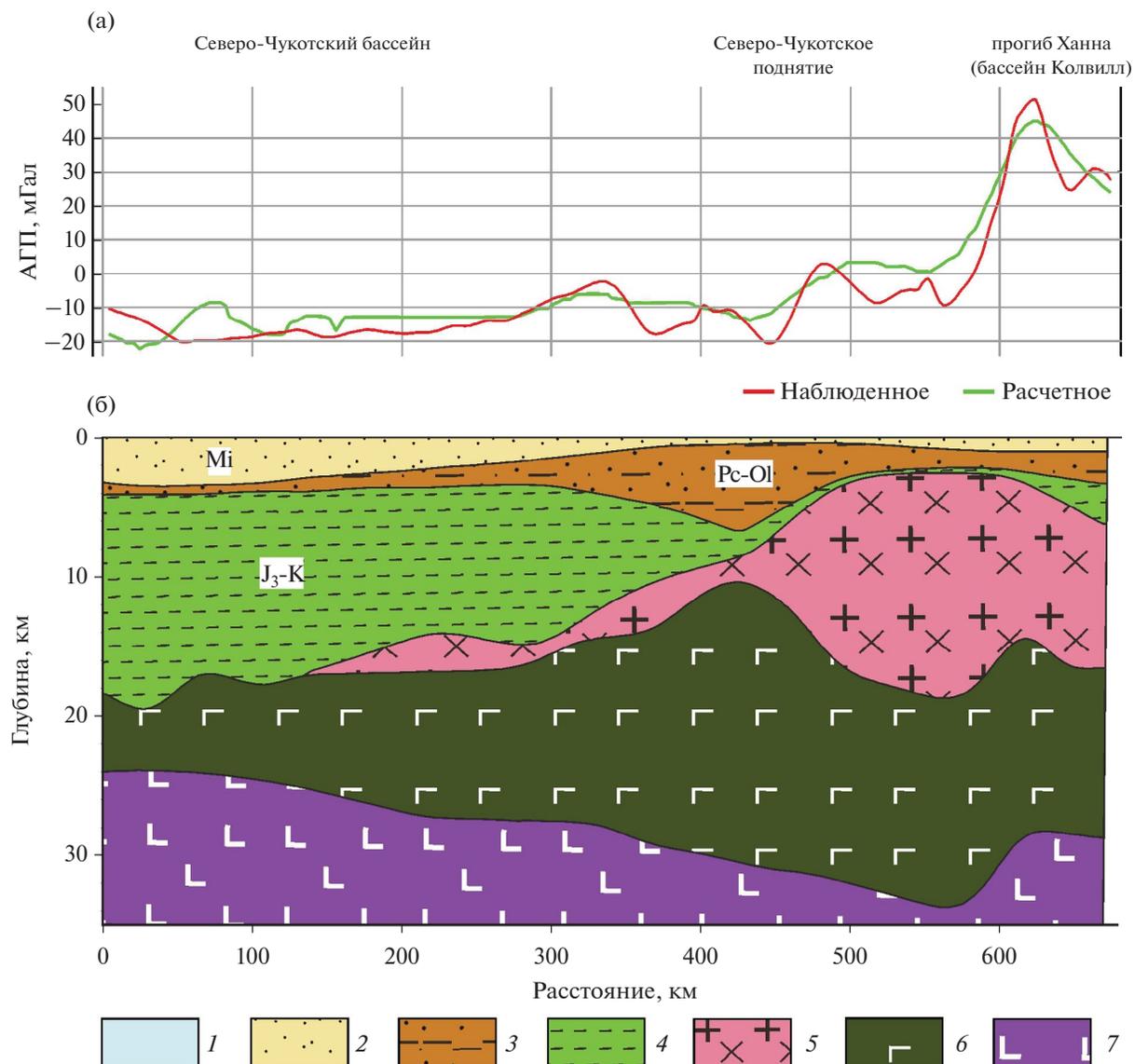
- Врангелевское поднятие на шельфе Чукотского моря;
- область перехода к Чукотскому поднятию – Северо-Чукотское поднятие;
- Северо-Чукотское поднятие;
- восточная часть поднятия Менделеева.

В область растянутой континентальной коры входят:

- Северо-Чукотский бассейн;
- Чукотская котловина;
- котловина Менделеева;
- трог, разделяющий Чукотское плато;
- хребет Нортвинд;
- возможно, юго-восточная часть Канадского бассейна.

Наглядное представление о характере построенной 3D модели (см. Прилож.1: 3D модель) земной коры Чукотского бордерленда дает рисунок 6. Показано сочетание построенных границ земной коры с границами, наблюдаемыми на профиле ГСЗ-МПВ в экспедиции «Арктика-2012» [22] (см. рис. 6).

На карте глубины поверхности фундамента региона показана очевидная общность контуров Врангелевского поднятия с Северо-Чукотским поднятием и далее на север – с Чукотским поднятием (см. рис. 2, б). Общность фундамента всей этой области подтверждается также полученными данными геологической съемки и опробования (рис. 7).



**Рис. 5.** Разрез 3D модели земной коры по профилю Северо-Чукотский бассейн – Северо-Чукотское поднятие – прогиб Ханна (бассейн Колвилл).

Положение профиля – см. рис. 1.

(а) – графики наблюдаемых и рассчитанных аномалий гравитационного поля;

(б) – разрез модели земной коры.

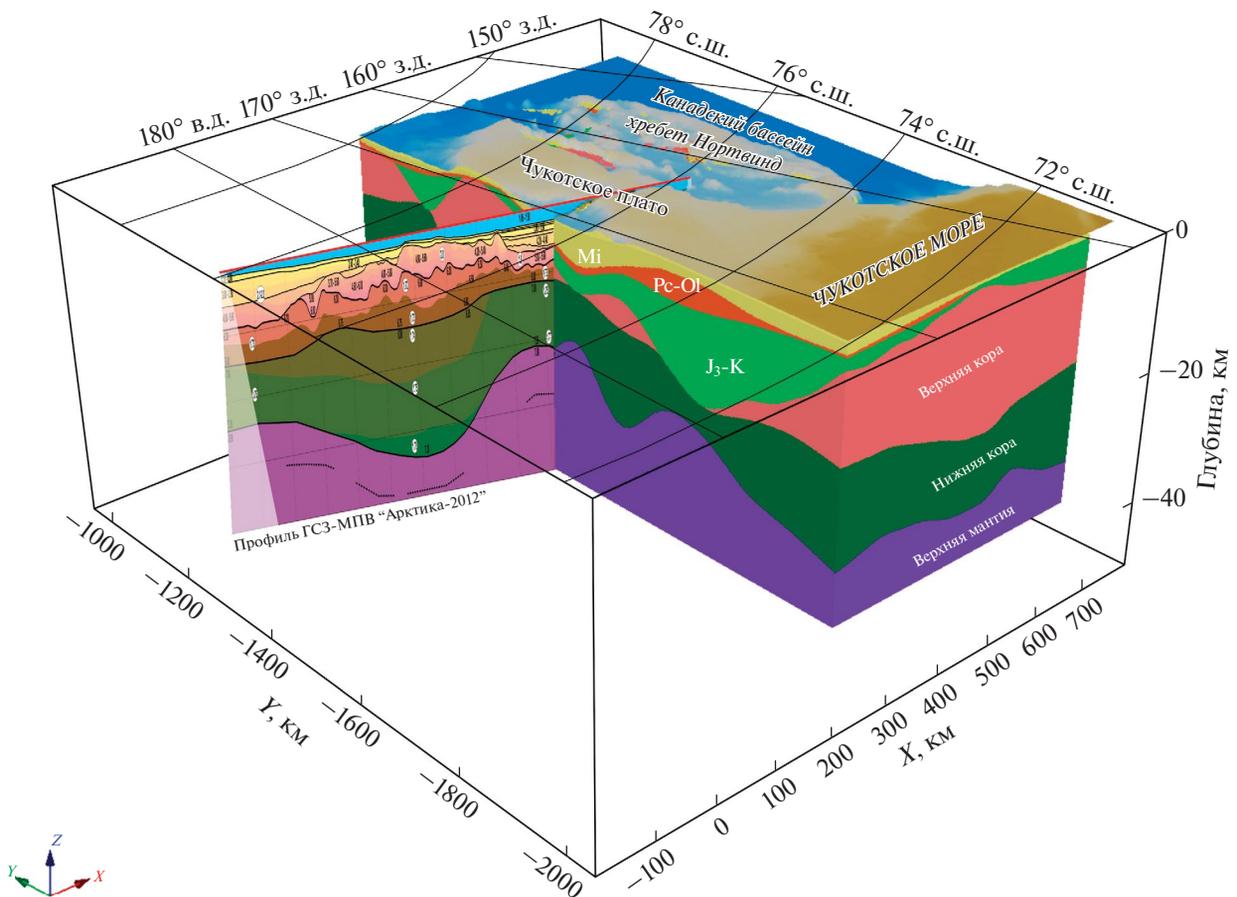
1 – морская вода; 2 – осадочные породы Неогена; 3 – осадочные породы Палеогена; 4 – осадочные породы мелового возраста; 5 – верхняя кора; 6 – нижняя кора; 7 – мантия

По данным опробования нами проведено сопоставление вещественного состава пород, слагающих Чукотское поднятие, и состава пород Чукотского шельфа, наиболее детально изученных в процессе геологической съемки о. Врангеля [4, 14] (табл. 1).

Проведенное сопоставление показывает идентичность как временных этапов формирования структур этих регионов, так и состава слагающих эти структуры пород (см. табл. 1).

## РАЙОНИРОВАНИЕ ОБЛАСТИ ЧУКОТСКОГО БОРДЕРЛЕНДА И ПРИЛЕГАЮЩИХ СТРУКТУР

Выполненные расчеты и построения позволяют провести районирование изучаемой площади по характеру строения земной коры. Мы показываем, как границы выделенных нами блоков земной коры отображаются на картах гравитационных и магнитных аномалий и рельефа [10] (рис. 8).



**Рис. 6.** Вид на 3D модель строения земной коры Чукотского бордерленда в направлении с юго-запада. Показано сочетание модели с профилем ГСЗ-МПВ «Арктика-2012» (по данным [22]).

Врангелевское поднятие характеризуется положительными аномалиями силы тяжести и магнитными аномалиями небольшой амплитуды, свойственными континентальной земной коре с гранитно-метаморфической верхней корой (см. рис. 8, 1). Врангелевское поднятие ограничено с севера разломной зоной, по которой оно надвинуто на Северо-Чукотский прогиб (см. рис. 8, 1).

Линейная зона надвига четко выражена как в гравитационном, так и в магнитном аномальном поле. С северо-востока Врангелевское поднятие плавно переходит в Северо-Чукотское поднятие (см. рис. 8, 3).

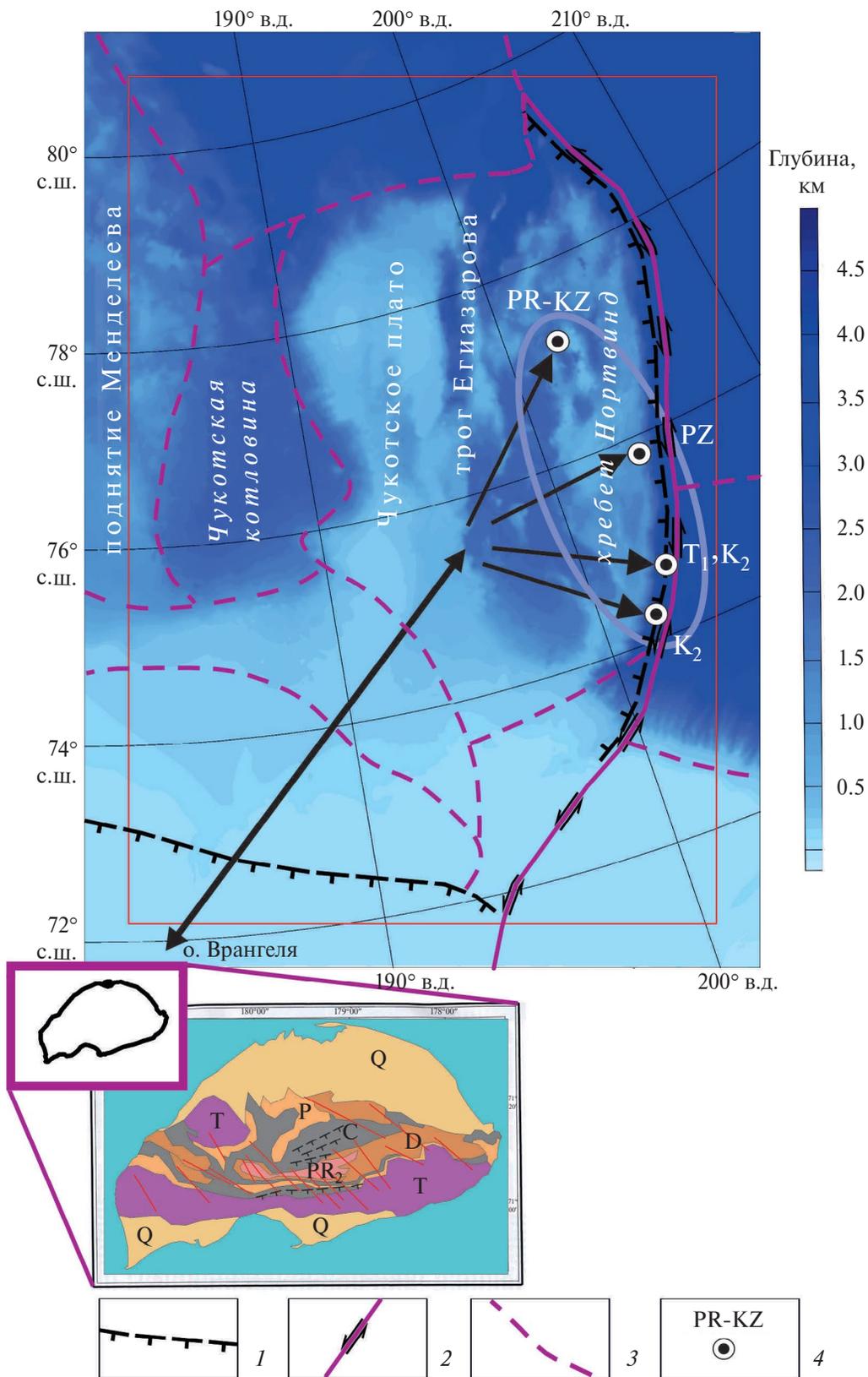
Название Северо-Чукотское поднятие получила небольшая область, расположенная к северо-западу от бассейна Колвилл. Однако область (Северо-Чукотское поднятие) явственно не отделяется в магнитном поле и гравитационном поле от расположенного севернее Чукотского плато. С востока область ограничена масштабной сдвиговой зоной, проходящей далее на юг (через весь шельф Чукот-

ского моря), и на север (появляется надвиговая составляющая), — где вдоль этой сдвиговой зоны проходит граница между Чукотским поднятием и Канадской котловиной (см. рис. 8, 2).

Для Чукотского поднятия также характерны магнитные аномалии небольшой амплитуды, но гравитационные аномалии обладают высокой интенсивностью, так как источником локальных аномалий поля силы тяжести является расчлененный рельеф Чукотского плато.

Канадская котловина в части той небольшой площади, которой она входит в область наших модельных построений, подразделяется на регион с океанической корой (см. рис. 8, 9). В этом регионе мощность кристаллической части земной коры составляет 6–8 км, т.е. принимает типичные для океанической коры значения. Южнее располагается регион с растянутой континентальной корой (см. рис. 3, см. рис. 8, 10).

Канадский океанический бассейн четко отделяется от Чукотского поднятия не только в рельефе,



**Рис. 7.** Пункты опробования и участки геологоразведочных работ на Чукотском поднятии и схематическая карта горных пород о. Врангеля, показывающие аналогию возраста и вещественного состава пород этих ареалов. 1 – фронтальные линии надвигов; 2 – сдвиговые структуры; 3 – границы разнородных блоков земной коры; 4 – пункты опробования и возраст отобранных пород на хребте Нортвинд

**Таблица 1.** Сопоставление возраста и состава пород о. Врангеля и Чукотского поднятия

Возраст	о. Врангеля (по [3])	Чукотское поднятие (по [12])
$K_2-N$	Бассейновый осадочный чехол	Терригенный осадочный чехол
T	Терригенные толщи	Песчаники, аргиллиты
P	Сланцы, известняки, песчаники	Мелководные карбонатные отложения
C	Известняки, алевроиты	
$C_1$	Терригенные и карбонатные толщи, вулканиты	
D	Песчаники, сланцы, известняки	
$S_2-D_1$	Терригенно-карбонатная толща	
$PR_3$	Сланцы, песчаники, граниты, вулканиты	Метаморфические сланцы, ортогнейсы, граниты, аплиты

но и характером гравитационных и магнитных аномалий (см. рис. 8, 9). Типичные для океанической абиссали линейные магнитные аномалии просматриваются, но не выражены ясно в пределах изучаемой площади, при этом гравитационное поле выглядит спокойным.

Аномалии, наблюдаемые в контактной с Чукотским поднятием (хребтом Нортвинд) зоне, соответствуют представлениям о последовательном развитии в этой зоне сначала надвига, а затем – сдвиговой зоны [8, 21]. Область растянутой континентальной коры Канадского бассейна в магнитном поле характеризуется отсутствием характерных для океанической коры линейных магнитных аномалий. В гравитационных аномалиях, как и в рельефе, четко выражена граница, отделяющая область от шельфового бассейна Колвилл. Сохранившаяся кристаллическая часть земной коры этой области имеет мощность всего 3–4 км (см. рис. 4).

Растяжение и прогибание в юго-восточной части Канадского бассейна сопровождалось интенсивным осадконакоплением, в результате чего мощность осадочной толщи здесь достигает 10 км, а восточнее рассматриваемой площади – 15 км. Юго-восточный угол площади моделирования занимает прогиб Ханна, который является частью осадочного бассейна Колвилл, отделенной от остальной площади четкими градиентами гравитационных и магнитных аномалий (см. рис. 8, 11).

Мощность осадочного чехла в этой части прогиба Ханна достигает 6 км. Прогиб Ханна в пределах изучаемой площади характеризуется магнитными и гравитационными аномалиями невысокой амплитуды. Зона сдвига, отделяющая прогиб от Северо-Чукотского поднятия и под-

нятия Врангеля, четко проявляется аномалиями потенциальных полей [3, 8].

В расположенный к северу от зоны надвига Северо-Чукотский прогиб входит ~20-ти км толща осадочных пород, залегающих на чрезвычайно растянутой нижней коре, мощность которой в осевой части не превышает 3–4 км (см. рис. 8, 4). Разрез земной коры Северо-Чукотского прогиба аналогичен разрезу земной коры юго-западной части Канадского бассейна.

Северо-восточный склон Северо-Чукотского прогиба имеет следующие характеристики:

- высокоамплитудная положительная гравитационная аномалия, обусловленная постепенным уменьшением в направлении на северо-восток мощности осадочного чехла (см. рис. 8, 5);

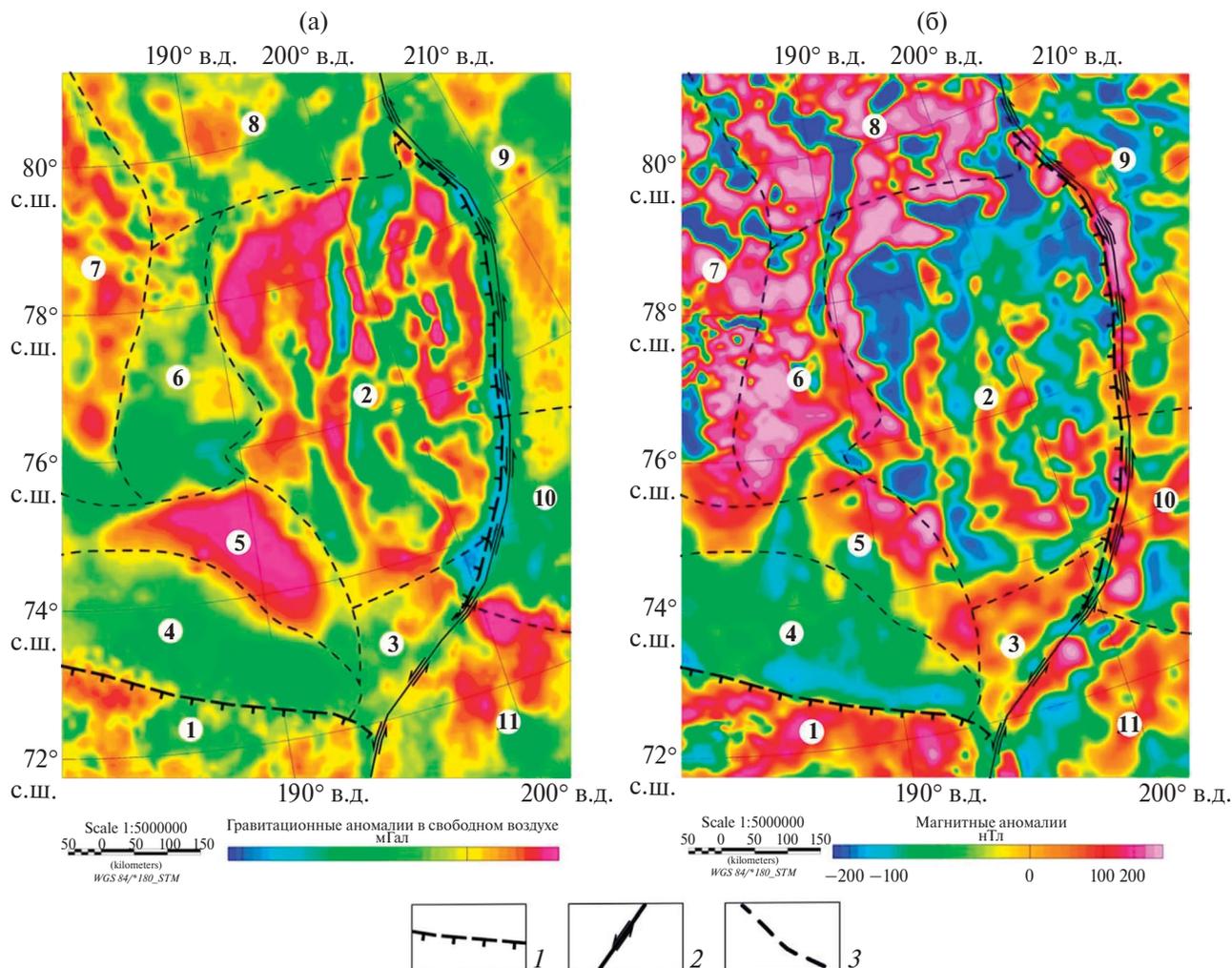
- выход нижней коры основной по составу (поверхность К, нижней коры) под осадочный чехол и мантийный подъем (см. рис. 4, пикет 130).

Зона сопряжения склоновой области и блока Чукотского поднятия, по-видимому, насыщенная магматическими телами, уверенно прослеживается по аномалиям магнитного поля (см. рис. 8, 2, 5).

Западная граница Чукотского поднятия, которая является зоной перехода к Чукотской котловине, маркируется магнитными и гравитационными аномалиями, а также перепадом глубины моря (см. рис. 8, 6).

Чукотская котловина характеризуется отрицательной аномалией силы тяжести, расположенной вдоль нижней части континентального склона, где, по данным проведенного нами 3D моделирования, произошло накопление мощных толщ палеогеновых осадков (см. Приложение 1: 3D модель).

Магнитные аномалии в пределах котловины имеют высокую амплитуду, что свидетельствует



**Рис. 8.** Районирование земной коры Чукотского бордерленда, Чукотской котловины и части Чукотского шельфа по данным построения 3D модели.

Границы блоков наложены на карту гравитационных аномалий в редукции Фая (а) и карту магнитных аномалий (б). Блоки земной коры (арабские цифры в кружочках): 1 – Врангелевское поднятие; 2 – Чукотское поднятие; 3 – Северо-Чукотское поднятие; 4 – Северо-Чукотский прогиб; 5 – Северо-восточный склон Северо-Чукотского прогиба; 6 – котловина Чукотская (Толля); 7 – поднятие Менделеева; 8 – котловина Менделеева; 9 – Канадский океанический бассейн; 10 – Канадский бассейн (растянутая континентальная кора); 11 – прогиб Ханна (бассейн Колвилл). 1 – фронтальные линии надвигов; 2 – сдвиговые структуры; 3 – границы разнородных блоков земной коры

о том, что котловина является частью провинции HALIP, формировавшейся, в основном, в раннемеловое время, когда, после рубежа 121 млн лет наступил период супер-хрона, положительного направления вектора намагниченности в северном полушарии [3].

Юго-восточный и северо-восточный борта котловины характеризуются, по расчетным данным, отрицательным направлением намагниченности пород, – носителями намагниченности, судя по величине намагниченности, являются базальты. Излияния на этой площади происходили на ранней стадии формирования провинции HALIP [5].

Северная граница Чукотского поднятия так же четко видна на картах рельефа и аномалий потенциальных полей, а продолжение этой зоны, отделяющее Чукотскую котловину от котловины Менделеева, прослеживается по градиентам аномалий потенциальных полей (см. рис. 8, 8).

Котловине Менделеева свойственны высокоамплитудные магнитные аномалии, свидетельствующие о ее принадлежности к магматической провинции HALIP. В гравитационных аномалиях четко прослеживается сдвиговый шов, отделяющий котловину Менделеева как от Чукотского плато, так и от Чукотской котловины [15].

## ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Результаты анализа геолого-геофизических материалов и моделирования позволили дать ответ на главный вопрос о наличии тесной структурной связи между Чукотским бордерлендом и шельфом Чукотского моря. Рассчитанная и построенная геофизическая 3D модель показывает, что неизменные по составу и свойствам толщи земной коры протягиваются от Врангелевского поднятия к Чукотскому бордерленду, включая в себя и Северо-Чукотское поднятие, и охватывая и огибая восточный борт Северо-Чукотской котловины.

Предположение об отделении Чукотского бордерленда от Чукотского шельфа путем вращения по часовой стрелке с полюсом вращения в районе Северо-Чукотского поднятия [21] подтверждается также тем обстоятельством, что и на западной окраине Чукотского бордерленда, и вдоль северной кромки Чукотского шельфа наблюдаются отрицательные магнитные аномалии, источниками которых, по расчетным данным, могут быть только находящиеся внутри осадочной толщи базальтовые покровы [5].

Отрицательная намагниченность этих покровов свидетельствует о времени их излияния до 121 млн лет – до времени начала мелового супер-хрона с положительным в течение 40 млн лет направлением вектора магнитного поля в северном полушарии. По-видимому, именно в неокоме происходило отделение Чукотского бордерленда от континентальной окраины, сопровождавшееся излияниями базальтовых покровов.

Одновременно с обособлением Чукотского бордерленда происходило растяжение земной коры и интенсивное осадконакопление с образованием Северо-Чукотского осадочного бассейна. По нашим данным, не менее 70 % современной мощности осадочного чехла восточной части Северо-Чукотского бассейна сложено толщами мелового возраста.

Завершением активной кинематической перестройки в регионе были перемещения, соответствующие левому сдвигу вдоль восточной окраины Чукотского бордерленда и вдоль западной окраины Канадского бассейна. Эти перемещения происходили после перестройки движения Тихоокеанских плит, в результате чего плита Изагаги, погружавшаяся до рубежа в 120 млн лет в зоне субдукции под Евразийский континент, через 15 млн лет двинулась на север, образуя вдоль Евразийского континента гигантскую зону трансформного разлома [3].

Продолжение этой гигантской сдвиговой зоны прослеживается и на шельфе Чукотского моря и вдоль всей тысячекилометровой западной окраины Канадского бассейна [8, 14]. Результатом этих движений стал выраженный в рельефе и в геофизических аномалиях контрастный характер восточной границы Чукотского бордерленда, при этом, как показали результаты модельных построений, связь бордерленда с Врангелевским поднятием не была нарушена.

## ВЫВОДЫ

1. При построении геофизической 3D модели земной коры нами были использованы все доступные данные сейсморазведочных работ, данные геологических съемок и опробования, а также актуализированные базы гравитационных и магнитных аномалий, что позволило выделить в земной коре Чукотского бордерленда и шельфа Чукотского моря области, различающиеся по истории формирования и строению земной коры.

Границы выделенных блоков не всегда заметны в рельефе морского дна, но всегда отображаются на построенных нами картах магнитных и гравитационных аномалий. Прослежена связь между Чукотским бордерлендом и Врангелевским поднятием шельфа Чукотского моря через Северо-Чукотское поднятие, расположенное между Северо-Чукотским прогибом и прогибом Ханна. По сути, получены данные о тождественном строении земной коры этих трех структур.

2. Отодвигание Чукотского бордерленда в свое современное положение относительно Чукотского шельфа началось с раннемелового времени (вероятно, – с берриаса). Эта интерпретация основана на непрерывности прослеживания в построенной 3D модели раннемеловых–кайнозойских отложений от Чукотского шельфа до южной окраины Бордерленда.

Такого рода свидетельство указывает на то, что Чукотская котловина образовалась в процессе растяжения и рифтогенеза, начавшегося не позднее начала мела. По расчетным данным, базальты, залегающие в низах разрезов осадочных толщ вдоль восточной и южной границ Чукотской котловины, имеют обратную намагниченность, поскольку их излияние происходило до начала мелового супер-хрона положительного (в северном полушарии) намагничивания образующихся пород, т.е. ранее 121 млн лет.

3. Следующим этапом тектонической истории региона было происходившее вблизи верхней границы неокома масштабное сдвиговое перемещение блоков земной коры вдоль восточной границы Чукотского поднятия, имевшей до этого надвиговой характер.

4. Таким образом, на основе интерпретации геолого-геофизических данных показана глубокая связь структур шельфа Чукотского моря и Чукотского бордерленда.

Представленные в нашем исследовании доказательства свидетельствуют о том, что Чукотский бордерленд и Чукотская котловина являются имеют континентальную природу, свойственную континентальной окраине, так как Чукотская котловина имеет геологическую связь с континентальными массами шельфа Чукотского моря.

Эта геологическая связь отчетливо показана на картах аномалий потенциальных полей, охватывающих область 3D моделирования, и по данным опробования морского дна на хребте Нортвинд при сопоставлении их с данными геологической съемки о. Врангеля.

**Благодарности.** Авторы выражают благодарность рецензенту чл.-корр. РАН С.Д. Соколову (ГИН РАН, г.Москва, Россия) и анонимному рецензенту за полезные комментарии и признательны редактору М.Н. Шуплецову (ГИН РАН, г.Москва, Россия) за тщательное редактирование.

**Финансирование.** Проведенное исследование не поддерживалось финансированием.

**Конфликт интересов.** Авторы заявляют, что не имеют конфликта интересов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Арктический бассейн (геология и морфология)*. – Под ред. В.Д. Каминского – СПб: ВНИИОкеангеология, 2017. 291 с.
2. *Глебовский В. Ю., Зайончек А. В., Каминский В. Д., Маценков С. П.* Цифровые базы данных и карты потенциальных полей Северного Ледовитого океана // *Российская Арктика: геологическая история, минерагения, геоэкология*. – СПб: ВНИИОкеангеология, 2002. С. 134–141.
3. *Диденко А.Н., А.И. Ханчук.* Смена геодинамических обстановок в зоне перехода Тихий океан – Евразия в конце раннего мела // *ДАН*. 2019. Т. 487. № 4. С. 405–408.
4. *Остров Врангеля: геологическое строение, минерагения, геоэкология*. – Под ред. М.К. Косьюко, В.И. Ушакова – СПб, ВНИИОкеангеология, 2003. 137 с.
5. *Пискарев А.Л.* Петрофизические модели земной коры Северного Ледовитого океана. – Под ред. Ю.Е. Погребницкого. – СПб.: ВНИИОкеангеология, 2004. 134 с. (Тр.ВНИИГА.Т.203).
6. *Поселов В.А., Буценко В.В., Каминский В.Д., Сакулина Т.С.* Поднятие Менделеева (Северный Ледовитый океан) как геологическое продолжение континентальной окраины Восточной Сибири // *ДАН*. 2012. Т. 443. № 2. С. 232–235.
7. *Черных А. А., Яковенко И. В., Каминский В. Д., Глебовский В. Ю., Корнева М. С., Башев И. А.* Тектоническая схема Американо-Северного Ледовитого океана // *ДАН. Науки о Земле*. 2023. Т. 510. № 2. С. 134–141. DOI: 10.31857/S2686739723600042
8. *Шупилов Э.В., Лобковский Л.И.* О субмеридиональной зоне сдвига в структуре континентальной окраины Чукотского моря и механизме раскрытия Канадского океанического бассейна // *ДАН*. 2014. Т. 455. № 1. С. 67–71.
9. *Andersen O. B., Knudsen P.* The DTU17 Global marine gravity field: First validation results. – In: *Fiducial Reference Measurements for Altimetry*. – Ed.by S.P. Mertikas, R. Pail (Springer. NY. USA. 2020), P. 83–87. Doi: 10.1007/1345\_2019\_65
10. *Arrigoni V.* Origin and evolution of the Chukchi borderland. – PhD Thesis (Texas A&M Univ. USA. 2008), 74 p.
11. *Bruvoll V., Kristoffersen Y., Coakley B.J., Hopper J.R., Planke S., Kandilarov A.* The nature of the acoustic basement on Mendeleev and northwestern Alpha ridges, Arctic Ocean // *Tectonophysics*. 2012. Vol. 514–517. P. 123–145.
12. *Childers V.A., McAdoo D.C., Brozena J.M., and Laxon S.W.* New gravity data in the Arctic Ocean: Comparison of airborne and ERS gravity // *J. Geophys. Res.* 2001. Vol. 106. No. B5. P. 8871– 8886.
13. *Embry A., Beauchamp B., Dewing K., Dixon J.* Episodic tectonics in the Phanerozoic succession of the Canadian High Arctic and the “10-million year flood”. – In: *Circum-Arctic Structural Events: Tectonic Evolution of the Arctic Margins and Trans-Arctic Links with Adjacent Orogens*. – Ed.by K. Piepjohn, J.V. Strauss, L. Reinhardt, W.C. McClelland, (GSA Spec. Pap. 2018. Vol.541), P. 1–18.
14. *Geologic Structures of the Arctic Basin*. – Ed.by A. Piskarev, V. Poselov, V. Kaminsky, (Springer, NY. USA. 2019), 375 p.
15. *Grantz A., Patrick E., Hart P., Vicki E., Childers A.* Geology and tectonic development of the Amerasia and Canada Basins, Arctic Ocean. – (Geol. Soc., London, Mem. 2011. Vol. 35. P. 771–799. Doi: 10.1144/M35.50
16. *Grantz A., Clark L. D., Phillips R.L., Srivastava S.P., Blome C.D. et al.* Phanerozoic stratigraphy of Northwind Ridge, magnetic anomalies in the Canada Basin, and the geometry and timing of rifting in the Amerasia Basin, Arctic Ocean // *GSA Bull.* 1998. Vol. 110. Is.6. P. 801–820.
17. *Grantz A., Hart P.E., Childers V.A.* Tectonic History of the Amerasia Basin, Arctic Ocean. – AGU Fall Meet. December 2007, T11E. 02G.
18. *Grantz A., Johnson G.L., Sweeney J.F.G., May S.D., Hart P.E.* Geology of the Arctic continental margin of

- Alaska. — In: *The Arctic Ocean Region: Boulder, CO.* — Ed. by A. Grantz, L. Johnson, J.F. Sweeney, (GSA Spec Pap. 1990), P. 257–288.
19. *Hegewald A.* The Chukchi Region—Arctic Ocean — Tectonic and Sedimentary Evolution. — PhD Diss. (Univ. Jena, Germany. 2012), 107 p.
20. *Houseknecht D. W.* Colville foreland basin and Arctic Alaska prograded margin tectono-sedimentary elements, northern Alaska and southwestern Canada Basin. — In: *Sedimentary Successions of the Arctic Region and Their Hydrocarbon Prospectivity.* — Ed. by S.S. Drachev, H. Brekke, E. Henriksen, T. Moore, (Geol. Soc., London, Mem. 2018. Vol. 57), P. 1–19. Doi:10.1144/M57-2018-65
21. *Ilhan I., Coakley B.J., Houseknecht D.W.* Meso–Cenozoic evolution of the Chukchi Shelf and North Chukchi Basin, Arctic Ocean // *Marin. Petrol. Geol.* 2018. Vol. 95. P. 100–109. Doi:10.1016/j.marpetgeo.2018.04.014
22. *Kashubin S.N., Petrov O.V., Artemieva I.M. et al.* Crustal structure of the Mendeleev Rise and the Chukchi Plateau (Arctic Ocean) along the Russian wide-angle and multichannel seismic reflection experiment “Arctic-2012” // *J. Geodynam.* 2018. Vol. 119. P. 107–122.
23. *Mair J.A., Forsyth D.A.* Crustal structures of the Canada Basin near Alaska, the Lomonosov Ridge and adjoining basins near the North Pole // *Tectonophysics.* 1982. Vol. 89. P. 239–253.
24. *Mayer Larry A., Andrew A. Armstrong.* Icebreaker Healy cruise report. — (Univ. of New Hampshire, September 20, 2008), 179 p.
25. *Mukasa S. B., Andronikov A., Brumley K., Mayer L.A., Armstrong A.* Basalts from the Chukchi Borderland:  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  ages and geochemistry of submarine intraplate lavas dredged from the western Arctic Ocean // *JGR Solid Earth.* Vol. 125. Is.7. July 2020. Doi: 10.1029/2019JB017604
26. *O'Brien T. M., Miller E.L., Benowitz J.P., Meisling K.E., Dumitru T.A.* Dredge samples from the Chukchi borderland: implications for paleogeographic reconstruction and tectonic evolution of the Amerasia Basin of the Arctic // *Am. J. Sci. (AJS).* 2016. Vol. 316. P. 873–924.
27. *Ogg J.* Geomagnetic polarity time scale. — In: *Geologic Time Scale,* (Elsevier. NY. USA. 2020), P.159–192.
28. *Pease V., Drachev S., Stephenson R., Zhang X.* Arctic lithosphere — A review // *Tectonophysics.* 2014. Vol. 628. P.1–25.
29. *Rowley D.G., Lottes A., Ziegler A.M.* North America–Greenland Eurasia relative motions: Implications for Circum-Arctic tectonic reconstructions // *Am. Assoc. Petrol. Geol. Bull.* 1985. Vol. 69.
30. *Sweeney J.F., Weber J.R., Blasco S.M.* Continental Ridges in the Arctic Ocean: LOREX constraints // *Tectonophysics.* 1982. Vol. 89. No. 1-3. P. 217–237.
31. *Tchernychev M. Yu., Makris J.* Fast calculations of gravity and magnetic anomalies based on 2D and 3D grid approach, (Proc. 66th SEG Meeting. Denver, 1996. Abstr.), P. 1136–1138.
32. *Vogt P.R., Taylor P.T., Kovacs L.C., Johnson G.L.* The Canada Basin: Aeromagnetic constrains on structure and evolution // *Tectonophysics.* 1982. Vol. 89. P. 295–336.
33. *Geosoft Oasis Montaj,* www.geosoft.com/products/oasis-montaj, (Accessed 03.07.2018).

## Structural Connection of the Chukchi Borderland and the Chukchi Sea Shelf: 3D Geophysical Modelling of the Earth Crust

A. L. Piskarev<sup>a, b, \*</sup>, A. A. Kireev<sup>a</sup>, G. I. Ovanesian<sup>a</sup>, V. A. Poselov<sup>a</sup>, V. A. Savin<sup>b</sup>,  
O. E. Smirnov<sup>a</sup>, S. N. Tabyrtsa<sup>a, b</sup>

<sup>a</sup>*Gramberg All-Russia Research Institute of Geology and Mineral Resources of the World Ocean (VNIIOkeangeologia), bld. 1, Angliiskiy prosp., 190121 St. Petersburg, Russia*

<sup>b</sup>*St. Petersburg State University – Institute of Earth Sciences, bld. 7–9, Universitetskaya emb., 199134 St. Petersburg, Russia*  
*\*e-mail: apiskarev@gmail.com*

A 3D model of the crustal structure of the region, which includes the Chukchi Borderland with the adjacent ocean and the Chukotka–Alaska Shelf, has been compiled and calculated. The peculiarity of the crustal structure is the three-sided isolation of the Chukchi Borderland and presence of a transitional area from the south connecting the Chukchi Borderland with the Chukotka–Alaska Shelf. The connection between the Chukchi Borderland and the Wrangel Rise of the Chukchi Shelf is traced through the North Chukchi Rise located between the North Chukchi Trough and the Hanna Trough. A clockwise rotation of the Chukchi Borderland began in the Early Cretaceous, because basalts at the bottom of the sedimentary strata sections along the eastern and southern boundaries of the Chukchi Basin have a reversed magnetization, i.e., their outpouring occurred before the beginning of the Cretaceous superchron, earlier than 121 Ma. Near the upper boundary of the Neocomian, there was a large-scale shear displacement of crustal blocks along the eastern boundary of the Chukchi Rise, which had a thrust pattern before that. The 3D model demonstrates that the Chukchi Borderland and the Chukchi Basin are the natural components of the continental margin, as they have a strong geological connection with the continental masses of the Chukchi Shelf.

**Keywords:** Chukchi Borderland, Chukotka–Alaska shelf, seismic survey, gravity and magnetic anomalies, 3D geophysical model, Earth’s crust, tectonics