

УДК 550.831+551.241

DOI:10.7242/echo.2022.2.16

## ПРИМЕНЕНИЕ ГРАВИМЕТРИИ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ЗЕМНОЙ КОРЫ

М.С. Чадаев

*Горный институт УрО РАН, г. Пермь*

**Аннотация:** Исследования ориентированы на картирование границы Мохо и отсюда установление мощности и типа земной коры, необходимых для обоснования внешней границы континентального шельфа (ВГКШ). Обширный шельф и склон Арктического региона содержат богатые залежи нефти и природного газа, месторождения твердых полезных ископаемых. С разделом Мохо связано формирование структурно-вещественных и разломных форм верхней земной коры, проявление магматической и вулканогенной активности, участвующей в образовании и размещении рудных и углеводородных полезных ископаемых, смена основных пород ультраосновными, что обеспечивает аномальную плотность на границе порядка 0,2 - 0,3 г/см<sup>3</sup>. Наряду с геолого-геофизическими используются радиометрические, геохимические, геоморфологические, изотопные и другие методы. Путем изучения микроэлементов обсуждаются вопросы о первичном составе нефти, указывающем на участие продуктов мантийных процессов в генезисе нефти.

Основными геофизическими методами картирования служат сейсморазведка и гравиразведка. Работы получили широкую мировую известность. Разработан ряд новых сейсмических глобальных карт с использованием результатов гравиметрии в Австралии, США, Италии и других странах. Получили дальнейшее развитие технологии создания плотностных моделей литосферы путем последовательного решения прямой и обратной задач гравиметрии.

Автором при обработке гравиметрических данных применена система ВЕКТОР. Используются опубликованные геофизические и геологические данные, включая карту European Moho (28 N–86 N, 40 W–70 E), (2009).

**Ключевые слова:** ГСЗ, гравиметрия, ВЕКТОР, земная кора, граница Мохо, Фенноскандинавский щит, Северный Ледовитый океан, нефтегазовый пояс.

### ФЕННОСКАНДИНАВСКИЙ ЩИТ

Внешняя граница Фенноскандинавского щита, включая Кольский полуостров, контролируется гравитационными аномалиями. Осадочные образования имеют небольшое распространение. Источником сведений о вещественном составе пород служат глубинные интрузии и донно-каменный материал. Петрофизическая граница Мохо, разделяющая земную кору и верхнюю мантию Земли, рядом исследователей характеризуется фазовым переходом вещества пород верхней мантии. В ряде случаев поверхность рассматривается как изостатическая. Используется [10, 11] комплекс гравиметрических, сейсмических, магнитных и других параметрических данных, а также учитываются изотопно-геохимические критерии.

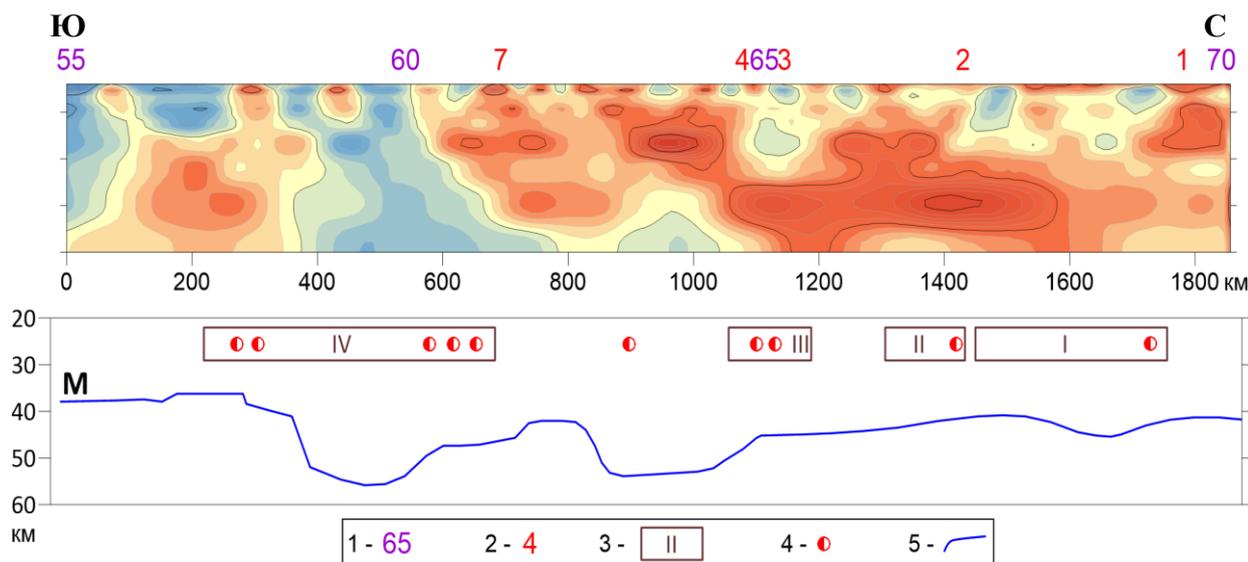
Вместе с тем изучение земной коры в пределах щита представляет определенные трудности [10], связанные со сложным геологическим строением и в ряде случаев с большой глубиной залегания раздела Мохо, с водными преградами.

#### *Глубинные профили*

На рис. 1 (вверху) приведен сканированный (плоскостной) гравиметрический разрез, полученный в системе ВЕКТОР.

На разрезе *вверху* отчетливо отражается (рис. 1) массивность строения изверженных пород разной плотности щита. Блоки пониженной плотности пород обусловлены пониженной плотностью преимущественно гранитных блоков пород.

*Внизу* рисунка дан профиль границы Мохо по геотраверсу. Впадина (примерно между пикетами 400-800 км) граничит здесь с западным берегом Балтийского моря. Приподнятое положение границы Мохо (пикеты 1100-1600 км) занимает северная часть щита.



**Рис. 1.** Глубинный гравиметрический разрез в системе ВЕКТОР (вверху) и профиль глубины до поверхности Мохо по геотраверсу Европейский 1 («Феннолора») в пределах Фенноскандинавского щита.

1 – отметка широты среза; 2 – пересечение срезов [11]; 3 – золоторудные зоны (пояса); 4 – золоторудные месторождения; 5 – граница Мохо [12] по профилю «Феннолора»

## БАРЕНЦЕВО МОРЕ

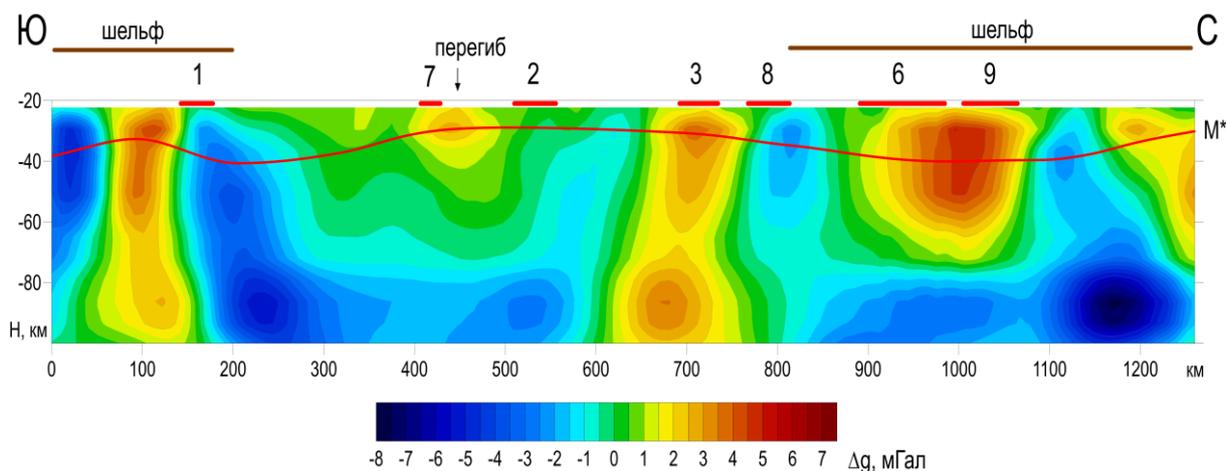
На рис. 2 приведен разрез через известные локальные поднятия и нефтегазовые месторождения в Баренцевом море. Нетрудно заметить, что изображенные на рис. 1 и рис. 2 глубинные разрезы различаются по своему геологическому строению, что характеризует достаточно высокую разрешимость метода ВЕКТОР по плотности при изучении глубинного строения Земли. Приподнятые участки Мохо (поднятия) проявляются положительным аномалиям с амплитудой порядка 2-4 мГал и более, а пониженные (впадины) – отрицательными значениями. Местоположение глубинной отрицательной аномалии (синий цвет) южнее широты  $60^\circ$  в.д. соотносится с акваторией Боснийского залива.

Шельф Баренцева и Карского морей – молодая нефтегазоносная провинция. Континентальный шельф и склон Арктического региона содержат богатые залежи нефти и природного газа, месторождения твердых полезных ископаемых.

На морском разрезе фиксируются в виде даек поднятия изверженных пород на шельфе: области Мурманской, Арктической, Штокмановской.

Аномалии в области Мурманской и Лудловской структур, имеют заложение в верхней мантии. Интенсивная округлой формы аномалия в районе Адмиралтейской и Пахтусовской (Адмиралтейский вал) обусловлена внутрикоровыми источниками изверженных пород типа базальтов.

В районе Мурманской, Арктической, Штокмановской структур глубина до поверхности Мохо составляет примерно 36 км. Севернее в пределах изобаты 200 м (область шельфа в интервалах Шахмановской и Крестовской структур) граница Мохо характеризуется повышенным положением; Лудловское локальное поднятие соответствует наиболее высокому положению границы Мохо (рис. 2). Местоположение Адмиралтейского поднятия характеризуется погружением мантийного слоя. Интенсивная положительная «бескорневая» гравиметрическая региональная аномалия здесь обусловлена в основном выступом архейско-протерозойского кристаллического фундамента.



**Рис. 2.** Вертикальный разрез гравитационного поля в системе ВЕКТОР.

Структуры: 1 – Мурманская, 2 – Штокмановская, 3 – Лудловская, 8 – Крестовская, 6 – Адмиралтейская, 7 – Арктическая, 9 – Пахтусовская.

M\* – рельеф границы Мохо (прогноз). «Перегиб» – изгиб линии разреза

Мантийное заложение на юго-западе (Мурманское поднятие) и на северо-востоке (Адмиралтейское и Пахтусовское поднятия) имеют источники [11], связанные со складчатыми основаниями соответственно Кольского и Адмиралтейского выступов. Пространство между выступами занимает известный Южно-Баренцевский рифт, заполненный образованиями, которые формируют отрицательную аномалию в системе ВЕКТОР. Таким образом на фоне общего аномального фона отчетливо проявляются базальтовые интрузии (пикеты 100, 450, 700 и 1000 км).

Ниже глубины 80 км на разрезе (рис. 2) аномальное поле в системе ВЕКТОР характеризуется интенсивным отрицательным слоем, который может рассматриваться по классификации В.Е Хаина как астеносферный.

Система ВЕКТОР, относимая к геотомографическим методам обработки потенциальных полей, основана на осреднении горизонтальных градиентов силы тяжести и создании трехмерного интерпретационного куба, на котором можно получить срезы по заданным направлениям. Соответствующая программа обработки данных апробирована, результаты помещены в работах [1, 10, 11, 12] при решении ряда геологоразведочных задач, в том числе глубинного изучения земной коры.

Аномалии в области Мурманской и Лудловской структур имеют заложение в верхней мантии. Интенсивная округлой формы аномалия в районе Адмиралтейской и Пахтусовской (Адмиралтейский вал) обусловлена внутрикоровыми источниками изверженных пород типа базальтов. Этот факт свидетельствует о глубинном основании структур.

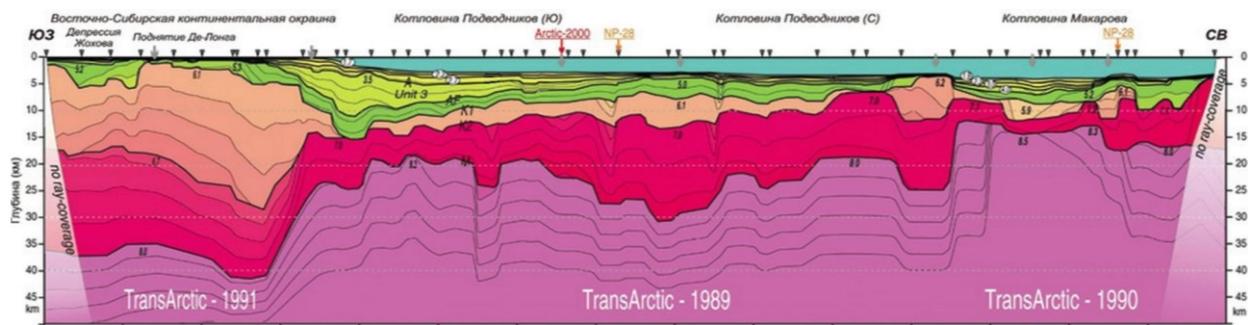
В районе Мурманской, Арктической, Штокмановской структур глубина до поверхности Мохо составляет примерно 36 км. Севернее в пределах изобаты 200 м (область шельфа) структуры Штокмановская и Крестовская характеризуются повышенным положением границы Мохо, а Лудловское локальное поднятие соответствует наиболее высокому положению границы Мохо (рис. 2). Местоположение Адмиралтейского поднятия характеризуется погружением мантийного слоя. Интенсивная положительная «бескорневая» гравиметрическая региональная аномалия здесь обусловлена в основном выступом архейско-протерозойского кристаллического фундамента.

Интенсивные положительные аномалии мантийного заложения на юго-западе (Мурманское поднятие) и на северо-востоке (Адмиралтейское и Пахтусовское под-

нения) имеют источники [11], связанные со складчатыми основаниями, соответственно, Кольского и Адмиралтейского выступов. Пространство между выступами занимает известный Южно-Баренцевский рифт, заполненный образованиями, которые формируют отрицательную аномалию в системе ВЕКТОР. На фоне общего аномального фона отчетливо проявляются базальтовые интрузии (пикеты 100, 450, 700 и 1000 км). Ниже глубины 80 км на разрезе (рис. 2) аномальное поле в системе ВЕКТОР характеризуется интенсивным отрицательным слоем, который может рассматриваться в версии В.Е Хаина как астеносферный. В итоге возможно получить представление о глубинном структурном ряде.

### СЕВЕРНЫЙ ЛЕДОВИТЫЙ ОКЕАН

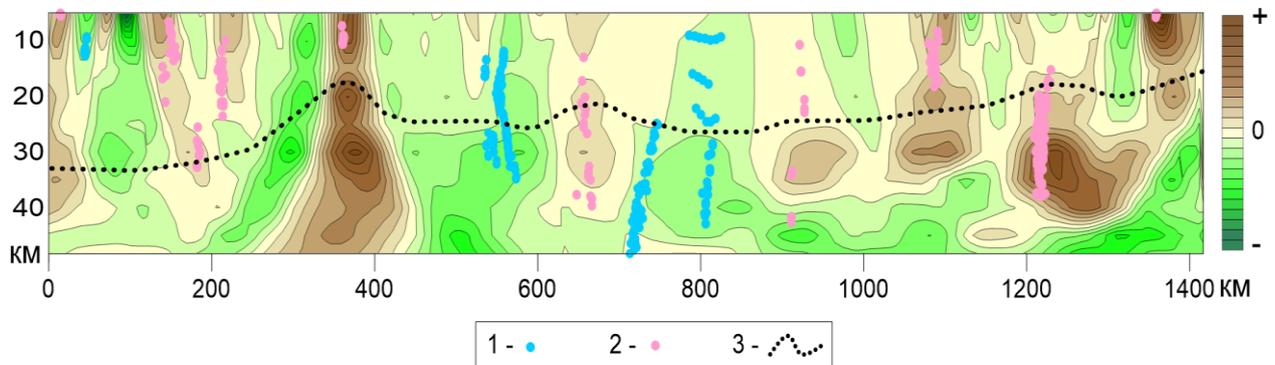
На рис. 3 приведена скоростная модель земной коры и верхней мантии по геотраверсу Трансарктика 1989-1991, заимствованная из работы [7].



**Рис. 3.** Скоростная модель земной коры и верхней мантии по геотраверсу [7].

Утолщенные линии – сейсмические границы, разделяющие слои,  
тонкие линии – изолинии скорости с интервалом 0,1 км/с, треугольники – пункты взрыва

Скоростной разрез земной коры (рис. 3) визуальнo сопоставлен с разрезом в системе ВЕКТОР (рис. 4) то есть, по сути, с плотностным. Дополнительно на разрез выведены гравитационные аномалии, полученные в системе ПОЛЮС, которые позволяют оценить положение по глубине: выше границы Мохо или до границы, что служит также определяющим фактором картирования границы в разрезе. Малопротяженные субгоризонтальные границы выше поверхности Мохо, создаваемые отрицательными, например, вблизи отметки 800 км, и положительными полюсами, характеризуют расслоение пород нижней земной коры.



**Рис. 4.** Вертикальный разрез 3D диаграммы ВЕКТОР, практически по линии скоростного разреза на рис. 3. Полюсы [9]: 1 – положительные, 2 – отрицательные. 3 – прогнозное положение границы Мохо по данным гравиметрии

## СПОСОБ СОЗДАНИЯ НАЧАЛЬНОЙ ИНТЕРПРЕТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ

Система ВЕКТОР, относимая к геотомографическим методам обработки потенциальных полей, основана на осреднении горизонтальных градиентов силы тяжести. Соответствующая программа апробирована [1, 10, 11, 12] при решении ряда геологоразведочных задач, в том числе глубинного изучения земной коры.

Для осуществления трудновыполнимой в ряде случаев задачи по привязке гравиметрической информации по глубине предложен способ, основанный на совместном использовании системы ВЕКТОР и программы решения обратной задачи гравиразведки способом подбора. В работе автором использована программа PODBOR\_ST, разработанная А.С. Долгалем [3].

Алгоритм решения. На разрезе глубинного профиля составляется (двухмерный вариант) контур аномалии (рис. 5), в рамках которого решается задача подбора.

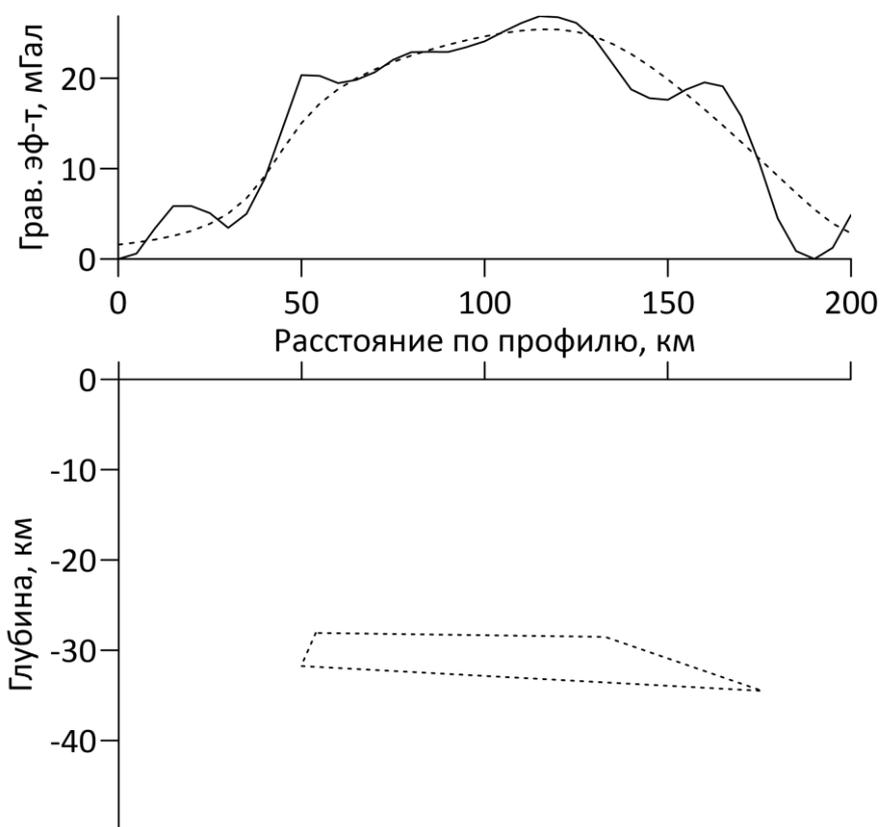


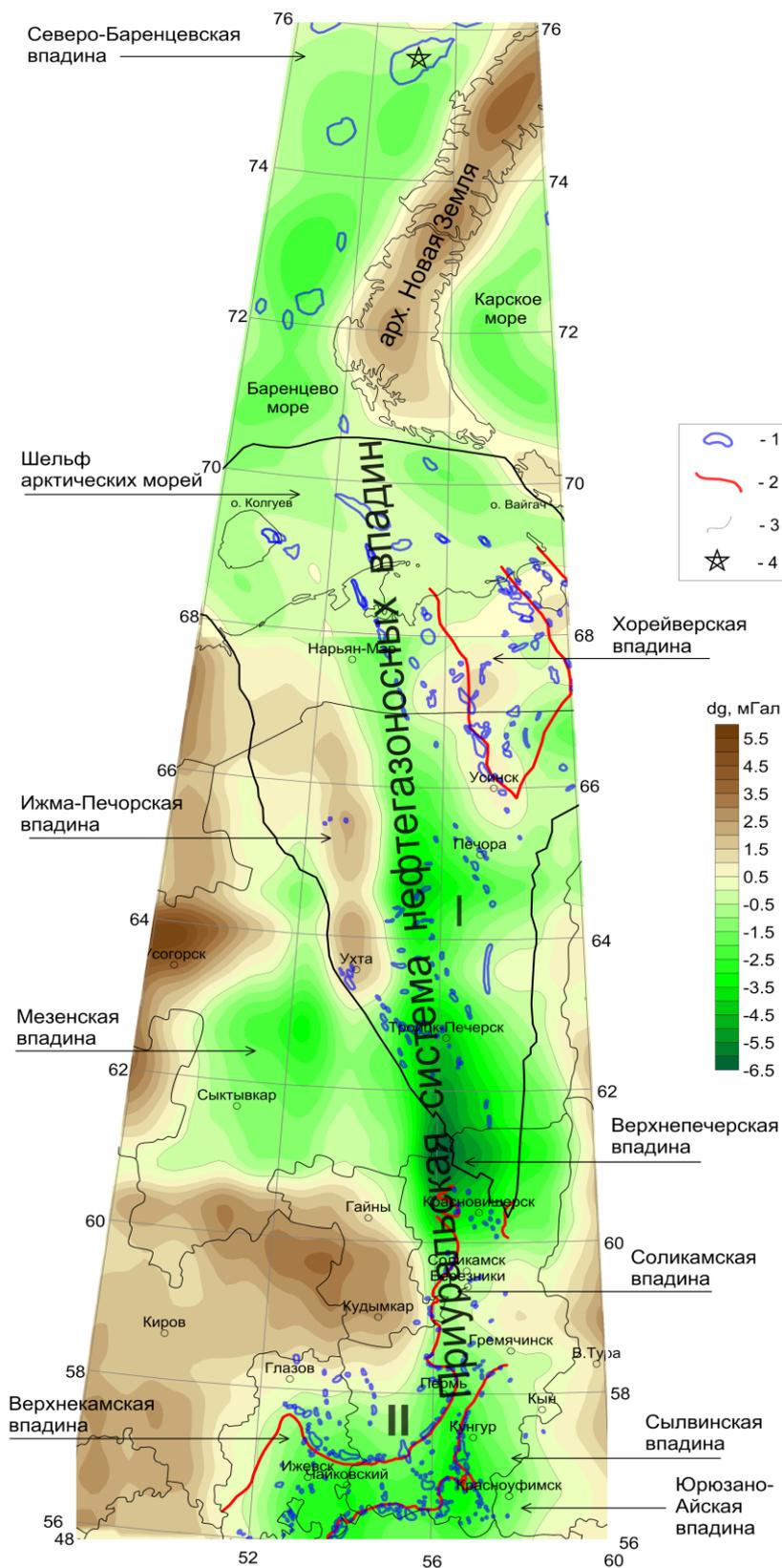
Рис. 5. Результат решения обратной задачи гравиразведки

График аномалий силы тяжести в редукции Буге (утолщенная линия) и рассчитанный график силы тяжести источника в рамках контура (тонкая линия) в системе ВЕКТОР. *Вверху.* Положение контура и собственно контур получены по данным системы ВЕКТОР. *Внизу.*

В результате решения получены положение и форма аномалиеобразующего тела заданного класса, наиболее точно описывающие наблюдения: принят четырехугольный контур (для двумерной постановки задачи) с дефектом плотности  $0,2 \text{ г/см}^3$ . Результат модельного подбора и исходное поле представлены на рис. 5; среднеквадратическая погрешность составила 3,16 мГал при общей амплитуде поля 26,8 мГал.

## НЕФТЕГАЗОВЫЙ ПОЯС ЗЕМЛИ

Нефтегазовые пояса относятся к семейству геологических систем регионального развития Земли [5].



**Рис. 6.** Трансформанта гравитационного поля ВЕКТОР, отражающая строение нижней коры. Обозначения: 1 – контуры локальных структур; 2 – граница Камско-Кинельской системы прогибов (ККСП); севернее г. Усинска находится нефтегазогеологическая область с месторождениями нефти и газа O<sub>2</sub>-D<sub>1</sub>; 3 – нулевая изолиния трансформанты; 4 – Адмиралтейское поднятие. I – Тимано-Печорская НГП, II – Волго-Уральская НГП

Вышеизложенное дает основание на уровне раздела Мохо (рис. 6) объединить нефтегазоносные бассейны, начиная с территории Пермского края и севернее вплоть до Земли Франца Иосифа, в одну простирающуюся в меридиональном направлении Приуральскую систему нефтегазоносных впадин, пространственно совмещенную с протяженной отрицательной гравитационной аномальной зоной на трансформанте в системе ВЕКТОР.

Для Русской плиты общность субмеридионального направления структурных форм «нарушает» обширный Коми-Пермяцкий свод, имеющий форму и простираение иные, чем по кристаллическому фундаменту. Здесь характерна сложная сеть глубинных разломов. Свод имеет глубинное заложение. Фиксируется пространственная закономерность общего планового совпадения структурных форм фундамента и нижних этажей земной коры.

## ВЫВОДЫ

Геохимические и изотопные корреляции указывают, что происхождение нефтяных залежей может быть связано с эндогенной активностью Земли, образование и формирование месторождений – с характером геодинамического развития и эволюцией литосферы, что вносит важный аспект в актуальную задачу изучения глубинного строения Земли: раздела между земной корой и верхней мантией и картирования магматических диапиров.

Анализ позволяет известные нефтегазоносные впадины в западной части ВЕП пространственно объединить с протяженной отрицательной гравитационной аномальной зоной на трансформанте в системе ВЕКТОР, что позволяет рассматривать их относящимися к единой Приуральской системе.

Для осуществления трудновыполнимой по ряду причин задачи привязки гравиметрического профиля по глубине предложен способ, основанный на совместном использовании системы ВЕКТОР, как и программы решения обратной задачи гравirazведки, например, способом подбора.

Начальную структурно-плотностную глубинную модель для решения обратной задачи гравirazведки рекомендуется создавать в системе ВЕКТОР, что позволяет получить сведения о глубине и форме аномалиеобразующего тела.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Бычков С.Г. Методы обработки и интерпретации гравиметрических наблюдений при решении задач нефтегазовой геологии / ГИ УрО РАН; отв. ред. В.И. Костицын. – Екатеринбург: УрО РАН, 2010. – 188 с.: ил.
2. Глазнев В.Н., Минц М.В., Муравина О.М. Плотностное моделирование земной коры центральной части Восточно-Европейской платформы // Вестн. КРАУНЦ. Сер. Науки о Земле. – 2016. – № 1 (29). – С. 53-63.
3. Долгаль А.С. Аппроксимация геопотенциальных полей эквивалентными источниками при решении практических задач // Геофизический журнал. – 1999. – Т. 21, № 4. – С. 71-80.
4. Доленко Г.Н. Геологические, геофизические и геохимические данные мантийного происхождения нефти и газа // Глубинная нефть. – 2013. – № 6. – С. 934-941.
5. Золоев К.К., Додин Д.А., Коротеев В.А., Рьльков С.А., Чернышев Н.М. Урал – крупнейшая провинция мировой системы подвижных поясов Земли и связанных с ними уникальных и суперкрупных месторождений полезных ископаемых // Литосфера. – 2007. – № 6. – С. 3-14.
6. Калинин М.К. Неорганическое происхождение нефти в свете современных данных. – М.: Недра, 1968. – 336 с.
7. Кашубин С.Н., Павленкова Н.И., Петров О.В., Мильштейн Е.Д., Шокальский С.П., Эринчек Ю.М. Типы земной коры Циркумполярной Арктики // Региональная геология и металлогения. – 2013. – № 55. – С. 5-20.

8. Маракушев А.А., Писоцкий Б.И., Панях Н.А., Готтих Р.П. Геохимическая специфика нефти и происхождение ее месторождений // Доклады РАН. – 2004. – Т. 398, № 6. – С. С. 795-799.
9. Простолупов Г.В., Тарантин М.В. Полярная трансформация производных гравитационного потенциала // Геофизика. – 2013. – № 2. – С. 13-18.
10. Чадаев М.С., Костицын В.И., Гершанок В.А., Ибламинов Р.Г., Тарантин М.В., Простолупов Г.В. Геолого-геофизические методы изучения земной коры: Монография / под общ. ред. М.С. Чадаева; ПГНИУ, ГИ УрО РАН. – Пермь, 2019. – 148 с.
11. Чадаев М.С., Костицын В.И., Гершанок В.А., Тарантин М.В., Простолупов Г.В. Геофизические исследования земной коры Европейского севера / под общ. ред. М.С. Чадаева; ПГНИУ, ГИ УрО РАН. – Пермь, 2020. – 99 с.
12. Шаров Н.В. Литосфера Северной Европы по сейсмическим данным. – Петрозаводск: Карельский науч. центр РАН, 2017. – 168 с.: ил.
13. Grad, M., Tiira, T. The Moho depth map of the European Plate // Geophysical journal international. – 2009. – V. 176, № 1. – С. 279-292. [https://doi: 10.1111/j.1365-246X.2008.03919.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2008.03919.x).