

УДК 550.831+550.838+551.241

DOI: 10.24930/1681-9004-2023-23-1-52-67

## Геофизическое изучение земной коры (северные регионы России и шельф арктических морей)

М. С. Чадаев<sup>1</sup>, В. И. Костицын<sup>2</sup>, В. А. Гершанок<sup>2</sup>, Г. В. Простолупов<sup>1</sup>, М. В. Тарантин<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Горный институт УрО РАН, 614007, г. Пермь, ул. Сибирская, 78А, e-mail: gena-prost@yandex.ru

<sup>2</sup>Пермский государственный национальный исследовательский университет, 614068, г. Пермь, ул. Букирева, 15, e-mail: geophysic@psu.ru

Поступила в редакцию 08.02.2022 г., принята к печати 02.11.2022 г.

**Объект исследования.** Земная кора на территории двух районов: северо-западной части Восточно-Европейской платформы и прилегающей акватории, а также акваторий Восточно-Сибирского, Чукотского морей и российского восточного сектора Северного Ледовитого океана, включая хр. Ломоносова и поднятие Менделеева–Альфа. Исследования ориентированы на картирование границы Мохо, мощности и типа земной коры, необходимых для обоснования внешней границы континентального шельфа. **Материалы и методы.** Использованы авторские оригинальные материалы, полученные при обработке данных гравиметрии и магнитометрии в системе ВЕКТОР. На основе связи между аномалиями силы тяжести и плотностной дифференциацией пород характеризуются форма, размеры изучаемых объектов и их глубинное взаимоположение. **Результаты исследования.** Построены схемы и профили глубинного строения земной коры, полученные с применением способа системы ВЕКТОР, протестированы с помощью глобальной сейсмической модели European Moho. Положительные формы раздела Мохо и приподнятые участки поверхности шельфа соответствуют положительным аномалиям трансформированного гравитационного поля. Распространение структуры поля континентальных аномалий в районе Певек–Анадырь на морскую часть рассматриваемой территории может косвенно подтвердить принадлежность хр. Ломоносова, поднятий Менделеева и Альфа к континентальному типу коры. **Выводы.** Глобальные, т. е. относящиеся к территории земного шара, трехмерные модели Мохо позволяют расширить знания об особенностях строения шельфа. Геопотенциальные поля в системе ВЕКТОР отображают тектонику изучаемой среды системно и более полно, чем ее возможно представить по системе профильных сейсмических исследований.

**Ключевые слова:** земная кора, шельф, море, Восточно-Европейская платформа, глобальная модель Мохо, хребты и впадины, глубинное сейсмическое зондирование, гравиметрия, магнитометрия, система ВЕКТОР

### Источник финансирования

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и образования РФ (регистрационный номер проекта 122012000398-0)

## Geophysical study of the Earth's crust (Northern regions of Russia and the Arctic sea shelf)

Mikhail S. Chadaev<sup>1</sup>, Vladimir I. Kostitsyn<sup>2</sup>, Valentine A. Gershanok<sup>2</sup>, Gennady V. Prostolupov<sup>1</sup>, Mikhail V. Tarantin<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Mining Institute, UB RAS, 78A Sibirskaya st., Perm 614007, Russia, e-mail: gena-prost@yandex.ru

<sup>2</sup>Perm State University, 15 Bukireva st., Perm 614068, Russia, e-mail: geophysic@psu.ru

Received 08.02.2022, accepted 02.11.2022

**Research subject.** The results of the geological and geophysical study of the Earth's crust on the territory of two regions are presented: the northwestern part of the East European Platform and the adjacent water area, as well as the waters of the East Siberian, Chukchi Seas and the Russian eastern sector of the Arctic Ocean, including the Lomonosov ridge and the Mendeleev–Alpha rise. The research is focused on mapping the Moho, the thickness and type of the Earth's crust necessary to substantiate the outer boundary of the continental shelf. **Materials and methods.** The authors' original ma-

**Для цитирования:** Чадаев М.С., Костицын В.И., Гершанок В.А., Простолупов Г.В., Тарантин М.В. (2023) Геофизическое изучение земной коры (северные регионы России и шельф арктических морей). *Литосфера*, **23**(1), 52–67. <https://doi.org/10.24930/1681-9004-2023-23-1-52-67>

**For citation:** Chadaev M.S., Kostitsyn V.I., Gershanok V.A., Prostolupov G.V., Tarantin M.V. (2023) Geophysical study of the Earth's crust (Northern regions of Russia and the Arctic sea shelf). *Lithosphere (Russia)*, **23**(1), 52–67. (In Russ.) <https://doi.org/10.24930/1681-9004-2023-23-1-52-67>

© М.С. Чадаев, В.И. Костицын, В.А. Гершанок, Г.В. Простолупов, М.В. Тарантин, 2023

materials obtained during the processing of gravimetry and magnetometry data in the VECTOR system were used. Based on the relationship between gravity anomalies and density variations of rocks, the shape, size of the studied objects, and their deep mutual position are characterized. *Results.* The constructed schemes and profiles of the deep structure of the Earth's crust, obtained using the VECTOR method, were tested using the European Moho global seismic model. The positive forms of the Moho section and the raised parts of the shelf surface correspond to the positive anomalies of the transformed gravitational field. The spread of the structure of the field of continental anomalies in the Pevek–Anadyr area to the marine part of the territory under consideration can indirectly confirm the belonging of the Lomonosov Cr., the Mendeleev and Alpha ridges to the continental type of crust. *Conclusion.* Global, i.e., related to the territory of the globe, three-dimensional models of Moho allow us to expand and deepen the amount of knowledge about the features of the shelf structure. Geopotential fields in the VECTOR system display the tectonics of the studied environment systematically and comprehensively compared to its representation according to the scheme of profile seismic studies.

**Keywords:** Earth's crust, shelf, sea, East European platform, global Moho model, ridges and depressions, deep seismic sounding, gravimetry, magnetometry, VECTOR system

#### Funding information

The research was financially supported by the Ministry of Science and Education of the Russian Federation (project registration number 122012000398-0)

## ВВЕДЕНИЕ

Геологические исследования земной коры, как правило, выполняются на основе комплексной интерпретации методов сейсморазведки (глубинное сейсмическое зондирование и др.), гравиметрии и магнитометрии, геохимических и геотермических данных, а также сведений о петрофизических свойствах пород исследуемого региона, что позволяет выполнять моделирование и получать достаточно надежные геологические результаты.

Для обоснования поисково-разведочных работ на шельфе и в море необходимо установить тип коры, ее мощность, также изучить рельеф раздела Мохо. Структурная схема поверхности Мохо позволяет картировать крупные глубинные тектонические элементы, оценивать их связь с залегающими выше структурами, а также предсказать закономерности размещения полезных ископаемых, геологическими индикаторами которых служат глубинные мантийные разломы. Для континентальной коры Арктики важно установить закономерности размещения мантийных рудных месторождений в зонах тектономагматической активизации, рифтогенных структур и вулканических поясов, что расширяет область поисков рудных месторождений мантийного класса (Додин, 2015).

При постановке работ методами гравиметрии и магнитометрии учтены следующие геолого-экономические особенности освоения севера. Континентальный шельф и склон арктического региона содержат богатые месторождения нефти и природного газа, залежи металлов, в том числе оловянных руд (касситерита). Разведанные запасы сырья в Арктике, по некоторым оценкам, составляют всего порядка 10–15 % от общих минеральных ресурсов этого обширного региона, что свидетельствует о целесообразности исследований в связи с пред-

стоящим освоением этих недр. Это подчеркивает актуальность обоснования геологической принадлежности части территорий Арктики к континентальному шельфу России.

Цель работы – с использованием современных средств обработки гравиметрических и магнитных данных, разработанных в Горном институте УрО РАН, таких как система ВЕКТОР, программа Полюс и др., исследовать закономерности и особенности гравитационного (магнитного) поля и его трансформант, создать объемные модели среды, тем самым получить дополнительные сведения о строении недр северо-западного региона и шельфов арктических морей.

## ГЛОБАЛЬНЫЕ МОДЕЛИ ГРАНИЦЫ МОХО

### Корреляция между аномалиями Буге и глубинами Мохо

При интерпретации материалов сейсморазведки и гравиметрии обычно выделяют верхнюю и нижнюю кору. Обоснованием этого служат корреляционные связи между скоростью продольных волн  $V_p$  и плотностью  $\sigma$  пород:  $\sigma = f(V_p)$ , с учетом петрофизических критериев. Взаимная корреляция указанных параметров служит также основанием для использования их отношения (адмиттанса) при структурно-тектоническом анализе (Чадаев и др., 2011, 2016; Шаров, 2017).

Петрофизическая граница Мохо, разделяющая земную кору и верхнюю мантию Земли, характеризуется фазовым переходом вещества пород верхней мантии. Источником сведений о вещественном составе пород служат глубинные интрузии.

На основе корреляционной связи между плотностью и скоростью сейсмических волн следует принять, согласно С.Н. Кашубину с соавторами

(2011), плотность верхнего слоя континентальной коры равной  $2.65 \text{ г/см}^3$  и нижнего –  $2.87 \text{ г/см}^3$ . Для океанической коры (под осадочным слоем) плотность также может быть принята равной  $2.87 \text{ г/см}^3$ .

Поле корреляции между величинами аномалий силы тяжести (плотность  $2.67 \text{ г/см}^3$ , осреднение в радиусе 100 км) и глубинами границы Мохо для циркумполярной области и Евразии (Кашубин и др., 2011) приведено на рис. 1. Наблюдается достаточно тесная линейная связь рассматриваемых параметров: скопления точек для суши (красного цвета) и для моря (синих) образуют малоинтенсивные и нулевые аномалии силы тяжести. Усредненная линия корреляции изменяет направление на границе суша–море (с координатами примерно 40 км и 0 мГал).

#### Аналитическое продолжение аномалий силы тяжести

Технология построения контактной поверхности по аномалиям силы тяжести детально разработана профессором А.К. Маловичко (1956). В ее основу положена замена нелинейного интегрального уравнения первого рода уравнением в линеаризованной трактовке на основе бинома Ньютона  $(a + b)^n = a^n + na^{n-1}b + \dots$ . В результате получено уравнение второго рода:

$$V_z = f \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \sigma \left[ \frac{1}{\sqrt{x^2 + y^2 + (z_0 - h_1)^2}} - \frac{1}{\sqrt{x^2 + y^2 + (z_0 + h_2)^2}} \right] dx dy, \quad (1)$$

где  $V_z$  – первая вертикальная производная потенциала,  $f$  – гравитационная постоянная,  $\sigma$  – аномальная плотность,  $z_0$  – глубина вспомогательной поверхности,  $h_1$  и  $h_2$  – расстояния от  $z_0$  до верхней и нижней точек контактной поверхности.

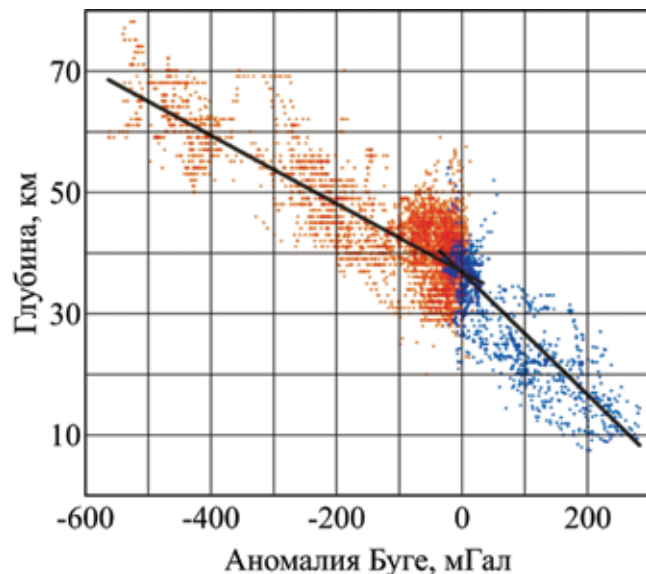
Принимая  $h = h_1 + h_2$ , получим

$$V_z = f \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \sigma h \frac{z_0}{(x^2 + y^2 + z_0^2)^{3/2}} dx dy. \quad (2)$$

Заменяя произведение  $f\sigma h$  выражением для притяжения плоского слоя, окончательно имеем

$$V_z = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} V_z(x, y, z_0) \frac{z_0}{(x^2 + y^2 + z_0^2)^{3/2}} dx dy. \quad (3)$$

Задача определения переменной плотности  $\sigma(\zeta)$  в горизонтальном пласте по аналитически продолженным значениям аномалий силы тяжести рассмотрена В.М. Новоселицким (1965). Искомая формула записана в виде



**Рис. 1.** Поле корреляции глубины границы Мохо и аномалий силы тяжести в редукции Буге (Кашубин и др., 2011).

**Fig. 1.** The correlation field of Moho boundary depth and gravity anomalies in the Buge reduction (Kashubin et al., 2011).

$$V_z(x; -z_0) = f \int_{-\infty}^{+\infty} \sigma(\zeta) \ln \frac{(x - \zeta)^2 + \left(z_0 + \frac{h}{2}\right)^2}{(x - \zeta)^2 + \left(z_0 - \frac{h}{2}\right)^2} d\zeta. \quad (4)$$

В формуле (4) уровень  $z_0$  соответствует середине пласта, на который выполняется аналитическое продолжение аномалий и вычисляется интеграл типа свертки с быстро убывающим ядром.

Карта второй радиальной производной гравитационного потенциала, используемая в глобальной модели Мохо на основе комбинации модели CRUST2.0 и GOCE data, приведена на рис. 2. Максимальные положительные градиентные значения поля соответствуют окраинным частям континентов, а также горно-складчатым сооружениям.

При обработке данных введены поправки за толщину льда с плотностью  $0.98 \text{ г/см}^3$ , слой воды с плотностью  $1.02 \text{ г/см}^3$ , влияние осадочных слоев, неоднородности земной коры и верхней мантии. В итоге получено интегральное уравнение второй вертикальной производной, для решения которого применен прием линеаризации ядра уравнения (Reguzzoni et al., 2013). Поверхность Мохо определяется от ее среднего положения в зависимости от широты и долготы.

Среди гравиметрических моделей выделяются Italy Moho, разработанная на основе сейсмической CRUST2.0 model и гравиметрических данных,

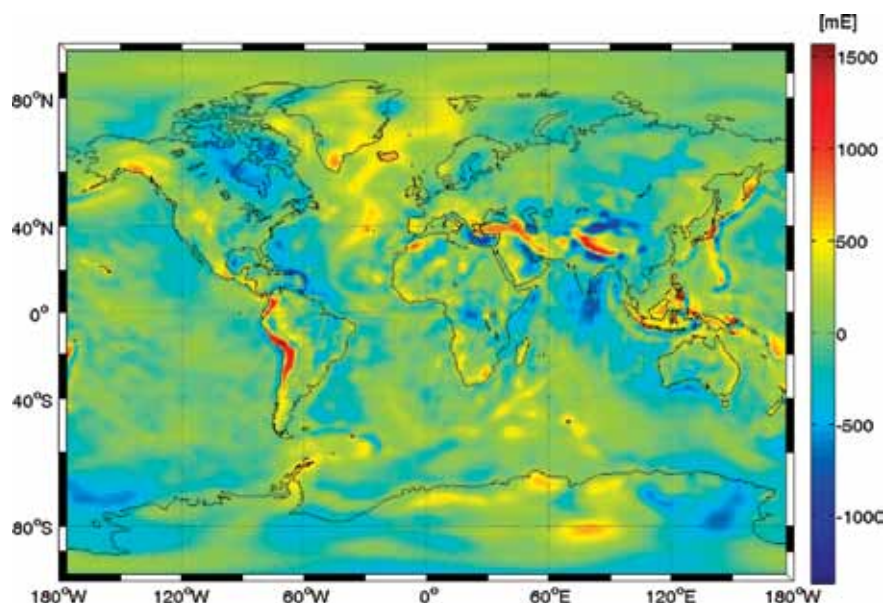


Рис. 2. Карта второй радиальной производной гравитационного потенциала (Reguzzoni et al., 2013).

Fig. 2. Map of the second radial derivative gravitational potential (Reguzzoni et al., 2013).

полученных спутником GOCE data (Sjöberg, Bagherbandi, 2011), а также ряд получивших дальнейшее развитие технологий на основе решения прямой и обратной задач гравиметрии способом подбора (Воронежский государственный университет) и системы ВЕКТОР (Горный институт УрО РАН).

Известен ряд современных сейсмических глобальных карт (Grad et al., 2009): European Moxo (2009 г.) (28°N–86°N, 40°W–70°E), Australian Moxo (2011 г.) (10°S–45°S–110°E–160°E), North America Moxo (2009 г.) (30°N–50°N, 70°W–100°W), Italy Moxo (2010 г.) – комбинация двух моделей CRUST2.0 model and GOCE data (Gravity field and steady-state Ocean Circulation Explorer – спутник для исследования гравитационного поля и постоянных океанических течений).

### Система ВЕКТОР

Система разработана в Горном институте Уральского отделения РАН под руководством проф. В.М. Новоселицкого (Новоселицкий и др., 2004) – новый метод трансформации потенциальных полей, основанный на геотомографическом подходе.

Программа ВЕКТОР для системы Windows создана в среде программирования C++ Builder 6.0 и предоставляет возможность выбора алгоритма расчета: классическое осреднение, предусматривающее разделение поля на локальную и региональную составляющие, подобно приемам Тихонова–Буланже, Гриффина, Саксова–Нигарда или исполь-

зование истокообразных аппроксимаций (Долгаль, 1999; Тарантин, 2016). На выходе программа позволяет параметрически отобразить внутреннюю структуру недр в цветном изображении.

Особенность алгоритма расчетов заключается в том, что горизонтальные градиенты вычисляются в центрах треугольников, вершинами которых являются пункты со значениями поля. Треугольники на карте могут взаимно перекрываться. В случае значительного количества треугольников на единицу площади происходит усреднение исходя из соображений регулярности сети векторов для дальнейшей обработки. С получением более регулярной сети осуществляется подавление случайных ошибок измерений как на этапе триангуляции, так и при осреднении. Каждый вектор является функцией как минимум трех измеренных значений поля силы тяжести, а в случае избыточной сети треугольников – опирается на большее число измеренных значений. Происходит сглаживание высокочастотной составляющей поля, радиус корреляции которой существенно меньше, чем горизонтальные размеры треугольника.

Полученные массивы компонент векторов градиента  $\{V_{zx}, V_{zy}\}$  подвергают процедуре осреднения в скользящих окнах различных размеров. Следующий шаг – интегрирование (восстановление) массива трансформированных значений  $V_z$  – для картопостроения и визуализации поля в виде трехмерной диаграммы аномалий силы тяжести в целях удобства содержательной интерпретации трансформант.

С увеличением размеров сканирующего окна происходит увеличение глубины “зондирования” геологической среды, т. е. возрастает эффективная мощность изучаемого слоя. Это позволяет предположить, что локальная составляющая поля отражает строение верхней части разреза – от земной поверхности до некоторой эффективной глубины  $h_{эф(i)}$ , определяемой коэффициентом трансформации  $k_i$ . При увеличении коэффициента трансформации  $k_{i+1}$  эффективная глубина (глубина “зондирования”) также увеличится и станет равной  $h_{эф(i+1)}$ . Тогда разностную составляющую поля градиентов можно считать отражением строения “пачки пород” на глубине от  $h_{эф(i)}$  до  $h_{эф(i+1)}$ . Под “пачкой пород” понимается некоторый квазигоризонтальный слой, заключающий в себе совокупность источников поля, например точечных. В результате получаем разностную карту восстановленного поля, определяемую двумя коэффициентами трансформации и двумя соответствующими эффективными глубинами.

Рассчитав серию разностных карт (слоев) восстановленного поля, можно получить объемное распределение трансформант или трехмерную разностную диаграмму. По вертикальной шкале такой диаграммы откладывается коэффициент трансформации  $k$  или эффективные глубины  $h_{эф}$ . Рассчитанная изложенным путем диаграмма приблизительно отражает объемное распределение плотности горных пород, пусть и в размерности трансформанты  $V_z$  (в рамках модели), поэтому ее можно считать “квазиплотностной” моделью среды.

Материалами для геологического истолкования являются карты трансформированных горизонтальных градиентов поля силы тяжести, отражающие слои с разными эффективными глубинами (графическое изображение векторов); карты и трехмерные диаграммы значений поля силы тяжести, восстановленного интегрированием из трансформант горизонтальных градиентов; карты и трехмерные диаграммы модулей горизонтальных градиентов. Наиболее информативны разностные карты (срезы) и разностные трехмерные диаграммы, которые дают возможность приблизительно определить плановое положение и эффективные глубины источников аномалий, оценить относительные размеры источников, выяснить их взаимное расположение.

Трансформация горизонтальных градиентов позволяет повысить чувствительность известного метода осреднения в окнах, что в комплексе с приемом послойного выделения эффектов поля дает возможность проводить более детальное разделение и локализацию источников как в плане, так и по глубине. Поле разностной карты или трехмерной диаграммы не является внутренним полем изучаемой среды или продолжением в нижнее полупространство. Поле разностной карты с эффектив-

ными глубинами  $h_1$  и  $h_2$ , как и поле горизонтального слоя трехмерной диаграммы, рассматривается как гравитационное влияние слоя модели среды с теми же глубинами на поверхность наблюдений (земную поверхность). Сумма всех разностных трансформант или слоев трехмерной диаграммы равна исходному полю, т. е. полю, введенному в обработку. Привязка по глубине разностных трансформант основана на модели точечных источников, что допускает следующую интерпретацию: центры аномалий на трехмерных трансформантах могут рассматриваться как множество точечных источников гипотетической модели среды, суммарное поле от которой соответствует исходному. Такой подход наиболее применим к задачам рудного типа, однако, как показала практика, способ может быть использован и при решении ряда структурных задач (Простолупов и др., 2006).

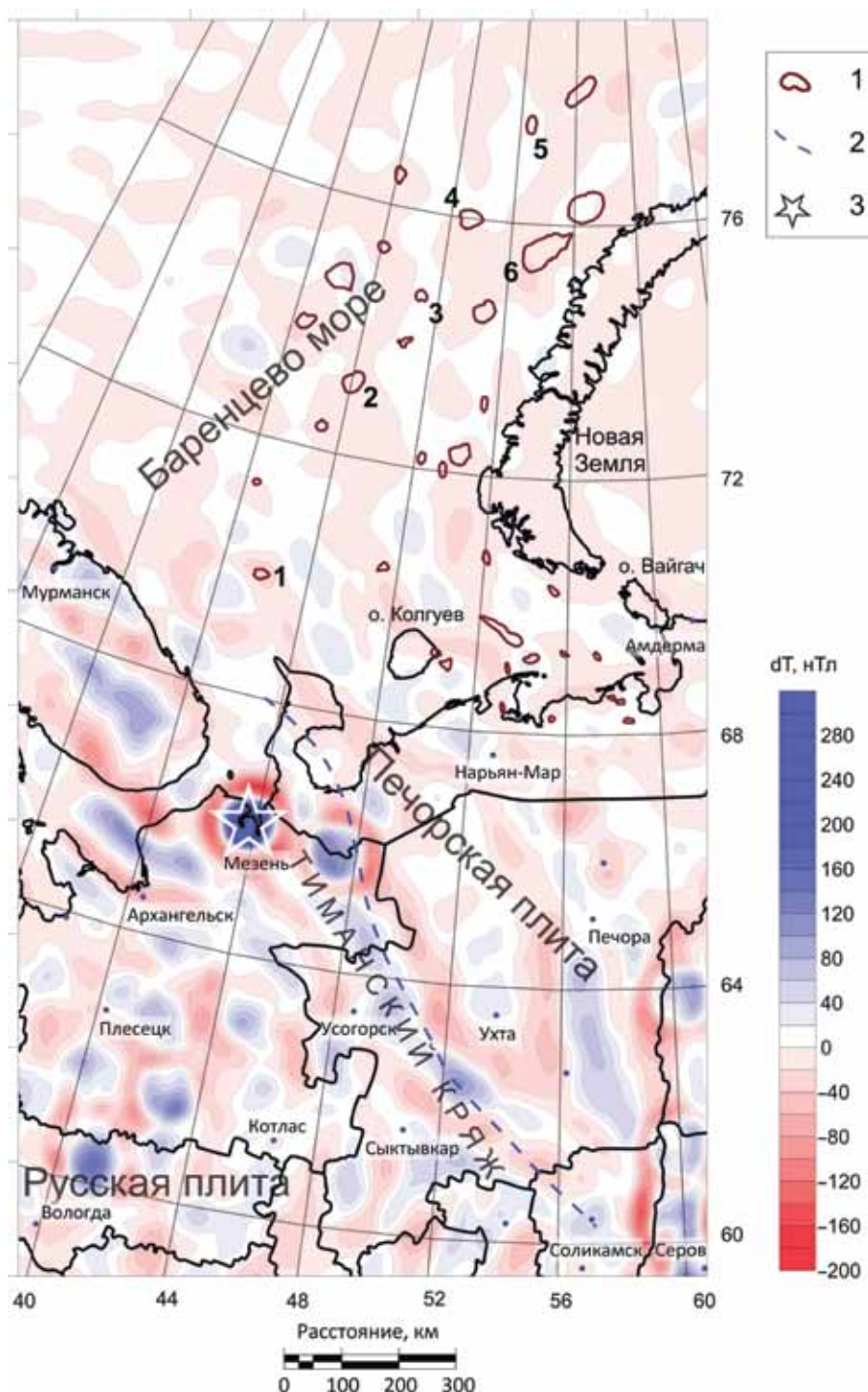
Например, на рис. 3 приведен горизонтальный срез диаграммы 3D магнитного поля для территории Тимано-Печорской провинции (фрагмент). Здесь отчетливо выражен мозаичный характер трансформированного в системе ВЕКТОР поля. Для Печорской плиты и моря преобладают цепочки аномалий северо-восточного направления, а для Русской плиты – северо-западного. Вдоль южного побережья Белого моря (территория России) простирается Беломорский пояс, сложенный супракрустальными породами, которые в магнитном поле (см. рис. 3) выделяются интенсивными по величине положительными аномалиями.

Юго-западнее располагается значительный по площади сложенный изверженными породами и гнейсами Карельский кратон, характеризующийся относительно приподнятыми формами поверхности Мохо.

### **Аномальные магнитные поля земной коры и размещение месторождений полезных ископаемых**

Одной из задач глубинных исследований недр является прогнозирование структурно-вещественных неоднородностей, используемых для обоснования перспектив освоения минеральных и энергетических ресурсов. Важнейшим объектом поисков и разведки служат нефтегазовые месторождения.

Содержательная интерпретация данных гравиметрии и магнитометрии, т. е. установление качественных и количественных соотношений между аномальными величинами этих полей, с одной стороны, и геологическими параметрами, с другой, является необходимым условием постановки комплексных работ на твердые полезные ископаемые и углеводороды. Решение вопросов, связанных с этой задачей, вызывает большие сложности. Результаты, полученные А.П. Лихачевым (2013) и другими учеными, о связи между наблюдаемы-



**Рис. 3.** Горизонтальный срез трехмерной диаграммы магнитного поля  $\Delta T$ , полученный по системе ВЕКТОР и отражающий структурные особенности пород верхней и средней частей земной коры.

1 – локальные структуры и месторождения на море: Мурманское (1), Штокмановское (2), Лудловское (3), Луниинское (4), Трубытчинское (5), Адмиралтейская структура (6); 2 – Западно-Тиманский разлом; 3 – интенсивная магнитная аномалия по данным (Губайдуллин, Онякова, 2020) – Мезенский магнитный и гравитационный максимум.

**Fig. 3.** Horizontal section of a three-dimensional diagram of the magnetic field  $\Delta T$  obtained by the VECTOR system and reflecting the structural features of rocks of the upper and middle parts of the Earth's crust.

1 – local structures and deposits at sea: Murmansk (1), Shtokman (2), Ludlovskoye (3), Luninskoye (4), Trubyatchinskoye (5), Admiralty structure (6); 2 – West Timan fault; 3 – intense magnetic anomaly according to data (Gubaidullin, Onyakova, 2020) – Mezen magnetic and gravitational maximum.

ми магнитными (и другими) полями и размещением месторождений многих полезных ископаемых вносят существенный вклад в развитие процесса прогнозирования.

Большинство известных золоторудных месторождений размещаются на площадях, где развиты породы с очень низкими магнитными свойствами. Такие площади характеризуются слабой интенсивностью аномалий магнитного поля и приурочены к зонам сжатия.

По версии А.П. Лихачева, полезные ископаемые имеют свою специфическую общую закономерность в размещении. Площади распространения одних полезных ископаемых характеризуются интенсивными магнитными полями (месторождения железной руды, платины, титана и др.), других – слабыми (золота, алмазов, нефти, газа, медного колчедана и др.). Например, факт приуроченности месторождений алмазов к слабомагнитным полям установлен для Архангельского, Якутского и Южноафриканского регионов.

Для части территорий Республики Коми и Пермского края имеет место совмещение месторождений газа и нефти со слабомагнитными полями. В акватории Баренцева моря аналогично отмечаются аномалии магнитного и гравитационного полей, близкие к нулевым значениям, для локальных структур и месторождений нефти и газа.

На рис. 4 представлена структурная карта границы Мохо. Мезенская магнитная аномалия (обозначена звездочкой на рис. 3) выделяется повышенным, до 35 км, положением этой границы, т.е. меньшей мощностью земной коры.

Зона относительно пониженного положения границы Мохо включает в себя Новую Землю (архипелаг), о-ва Колгуев, Вайгач и прибрежную территорию, где глубины составляют более 40 км, а в южной части архипелага достигают 49 км. Данная зона имеет тип коры, указывающий на общность ее структурно-тектонических форм и сочленяющегося с ней материка. Эта территория входит в состав Тимано-Печорской нефтегазоносной провинции (Печорский нефтегазовый бассейн). Западнее, в основном на территории Архангельской области, глубины поверхности Мохо согласуются по величине с глубинами на шельфе Баренцева моря – около 40 км. На карте отчетливо выявляется локальное поднятие, сводовая часть которого имеет глубину порядка 35 км, что территориально совмещено с Мезенским максимумом (Губайдуллин, Онякова, 2020).

Архипелаг Новая Земля имеет специфическое глубинное основание, свойственное Уралу. Остров Вайгач характеризуется глубинами раздела Мохо – 39–40 км, поверхность Мохо в районе о-ва Колгуев находится на глубине порядка 42–43 км.

Океаническая кора, по сравнению с континентальной, значительно тоньше. В верхнем слое она

сложена главным образом базальтами, ниже – породами типа габбро, диорит, диабаз. Осадочный слой характеризуется переменной мощностью, достигаая 500 м, а на отдельных участках нескольких тысяч метров.

Арктические глубинные осадочные бассейны, котловины, хребты, поднятия с континентальным строением земной коры в связи с их нефтегазоносностью имеют приоритетное значение для исследований.

## СЕВЕРНЫЙ ЛЕДОВИТЫЙ ОКЕАН И ОКРАИННЫЕ МОРЯ

### Исследования подводных структур

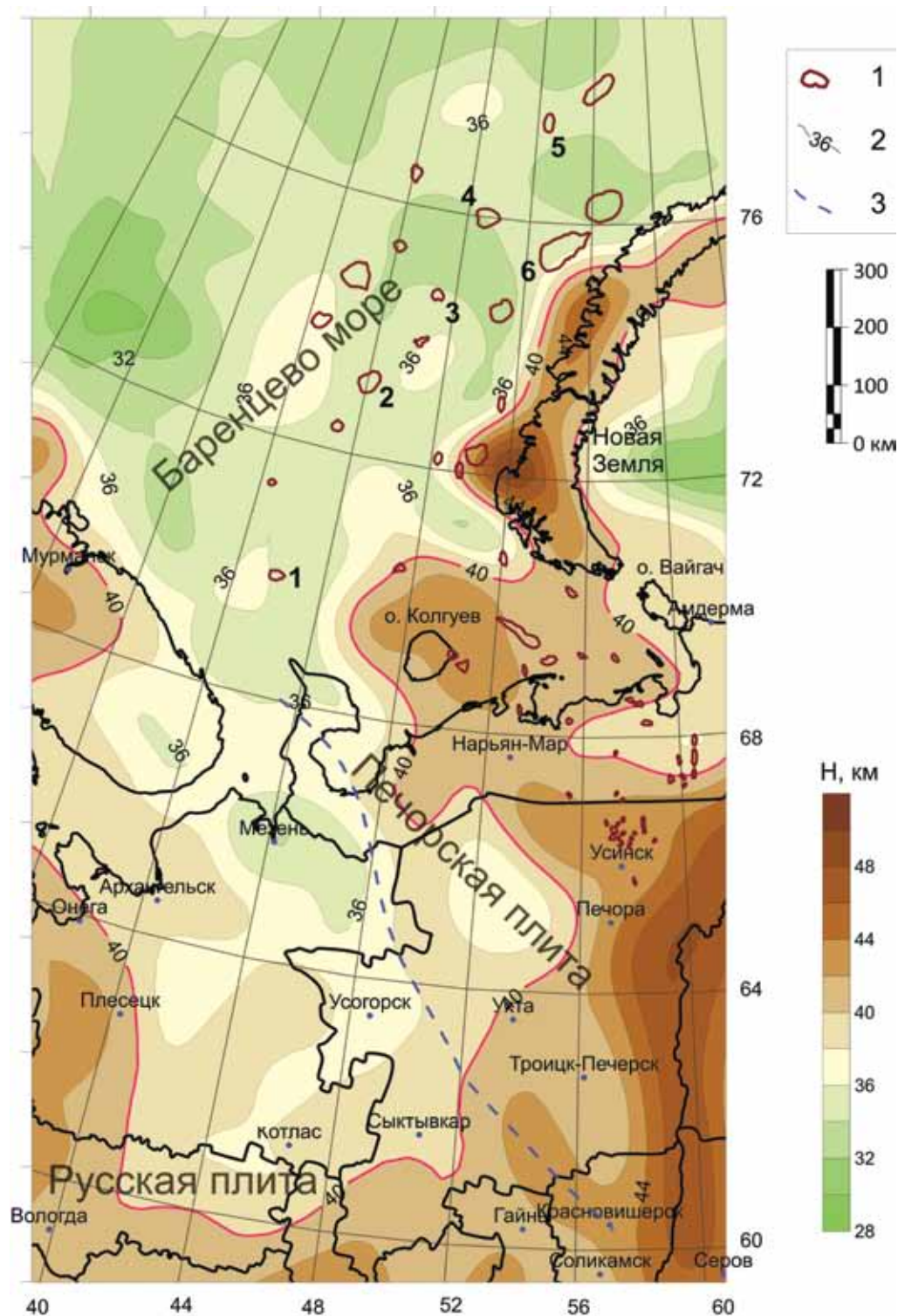
На рис. 5 изображен (Морозов и др., 2013) район морского дна Северного Ледовитого океана, в том числе моря Лаптевых, Восточно-Сибирского, Чукотского морей. Северо-восточнее находится зона шельфа, а затем собственно океан. Участки дна для проведения исследований выбирались в результате изучения морфологии, а также по сейсморазведочным данным. Участки дна, в которых были произведены разведочные работы, показаны на карте (см. рис. 5).

Поднятие Менделеева–Альфа с западной части ограничивается хребтом Ломоносова, котловиной Подводников, с восточной – Канадской котловиной, с южной – Чукотской. Поднятие Менделеева по своему простираению примерно соответствует меридиану 180°, проходящему через о-в Врангеля.

Срез трехмерной диаграммы гравитационного поля в системе ВЕКТОР показан на рис. 6. Особенности строения поднятия Менделеева–Альфа по данным гравиметрии сводятся к следующему. Одиночные и сгруппированные отдельные линейные поднятия преимущественно отображаются системами положительных аномалий, а котловины – отрицательных. Аномалии упорядоченно отражают структурные особенности границы Мохо: хребты и котловины.

Глубина до Мохо имеет важное значение при изучении первичных источников магм базальтового состава (Йодер, Тилли, 1965).

Общей морфологической характеристикой аномального гравитационного поля в пределах контура Центрально-Арктического ареала распространения базальтов меловой магматической провинции (Морозов и др., 2013) является относительно низкая амплитуда и размеры аномалий (см. рис. 6). Поля данного типа характерны для окружения о-ва Врангеля и в области Певек–Анадырь, что косвенно подтверждает континентальное происхождение поднятия Менделеева–Альфа. По исследованиям С.Н. Кашубина с соавторами (2013, 2016), данный район представляет собой мегаструктуру, являющуюся продолжением материковой окраины Евразийского бассейна.

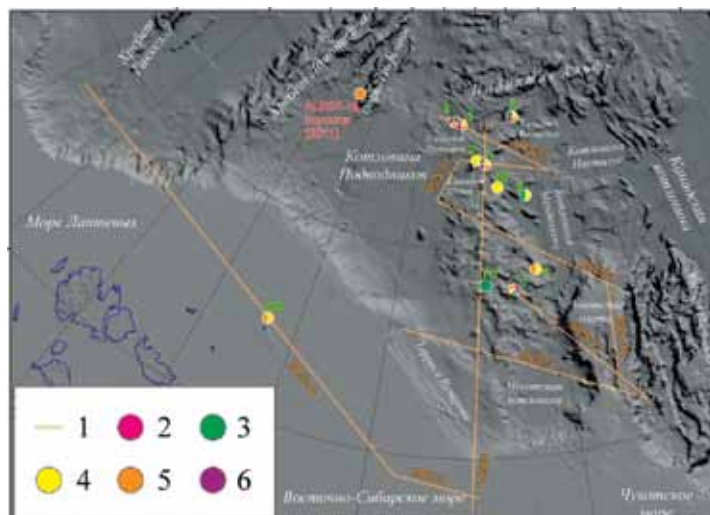


**Рис. 4.** Структурная карта поверхности Мохо.

1 – локальные структуры и нефтегазовые месторождения: Мурманское (1), Штокмановское (2), Лудловское (3), Лунинское (4), Трубятчинское (5), Адмиралтейская структура (6); 2 – изолинии глубин, км (изолиния красного цвета имеет оцифровку 40 км), по данным (Grad et al., 2009); 3 – Западно-Тиманский разлом.

**Fig. 4.** Structural map of the Moho surface.

1 – local structures and oil and gas fields: Murmanskoye (1), Shtokmanovskoye (2), Ludlovskoye (3), Luninskoye (4), Trubychinskoye (5), Admiralty structure (6); 2 – depth isolines, km (red isoline has a digitization of 40 km), according to the data (Grad et al., 2009); 3 – West Timan fault.



**Рис. 5.** Участки морского дна на поднятии Менделеева-Альфа (экспедиция “Арктика-2012”) (Морозов и др., 2013).

1 – профили МОВ–ОГТ и сейсмические наблюдения на галсовых переходах, 2 – буровая скважина, 3 – грейфер, 4 – драга, 5 – грунтовая колонка, 6 – манипулятор подводной станции НИПЛ.

**Fig. 5.** Sections of the seabed on the Mendeleev-Alpha hill (Expedition “Arctic-2012”) (Morozov et al., 2013).

1 – CDP profiles and seismic observations at tack crossings, 2 – borehole, 3 – grapple, 4 – dredge, 5 – soil core, 6 – NIPL underwater station manipulator.

### Изучение шельфа и области его сочленения с континентом

Шельф как морская окраина континента характеризуется континентальным типом земной коры. Внешней границей шельфа в классическом представлении служит бровка (обрыв).

Основной вид исследований шельфа – профильная сейсморазведка по методикам МОВ–ОГТ и глубинное сейсмическое зондирование. Сейсмические работы сочетаются с гравиметрией, а также с другими геофизическими, геолого-геохимическими и петрофизическими методами.

Для изучения вещественного состава базальтовых пород интрузивных даек выполняют вертикальное бурение скважин (в том числе со дна моря). Местоположением скважин служат выходы коренных пород – эскарпы. Вещественный состав пород указывает на их принадлежность к нижней коре (вблизи границы Мохо) или фундаменту. В последнем случае базальтовый состав пород фундамента служит косвенным признаком для прогноза типа нижней коры.

На рис. 7 изображена схема расположения линий “а”–“д” (соответствуют отрезку В–В на рис. 6), по которым составлены гравитационные разрезы на акватории Северо-Баренцевской впадины. Профиль “в” принят базовым. Его местоположение соответствует геотраверсу в Баренцевом море. По указанным линиям в системе ВЕКТОР выполнены вертикальные срезы трехмерной диаграммы

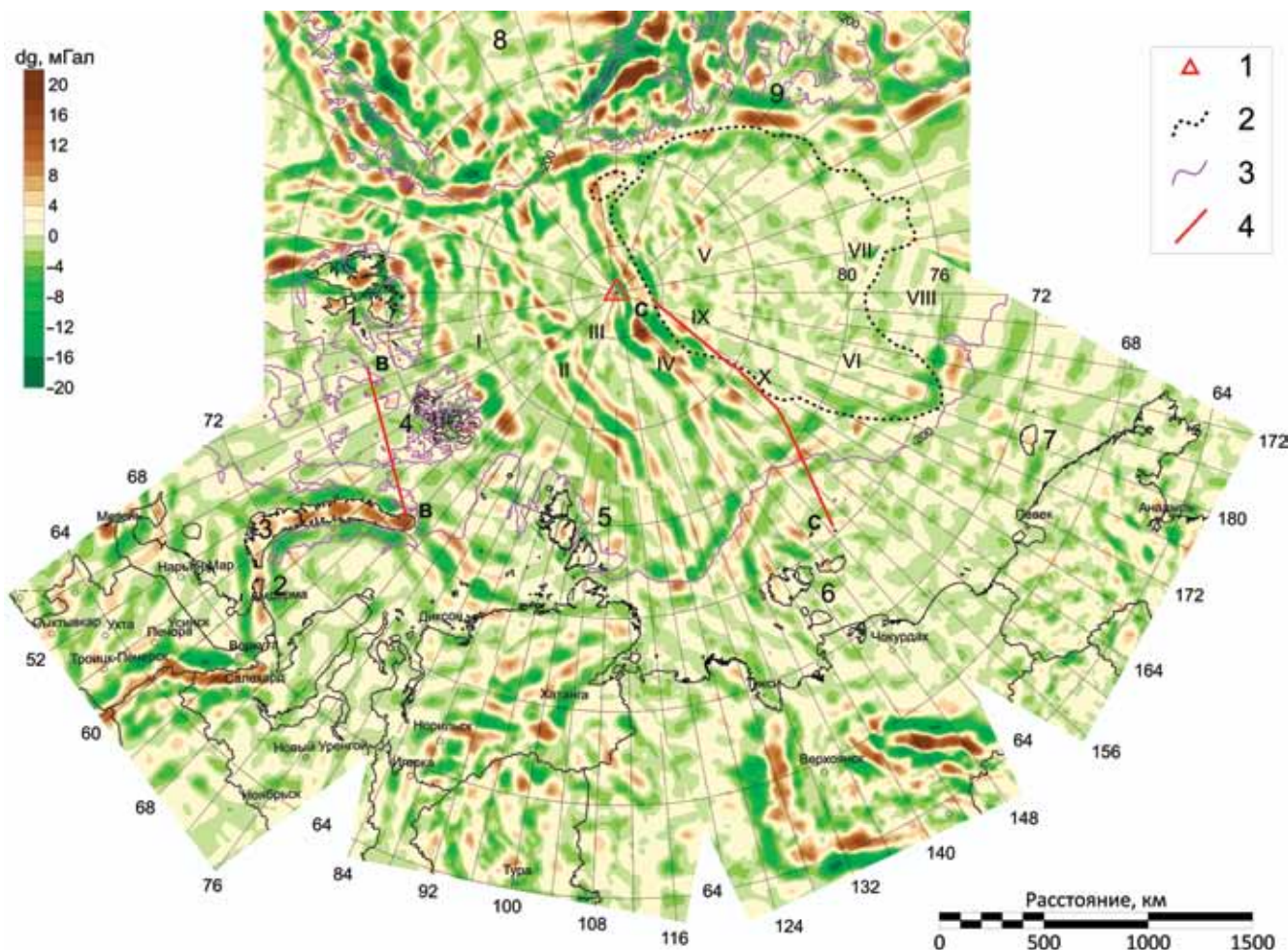
гравитационного поля (рис. 8), обеспечивающие за счет профилей “а”–“д” расширение визуализации аномального пространства в окрестности базового профиля (Чадаев и др., 2017).

На эталонном разрезе (линия “в”) выделены положительные (1–5) и отрицательные (6–10) аномалии (см. рис. 8). Профили анализируются по местоположению аномалий, их интенсивности, размерам и конфигурации.

На рис. 8 также показано положение границы Мохо (Grad et al., 2009) и распределение источников аномалий по глубине (синие точки), построенное в результате полярной трансформации производных гравитационного потенциала в программе ПОЛЮС (Простолупов, Тарантин, 2013). Наименьшая глубина до поверхности Мохо  $\approx 32$  км, наибольшая – 35 км.

Дно шельфа не является ровной поверхностью (см. рис. 5), существуют впадины и поднятия. На разрезах перепады поверхности шельфа возле отметки 200 м отмечены знаком “ромбик” и условно прокоррелированы от разреза к разрезу пунктирными линиями. Поднятия дна океана отчетливо фиксируются на всех разрезах в виде положительных аномалий. Так, аномалия 1 может быть уверенно прослежена по профилям “б”, “г” и “д”; аномалии 2 и 3 – между профилями “б” и “а”; аномалия 4 – между профилями “в” и “б”.

Положительные аномалии в системе ВЕКТОР, как правило, приурочены не только к повышенным участкам дна, но и к повышенному нахождению границы



**Рис. 6.** Горизонтальный срез трансформанты гравитационного поля, полученной в системе ВЕКТОР. Шельф и континент территории РФ.

1 – Северный полюс; 2 – контур Центрально-Арктического ареала распространения базальтов меловой магматической провинции (Морозов и др., 2013); 3 – изолиния глубин, оцифрованная –200 м; 4 – линии В–В и С–С, определяют плановое положение эталонных разрезов на рис. 7 и 9. I – котл. Нансена, II – хр. Гаккеля, III – котл. Амундсена, IV – хр. Ломоносова, V – хр. Альфа, VI – хр. Менделеева, VII – Канадская котл., VIII – Чукотское плато, IX – котл. Макарова, X – котл. Подводников. Острова: 1 – Арх. Шпицберген, 2 – Вайгач, 3 – арх. Новая Земля, 4 – Земля Франца-Иосифа, 5 – арх. Северная Земля, 6 – Новосибирские, в том числе о-ва Де-Лонга, 7 – о-в Врангеля, 8 – о-в Гренландия, 9 – Канадские Арктические острова.

**Fig. 6.** Horizontal section of the transformant of the gravitational field obtained in the VECTOR system. Shelf and continent of the territory of the Russian Federation.

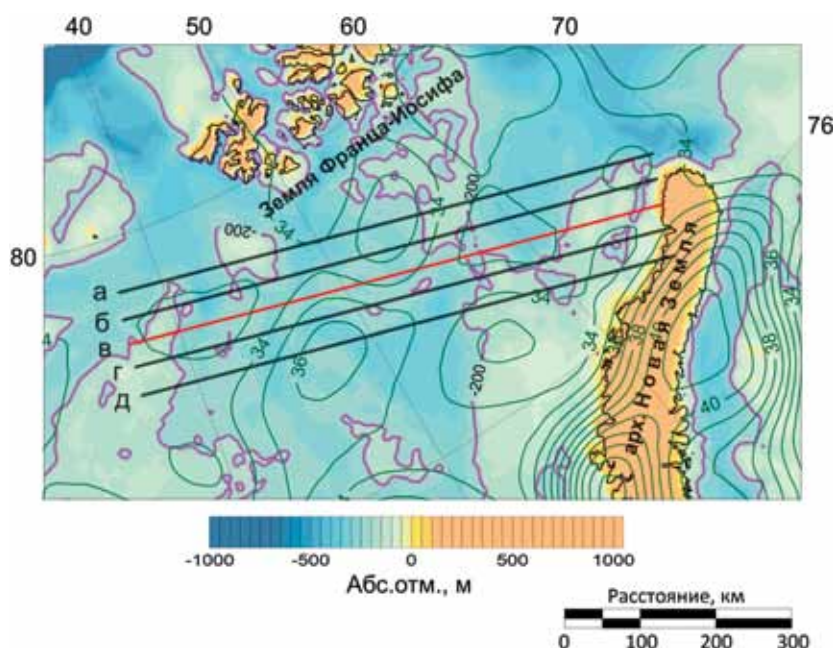
1 – North Pole; 2 – contour of the Central Arctic Basalt area of distribution of basalts from the Cretaceous igneous province (Morozov et al., 2013); 3 – the depth contour digitized –200 m; 4 – lines B–B and C–C, determine the planned position of the reference sections in Figs 7 and 9. I – Nansen basin, II – Gakkell' ridge, III – Amundsen basin, IV – Lomonosov ridge, V – Alpha ridge, VI – Mendeleev ridge, VII – Canadian basin, VIII – Chukchi Plateau, IX – Makarov basin, X – the Submariners basin. Islands: 1 – Arch. Svalbard, 2 – Vaigach, 3 – Arch. Novaya Zemlya, 4 – Franz Josef Land, 5 – Arch. Severnaya Zemlya, 6 – Novosibirsk and De Long Islands, 7 – Wrangel Island, 8 – Greenland, 9 – Canadian Arctic Islands.

Мохо. Так, на разрезе “а” в интервале 400–500 км положительной аномалией отображается приподнятая структура Мохо с амплитудой порядка 2 км.

Определенные по программе ПОЛЮС источники (синие точки) попадают преимущественно в область впадин. В общем случае положительные и от-

рицательные аномалии на разрезах существенно видоизменяются морфологически и по интенсивности.

Таким образом, на вертикальных разрезах (см. рис. 7 и 8) положительные гравитационные аномалии совмещаются с приподнятыми участками поверхности шельфа и коррелируют с поверхностью Мохо.



**Рис. 7.** Схема расположения профилей (линии “а”–“д”) на акватории Северо-Баренцевской впадины. Изолинии глубин раздела Мохо обозначены зеленым цветом, изобата –200 м – сиреневым.

**Fig. 7.** The layout of the profiles (lines “a”–“d”) in the water area of the North Barents Depression. Isolines of the depths of the Moho section are indicated in green, the isobath –200 m is drawn in lilac.

На рис. 9 приведена батиметрическая карта (фрагмент) глубин акватории Северного Ледовитого океана. Изолиния с отметкой –200 м, “сопровождаемая” линейной положительной аномалией гравитационного поля (см. рис. 6 и 10), отмечает материковый склон шельфа, характеризуя границу между континентом и бассейном океана. Здесь же представлено положение профилей “а”–“г”, по которым построены разрезы трехмерной диаграммы гравитационного поля.

На эталонном разрезе “б” (см. рис. 10) выделены положительные аномалии 1–7 и отрицательные 8–13. Эти аномалии на основании ряда ведущих признаков, главным образом учета скоростной модели, обусловлены морфологическими изменениями границы Мохо. Определение локализации аномальных источников является неотъемлемым результатом применения гравиметрического метода в отличие от многих других геофизических методов, что, естественно, имеет положительные и отрицательные стороны. В качестве последних имеется в виду изучение слоистой геологической среды, что требует применения дополнительных приемов обработки и интерпретации первичных данных (Бычков, 2010).

Выделяемые по линии “б” изолированные аномалии 4–7 достигают в аномальном гравитационном поле амплитуды порядка 20 мГал, их источники с высокой вероятностью обусловлены границей Мохо. Не представляет затруднения просле-

дить морфологическую изменчивость и амплитуду этих аномалий от профиля к профилю.

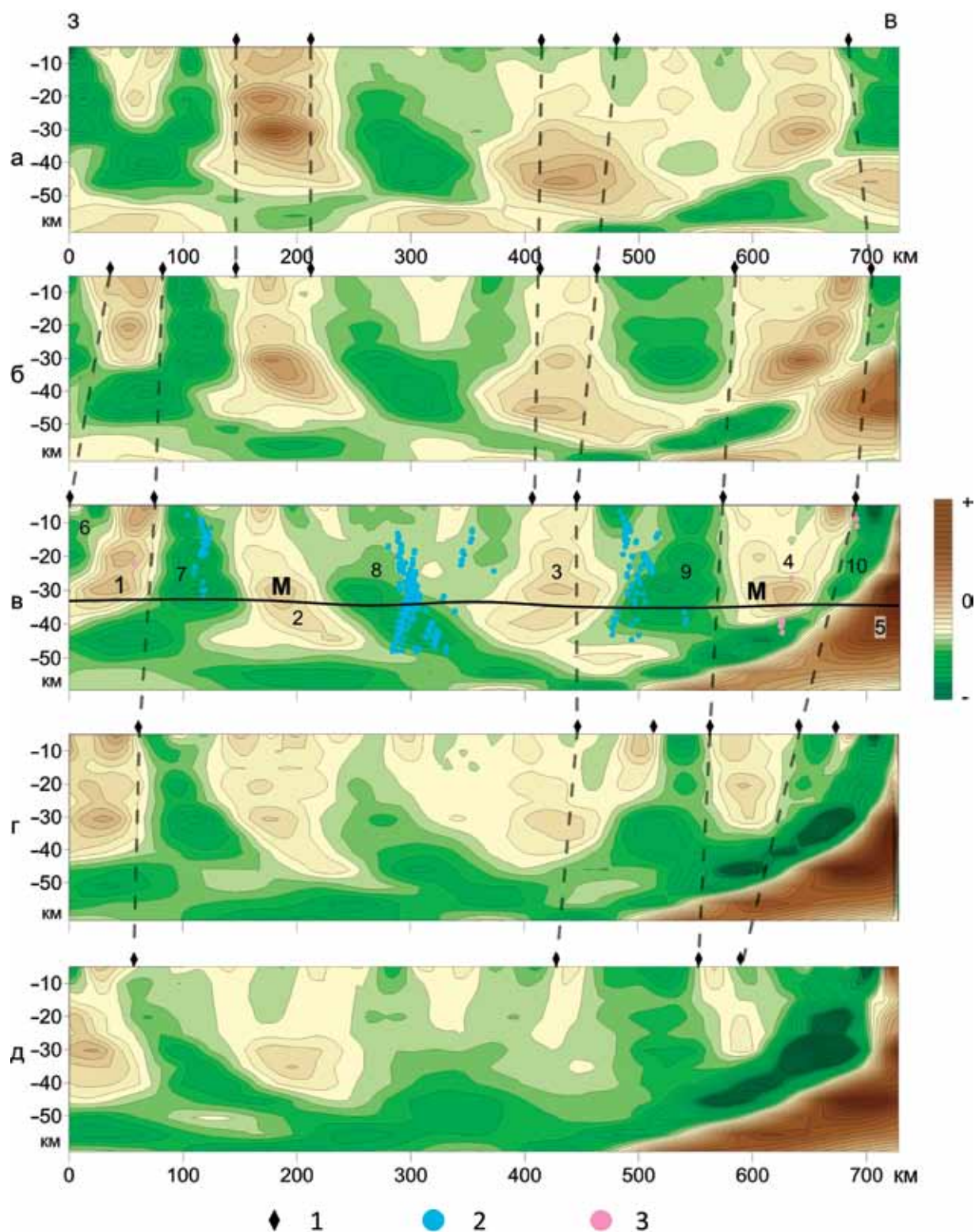
На всех профилях отчетливо проявляется граница – бровка шельфа между поднятием Де-Лонга и котловиной Подводников. Поднятие Де-Лонга – обширный блок кристаллического фундамента архейско-протерозойской консолидации.

Сложным аномальным полем характеризуются котловины Подводников и Макарова в общей структуре земной коры.

Аномалия 3 на разрезе “б” (см. рис. 10) проинтерпретирована по монтажному методу (Долгаль, 1999) с использованием конечноэлементных представлений источников поля (элементов замощения). В итоге вычислений с аномальной плотностью 0.3 г/см<sup>3</sup> получен контур источника (изображен красным четырехугольником в пределах аномалии 1 на рис. 10), верхняя граница которого находится примерно на уровне 15 км, нижняя – на уровне 50 км.

Ориентируясь на аномалию 3, естественно считать, что аномалии 4–7 также занимают положение в нижней части коры.

Положительные геоформы раздела Мохо и приподнятые участки поверхности шельфа соответствуют положительным аномалиям трансформированного в системе ВЕКТОР гравитационного поля. Обнаруженные закономерности могут использоваться при картировании поверхности Мохо.

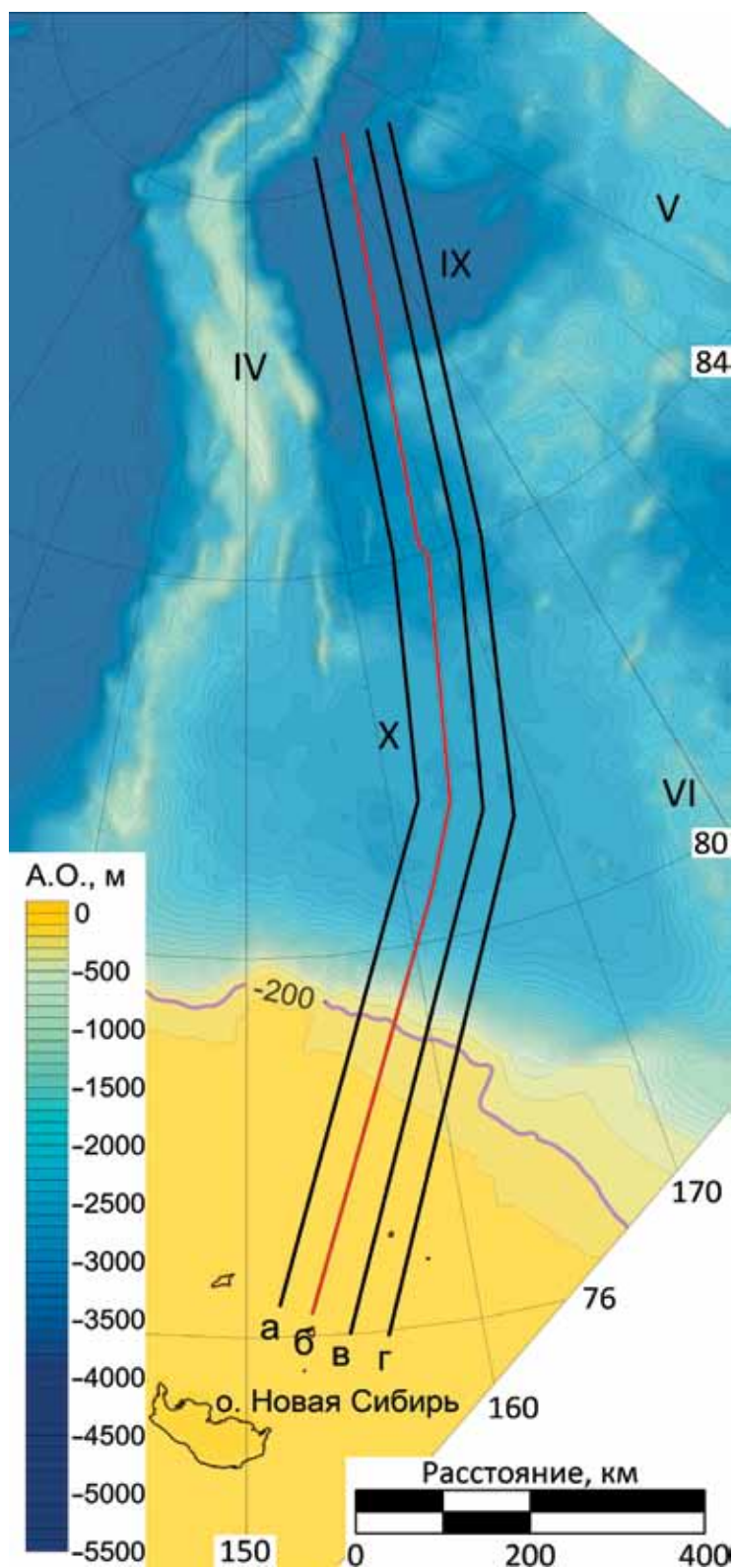


**Рис. 8.** Вертикальные разрезы в системе ВЕКТОР по линиям, изображенным на рис. 7.

Ромбиком обозначены местоположения отметки –200 м рельефа дна (поднятия) (Chadaev et al., 2019). 1 – бровка шельфа, 2 – отрицательный полюс, 3 – положительный полюс. Остальные пояснения см. в тексте.

**Fig. 8.** Vertical sections in the VECTOR system along the lines shown in Fig. 7.

The “diamond” figure indicates the locations of the –200 m mark of the bottom relief (hill) (Chadaev et al., 2019). 1 – shelf edge, 2 – negative pole, 3 – positive pole. See text for other explanations.



**Рис. 9.** Схема расположения профилей сечения гравитационного поля в системе ВЕКТОР на фоне карты глубин океана. а – линия западного профиля, б – эталонный профиль, в, г – восточные линии. Усл. обозначения – см. рис. 6.

**Fig. 9.** The layout of the gravity field cross-section profiles in the VECTOR system with the background of the ocean depth map. а – the line of the western profile, б – the reference profile, в, г – the eastern lines. The legend – see Fig. 6.

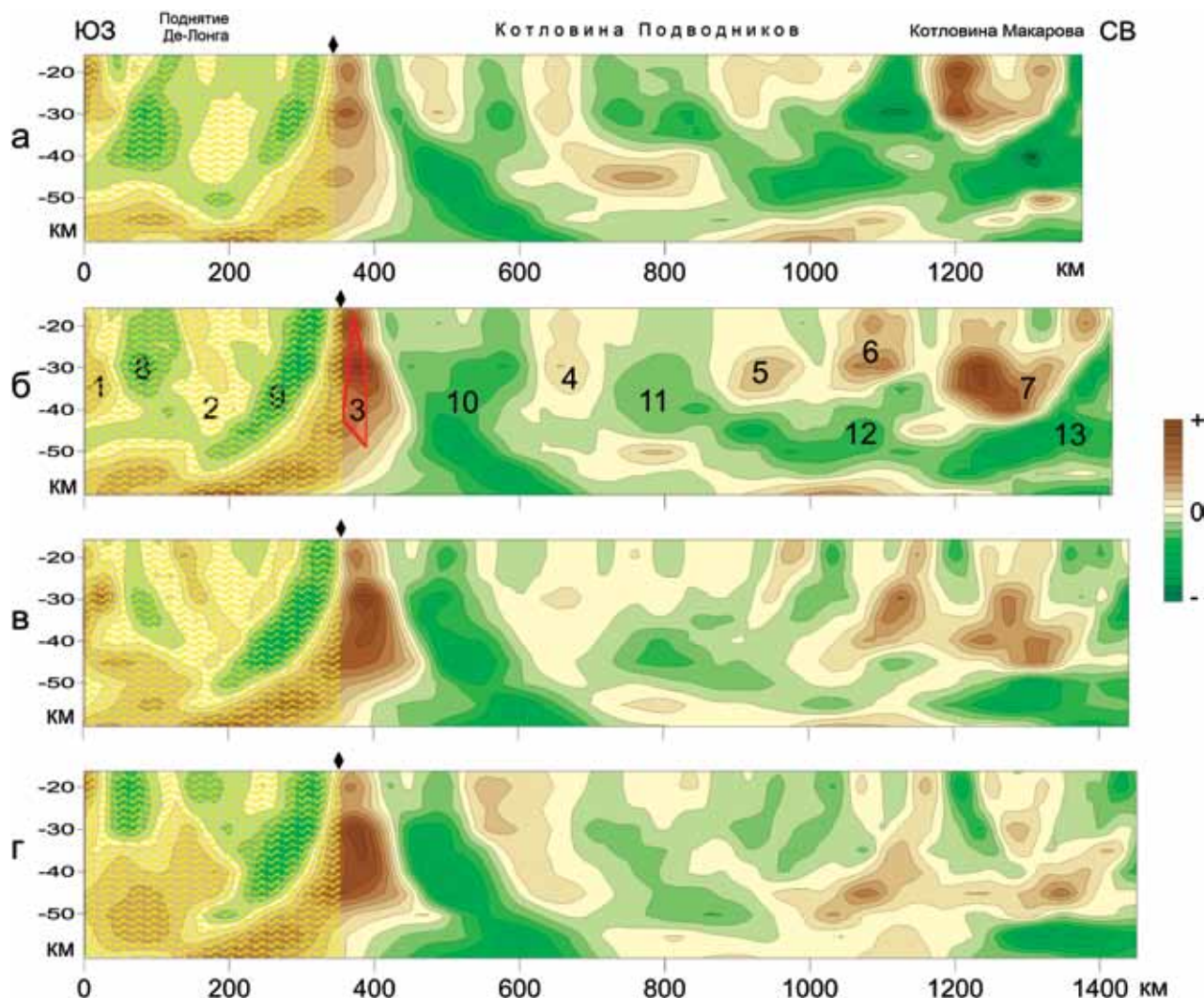


Рис. 10. Вертикальные разрезы в системе ВЕКТОР по линиям “а”–“г”.

Положение линий показано на рис. 9. Красный четырехугольник – аномалиеобразующий объект, выявленный в пределах аномалии 3. Остальные пояснения см. в тексте.

Fig. 10. Vertical sections in the VECTOR system along the lines “a”–“г”.

The position of the lines is shown in Fig. 9. The red quadrangle is an anomaly forming object identified within anomaly 3. See text for other explanations.

При этом распространение морфологии континентальных (в пределах суши) аномалий на морскую часть (хр. Ломоносова, поднятия Менделеева и Альфа) свидетельствует о принадлежности структурного элемента морского дна к континентальному шельфу.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Гравиметрические глобальные модели Мохо используются совместно с другими методами для решения задачи по разграничению шельфа между государствами-претендентами. При этом требуется

дать заключение о типе коры, установить ее вещественный состав и мощность, оценить результаты проявления магматической деятельности и факторы, приводящие к образованию и размещению рудных и углеводородных полезных ископаемых, указать особенности преобразования земной коры.

Основной объем исследований в настоящей работе основан на результатах гравиметрического метода. Интерпретационный процесс построен на применении системы ВЕКТОР, позволяющей создать куб данных, оценить взаимоположение структурных форм и выполнить содержательную геологическую интерпретацию.

Полученные с применением способа ВЕКТОР гравиметрические и магнитные построения были протестированы с помощью глобальной сейсмической модели European Moho. Положительные формы раздела Мохо и приподнятые участки поверхности шельфа соответствуют положительным аномалиям трансформированного в системе ВЕКТОР гравитационного поля. Найденные закономерности вносят вклад в картирование поверхности Мохо.

Интересно также отметить, что морфологической характеристикой трансформированного поля в пределах контура Центрально-Арктического ареала распространения базальтов меловой магматической провинции и южнее является относительно низкая амплитуда аномалий. Поля данного типа характерны для ареала в окружении Новосибирских островов, о-ва Врангеля и на суше в районе Певек–Анадырь, что косвенно подтверждает принадлежность поднятий Менделеева и Альфа к структурам, имеющим континентальную кору.

Таким образом, модели земной коры с использованием данных гравиметрии позволяют решать достаточно сложные геологические задачи, в том числе картирование границы Мохо на больших территориях, и оперировать данными, полученными с применением спутников.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Бычков С.Г. (2010) Методы обработки и интерпретации гравиметрических наблюдений при решении задач нефтегазовой геологии. Екатеринбург: УрО РАН, 188 с.
- Глазнев В.Н., Минц М.В., Муравина О.М. (2016) Плотностное моделирование земной коры центральной части Восточно-Европейской платформы. *Вестн. КРАУНЦ. Науки о Земле*, **29**(1), 53–62.
- Губайдуллин М.Г., Онякова А.М. (2020) Физико-геологическая модель Мезенского гравитационного максимума. *Теория и практика разведочной и промышленной геофизики*. Пермь, 84–91.
- Додин Д.А. (2015) Устойчивое развитие Арктики. (Проблемы и перспективы). СПб.: Наука, 283 с.
- Долгалъ А.С. (1999) Аппроксимация геопотенциальных полей эквивалентными источниками при решении практических задач. *Геофиз. журнал*, **21**(4), 71–80.
- Йодер Г.С., Тилли К.Э. (1965) Происхождение базальтовых магм. (Результаты экспериментального изучения природных образований и синтетических систем). Пер. с англ. М.: Мир, 248 с.
- Кашубин С.Н., Павленкова Н.И., Петров О.В., Мильштейн Е.Д., Шокальский С.П., Эринчек Ю.М. (2013) Типы земной коры Циркумполярной Арктики. *Регион. геология и металлогения*, **55**, 5–20.
- Кашубин С.Н., Петров О.В., Андросов Е.А., Морозов А.Ф., Каминский В.Д., Поселов В.А. (2011) Карта мощности земной коры Циркумполярной Арктики. *Регион. геология и металлогения*, **46**, 5–13.
- Кашубин С.Н., Петров О.В., Артемьева И.М., Морозов А.Ф., Вяткина Ю.С., Голышева Ю.С., Кашубина Т.В., Мильштейн Е.Д., Рыбалка А.В., Эринчек Ю.М., Сакулина Т.С., Крупнова Н.А. (2016) Глубинное строение земной земной коры и верхней мантии поднятия Менделеева по профилю ГСЗ Арктика-2012. *Регион. геология и металлогения*, **65**, 16–35.
- Лихачев А.П. (2013) Причины и условия существования магнитных и немагнитных полей земной коры, определяющих формирование и размещение месторождений золота, алмазов, нефти, газа и других полезных ископаемых. *Отчет. геология*, (6), 40–50.
- Маловичко А.К. (1956) Методы аналитического продолжения аномалий силы тяжести и их приложения к задачам гравиразведки. М.: Гостоптехиздат, 160 с.
- Морозов А.Ф., Петров О.В., Шокальский С.П., Кашубин С.Н., Кременецкий А.А., Шкатов М.Ю., Каминский В.Д., Гусев Е.А., Грикуров Г.Э., Рекант П.В., Шевченко С.С., Сергеев С.А., Шатов В.В. (2013) Новые геологические данные, обосновывающие континентальную природу области Центрально-Арктических поднятий. *Регион. геология и металлогения*, **53**, 34–55.
- Новоселицкий В.М. (1965) К теории определения изменения плотности в горизонтальном пласте по аномалиям силы тяжести. *Изв. АН СССР, Физика Земли*, **5**, 25–32.
- Новоселицкий В.М., Кутин В.А., Чадаев М.С., Бычков С.Г., Простолупов Г.В., Антипин В.В. (2004) Программа интерпретации геопотенциальных полей методом векторного сканирования VECTOR: свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2004611611 от 01.07.2004 г. в Российском агентстве по патентам и товарным знакам.
- Проблемы геотомографии. (1997) Сб. науч. тр. ОИФЗ РАН. М.: Наука, 336 с.
- Простолупов Г.В., Новоселицкий В.М., Конешов В.Н., Щербинина Г.П. (2006) Об интерпретации гравитационного и магнитного полей на основе трансформации горизонтальных градиентов в системе “VECTOR”. *Физика Земли*, (6), 90–96.
- Простолупов Г.В., Тарантин М.В. (2013) Полярная трансформация производных гравитационного потенциала. *Геофизика*, (2), 13–18.
- Тарантин М.В. (2016) Технологическое развитие системы “Вектор”. *Стратегия и процессы освоения георесурсов*. Сб. науч. тр. Пермь, 147–149.
- Чадаев М.С., Костицын В.И., Ибламинов Р.Г., Гершанок В.А., Гершанок Л.А., Простолупов Г.В. (2011) Геологические структуры западного склона Северного и Среднего Урала по данным гравиметрии и магнитометрии. *Литосфера*, (6), 134–140.
- Чадаев М.С., Костицын В.И., Ибламинов Р.Г., Гершанок В.А., Простолупов Г.В., Тарантин М.В. (2016) Параметрические связи геофизических и геохимических полей в области прикладной геологии. Пермь: ПГНИУ, 100 с.
- Чадаев М.С., Костицын В.И., Ибламинов Р.Г., Гершанок В.А., Простолупов Г.В., Тарантин М.В. (2017) Возможности геофизических методов при изучении неоднородностей земной коры. Пермь: ПГНИУ, 136 с.
- Шаров Н.В. (2017) Литосфера Северной Европы по сейсмическим данным. Петрозаводск: Карельский НЦ РАН, 173 с.
- Grad M., Tiira T. and ESC Working Group (2009) The Moho depth map of the European Plate. *Geophys. J. Int.*, **176**, 279–292. DOI: 10.1111/j.1365-246X.2008.03919.x

- Chadaev M., Kostitsyn V., Gershanok V., Iblaminov R., Prostolupov G., Tarantin M. (2019) The Use of Gravimetry for Studying Shelf of the North Barents Basin. *Practical and Theoretical Aspects of Geological Interpretation of Gravitational, Magnetic and Electric Fields. Proceedings of the 45th Uspensky International Geophysical Seminar, Kazan, Russia. Springer Nature Switzerland AG*, 207-212. DOI: 10.1007/978-3-319-97670-9\_24
- Reguzzoni M., Sampietro D. and Sansò F. (2013) Global Moho from the combination of the CRUST2.0 model and GOCE data. *Geophys. J. Int.*, **195**(1), 222-237.
- Sjöberg L.E., Bagherbandi M. (2011) A method of estimating the Moho density contrast with a tentative application of EGM08 and CRUST2.0. *Acta Geophys.*, **59**(3), 502-525.
- Kashubin S.N., Pavlenkova N.I., Petrov O.V., Mil'shtein E.D., Shoka'lskii S.P., Erinchek Yu.M. (2013) Types of the Earth's crust of the Circumpolar Arctic. *Region. Geol. Metallogeniya*, **55**, 5-20.
- Kashubin S.N., Petrov O.V., Androsova E.A., Morozov A.F., Kaminskii V.D., Poselov V.A. (2011) Map of the thickness of the Earth's crust of the Circumpolar Arctic. *Region. Geol. Metallogeniya*, **46**, 5-13.
- Kashubin S.N., Petrov O.V., Artem'eva I.M., Morozov A.F., Vyatkina Yu.S., Golysheva Yu.S., Kashubina T.V., Mil'shtein E.D., Rybalka A.V., Erinchek Yu.M., Sakulina T.S., Krupnova N.A. (2016) The deep structure of the Earth's crust and the upper mantle of the Mendeleev ridge according to the profile of the Arctic 2012 GSS. *Region. Geol. Metallogeniya*, **65**, 16-35.
- Likhachev A.P. (2013) Causes and conditions for the existence of magnetic and non-magnetic fields of the earth's crust, which determine the formation and distribution of deposits of gold, diamonds, oil, gas and other minerals. *Otech. Geol.*, (6), 40-50.
- Malovichko A.K. (1956) Methods of analytical continuation of gravity anomalies and their applications to gravity exploration problems. Moscow, Gostoptehizdat Publ., 160 p.
- Morozov A.F., Petrov O.V., Shoka'lskii S.P., Kashubin S.N., Kremenetskii A.A., Shkatov M.Yu., Kaminskii V.D., Gusev E.A., Griukurov G.E., Rekant P.V., Shevchenko S.S., Sergeev S.A., Shatov V.V. (2013) New geological data substantiating the continental nature of the Central Arctic uplift area. *Region. Geol. Metallogeniya*, **53**, 34-55.
- Novoselitskii V.M. (1965) On the theory of determining density changes in a horizontal formation by gravity anomalies. *Izv. AN SSSR, Fizika Zemli*, **5**, 25-32.
- Novoselitskii V.M., Kutin V.A., Chadaev M.S., Bychkov S.G., Prostolupov G.V., Antipin V.V. (2004) Program for interpretation of geopotential fields by vector scanning method VECTOR: certificate of official registration computer programs No. 2004611611 dated July 1, 2004 in the Russian Agency for Patents and Trademarks.
- Problems of geotomography. (1997) Collection of scientific papers. OIFZ RAN. Moscow, Nauka Publ., 336 p.
- Prostolupov G.V., Novoselitsky V.M., Koneshov V.N., Shcherbinina G.P. (2006) On the interpretation of gravitational and magnetic fields based on the transformation of horizontal gradients in the "VECTOR" system. *Physics of the Earth*, (6), 90-96.
- Prostolupov G.V., Tarantin M.V. (2013) Polar transformation of gravitational potential derivatives. *Geophysics*, (2), 13-18.
- Reguzzoni M., Sampietro D. and Sansò F. (2013) Global Moho from the combination of the CRUST2.0 model and GOCE data. *Geophys. J. Int.*, **195** (1), 222-237.
- Sharov N.V. (2017) Lithosphere of Northern Europe according to seismic data. Petrozavodsk: Karelian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, 173 p.
- Sjöberg L.E., Bagherbandi M. (2011) A method of estimating the Moho density contrast with a tentative application of EGM08 and CRUST2.0. *Acta Geophys.*, **59**(3), 502-525.
- Tarantin M.V. (2016) Technological development of the Vector system. Strategy and processes of development of geo-resources. Collection of scientific papers. Perm, GI UrO RAN, 147-149.
- Bychkov S.G. (2010) Methods of processing and interpretation of gravimetric observations in solving problems of oil and gas geology. Ekaterinburg, UB RAS, 188 p.
- Chadaev M., Kostitsyn V., Gershanok V., Iblaminov R., Prostolupov G., Tarantin M. (2019) The Use of Gravimetry for Studying Shelf of the North Barents Basin. *Practical and Theoretical Aspects of Geological Interpretation of Gravitational, Magnetic and Electric Fields. Proceedings of the 45th Uspensky International Geophysical Seminar, Kazan, Russia. Springer Nature Switzerland AG*, 207-212. DOI: 10.1007/978-3-319-97670-9\_24.
- Chadaev M.S., Kostitsyn V.I., Iblaminov R.G., Gershanok V.A., Gershanok L.A., Prostolupov G.V. (2011) Geological structures of the western slope of the Northern and Middle Urals according to gravimetry and magnetometry. *Lithosphere (Russia)*, (6), 134-140.
- Chadaev M.S., Kostitsyn V.I., Iblaminov R.G., Gershanok V.A., Prostolupov G.V., Tarantin M.V. (2016) Parametric connections of geophysical and geochemical fields in the field of applied geology. Perm, PGNIU, 100 p.
- Chadaev M.S., Kostitsyn V.I., Iblaminov R.G., Gershanok V.A., Prostolupov G.V., Tarantin M.V. (2017) The possibilities of geophysical methods in the study of inhomogeneities of the Earth's crust. Perm, PGNIU, 136 p.
- Dodin D.A. (2015) Sustainable development of the Arctic. (Problems and prospects). St.Petersburg, Nauka Publ., 283 p.
- Dolgal' A.S. (1999) Approximation of geopotential fields by equivalent sources in solving practical problems. *Geofiz. Zhurn.*, **21**(4), 71-80.
- Glaznev V.N., Mints M.V., Muravina O.M. (2016) Density modeling of the Earth's crust of the central part of the East European Platform. *Vestnik KRAUNTS. Nauki o Zemle*, **29**(1), 53-62.
- Grad M., Tiira T. and ESC Working Group (2009) The Moho depth map of the European Plate. *Geophys. J. Int.*, **176**, 279-292. DOI: 10.1111/j.1365-246X.2008.03919.x
- Gubaidullin M.G., Onyakova A.M. (2020) Physico-geological model of the Mezen gravitational maximum. *Theory and practice of exploration and field geophysics*. Perm, 84-91.
- Ioder G.S., Tiller K.E. (1965) The origin of basalt magmas. (Results of experimental study of natural formations and synthetic systems). Translated from the English. Moscow, Mir Publ., 248 p.