

Гравитационные аномалии юго-восточного Кавказа

Г.Р. Садыгова, 2020

Институт геологии и геофизики Национальной академии наук Азербайджана,
Баку, Азербайджан

Поступила 15 сентября 2019 г.

Вивчено гравітаційні аномалії збурювальних мас за значеннями спектра потужності і цифрової фільтрації гравітаційних даних. Обчислення спектра потужності й цифрову фільтрацію виконано з використанням перетворень Хартлея і фільтра Баттерворта. Обробка гравіметричних даних у частотній зоні дає змогу оцінити глибини аномалієутворювальних джерел за допомогою аналізу радіального спектра. Для визначення глибини залягання аномальних тіл логарифм спектра потужності графічно зображено залежно від просторової частоти. За кривою логарифма спектра потужності визначено низькочастотну і високочастотну зони та частоту зрізу. Частота зрізу, що відокремлює регіональну і локальну зони, визначено точкою перетину прямих, отриманих апроксимацією даних спектра потужності у довго- і короткохвильових зонах. Частота (хвильове число) зрізу в даному випадку дорівнює: $\omega_c = 0,16$ рад/км. Низькочастотні і високочастотні зони взято як зони регіональних та локальних аномалій. Нахил кривих зони вказує глибини аномалієутворювальних меж: у довгохвильовій — 16,6, а в короткохвильовій — 1,8 км. Глибина 16,6 км пов'язана з поверхнею кристалічного фундаменту, а 1,8 км — з поверхнею всередині кайнозойських відкладів. Добре узгодження отриманих результатів фільтрації гравіметричних даних Південно-Східного Кавказу з використанням трансформації Хартлея і одновимірного фільтра Баттерворта з результатами раніше проведених досліджень підтверджує її надійність. Інтерпретація регіональних аномалій показує, що ці аномалії залежать від геометрії кристалічного фундаменту.

Ключові слова: спектр потужності, перетворення Хартлея, гравітаційна аномалія, Південно-Східний Кавказ.

Введение. Одна из актуальных проблем гравиметрии — изучение локальных и региональных аномалий. Важными вопросами в исследовании гравитационных аномалий являются их моделирование и определение источников этих аномалий. Существует несколько математических методов, позволяющих создать модели аномалий. Как показано в работе [Duka, 1998], в настоящее время наилучшим методом служит гармоническое разложение на поверхности сферического сектора [Haines, 1990]. Для изучения природы гравитационных аномалий большое значение имеет представление аномальных полей

не только в пространственной, но и в частотной областях. Спектральному анализу аномальных полей посвящено много работ. Большой вклад в это направление внесен В.Н. Страховым [Страхов, 1997]. Следует особо выделить монографии С.А. Серкерова [Серкерова, 1991], А.А. Никитина [Никитин, 1986], В.И. Колесовой [Колесова, 1985], М. Бата [Бат, 1980], где приведены как теоретические, так и экспериментальные результаты спектрального анализа. Цель настоящей работы — проведение спектрального анализа аномального поля и использование спектральных результатов при оценке местоположения источников.

Обработка гравиметрических данных в частотной области позволяет оценить глубины аномалиеобразующих источников с помощью анализа радиального спектра [Spector, Grant, 1970; Серкеров, 1991; Blakeley, 1995; Кадиров, 2000; Kadirov, 2000a, б]. Кроме того, в частотной области легко произвести фильтрацию и другие аналитические продолжения гравитационного поля. Однако было бы логичным с действительными числами произвести действительные вычисления. В этой работе преобразование Хартли используется для анализа спектра мощности и фильтрования двумерных гравиметрических данных Юго-Восточного Кавказа. Преобразование Хартли [Hartley, 1942; Kadirov, 2000a] является функцией действительных переменных и последнее время часто используется для обработки геофизических данных. Преобразование Хартли — интегральное преобразование, подобное преобразованиям Фурье [Снеддон, 1955; Bracewell, 1986], и обладающее большинством его свойств.

Геологическое строение и гравитационное поле области исследований. Область исследования охватывает азербайджанскую часть Предкавказского мегасинклинория и юго-восточное окончание мегантиклинория Большого Кавказа. К азербайджанской части Предкавказского мегасинклинория условно можно отнести Гусар-Шабранский (Дивичинский) синклинорий, который одновременно является передовым прогибом, заполненным толщей (3—6 км) третичных пород, преимущественно глинами, известняками и мергелями. Внутри Гусар-Шабранского краевого прогиба разделены Хачмазская и Губинская структурные зоны. Этот синклинорий на юго-востоке расширяется и в средней части Каспийского моря разделяет эпигерцинскую платформу и юго-восточное продолжение центрального поднятия Большого Кавказа.

Юго-восточные окончания мегантиклинория Большого Кавказа ограничены на северо-востоке Сиазаньским, юго-западе Ленгебиз-Алятским, северо-западе Западно-Каспийским и юго-востоке Цент-

ральным Каспийским глубинными разломами и внутри зоны разделены Шамахы-Гобустанским прогибом, Абшеронской, Загатала-Говдагской и Шахдаг-Хызынской тектоническими зонами. В геологическом строении региона участвуют отложения от нижнеюрского до четвертичного возраста. Азербайджанская часть мегантиклинория Большого Кавказа и Предкавказского мегасинклинория состоит из трех тектонических элементов: северное крыло, центральное поднятие и южное крыло. Элементом северного крыла является Тенгинско-Бешбармакский антиклинорий. Центральная часть мегантиклинория в Азербайджане представлена Тфанским антиклинорием и Шахдаг-Хизинским синклинорием. Южное крыло представлено Загатала-Ковдакским синклинорием, а также Шеки-Вандамским антиклинорием, который на юго-востоке осложнен несколькими синклинориями и антиклинориями низшего порядка. С северо-запада на юго-восток Тфанский антиклинорий значительно сужается и погружается у берегов Северного Абшерона. В составе мегантиклинория входят также структурные элементы Гобустана и Абшеронского полуострова. Эти структурные элементы являются структурами южного крыла мегантиклинория [Кадиров, 2000; Геология ..., 2005]. На рис. 1. представлена тектоническая схема территории Азербайджанской Республики [Геологическая карта, 2008].

Схема распределение гравитационных аномалий области исследования в редукциях Буге представлена на рис. 2. Область исследований охватывает часть Восточно-Азербайджанского минимума, Прикаспийско-Губинского минимума и Азербайджанского максимума. На схеме гравитационного поля аномалий Буге Прикаспийско-Губинский гравитационный минимум охватывает северную и центральную часть региона. Гравитационный минимум составляет на севере –105 мГал и в центральной части –80 мГал. В южной части региона находится Восточно-Азербайджанский минимум. Здесь наблюдается гравитационный минимум с амплитудой –85 мГал.

Основные результаты исследования гравитационных аномалий освещены в работах [Кириллова и др., 1960; Гаджиев, 1965; Цимельзон, 1965; Амирасланов, 1978; Кадиров, 2000].

Теоретическая формулировка. Двумерное преобразование Хартли реальной функции $f(x, y)$ определяется выражением

$$H(u, v) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(x, y) \operatorname{cas}(ux) \operatorname{cas}(vy) dx dy, \quad (1)$$

где $\operatorname{cas}(ux) \operatorname{cas}(vy) = \cos(ux - vy) + \sin(ux + vy)$
Обратное преобразование имеет вид

$$f(x, y) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} H(u, v) \operatorname{cas}(ux) \operatorname{cas}(vy) dudv. \quad (2)$$

Преобразование Хартли можно записать в виде суммы четной и нечетной функций:

$$H(u, v) = E(u, v) + O(u, v).$$

Четная и нечетная функции соответственно вычисляются формулами

$$E(u, v) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(x, y) \cos(ux - vy) dx dy, \quad (3)$$

$$E(u, v) = \frac{H(u, v) + H(-u, v)}{2}, \quad (4)$$

$$O(u, v) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(x, y) \sin(ux - vy) dx dy, \quad (5)$$

$$O(u, v) = \frac{H(u, v) - H(-u, -v)}{2}, \quad (6)$$

где

$$H(-u, -v) =$$

$$= \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(x, y) \operatorname{cas}(-ux) \operatorname{cas}(-vy) dx dy. \quad (7)$$

Двумерные преобразования Хартли и Фурье взаимосвязаны следующими формулами [Bracewell, 1986; Saatchilar et al., 1990; Mohan, Anand, 1994]:

$$F(u, v) = E(u, v) - iO(u, v), \quad (8)$$

$$H(u, v) = \operatorname{Re}(u, v) - \operatorname{Im} F(u, v). \quad (9)$$

Амплитудный и фазовый спектры, вычисляемые с помощью преобразований Хартли и Фурье, являются физически и математически подобными, но различаются в числовой форме и спектры амплитуд этих преобразований дают одинаковую информацию.

Двумерное дискретное преобразование Хартли функции $f(x, y)$, заданное $(M_x N)$ -мерной матрицей согласно выражению (1), определено следующим образом [Sundararajan, 1995]:

$$H(v, v) = \frac{1}{MN} \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} f(x, y) \operatorname{cas}(ux) \operatorname{cas}(vy). \quad (10)$$

Обратное преобразование согласно (2) имеет вид

$$F(x, y) = \sum_{u=0}^{M-1} \sum_{v=0}^{N-1} H(u, v) \operatorname{cas}(ux) \operatorname{cas}(vy). \quad (11)$$

Вначале примем преобразование Хартли функции $f(x, y)$, равное $X(u, v)$ и имеющее вид

$$X(u, v) = \quad (12)$$

$$= \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} f(x, y) \operatorname{cas}\left(\frac{2\pi ux}{M}\right) \operatorname{cas}\left(\frac{2\pi vy}{N}\right).$$

Чтобы получить двумерное преобразование Хартли, обеспечивающее равенство коэффициентов двумерных преобразований Хартли и Фурье, результаты, полу-

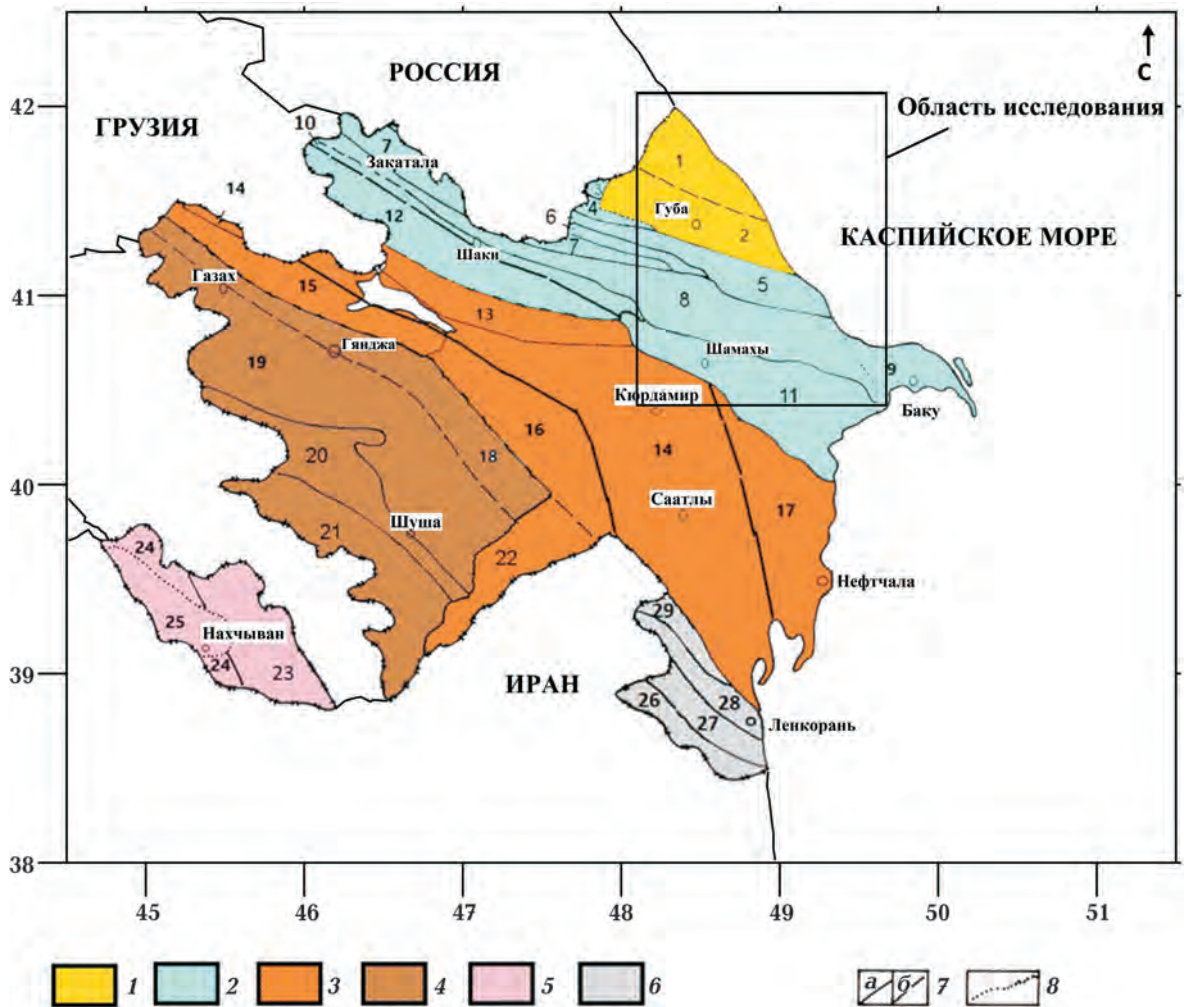
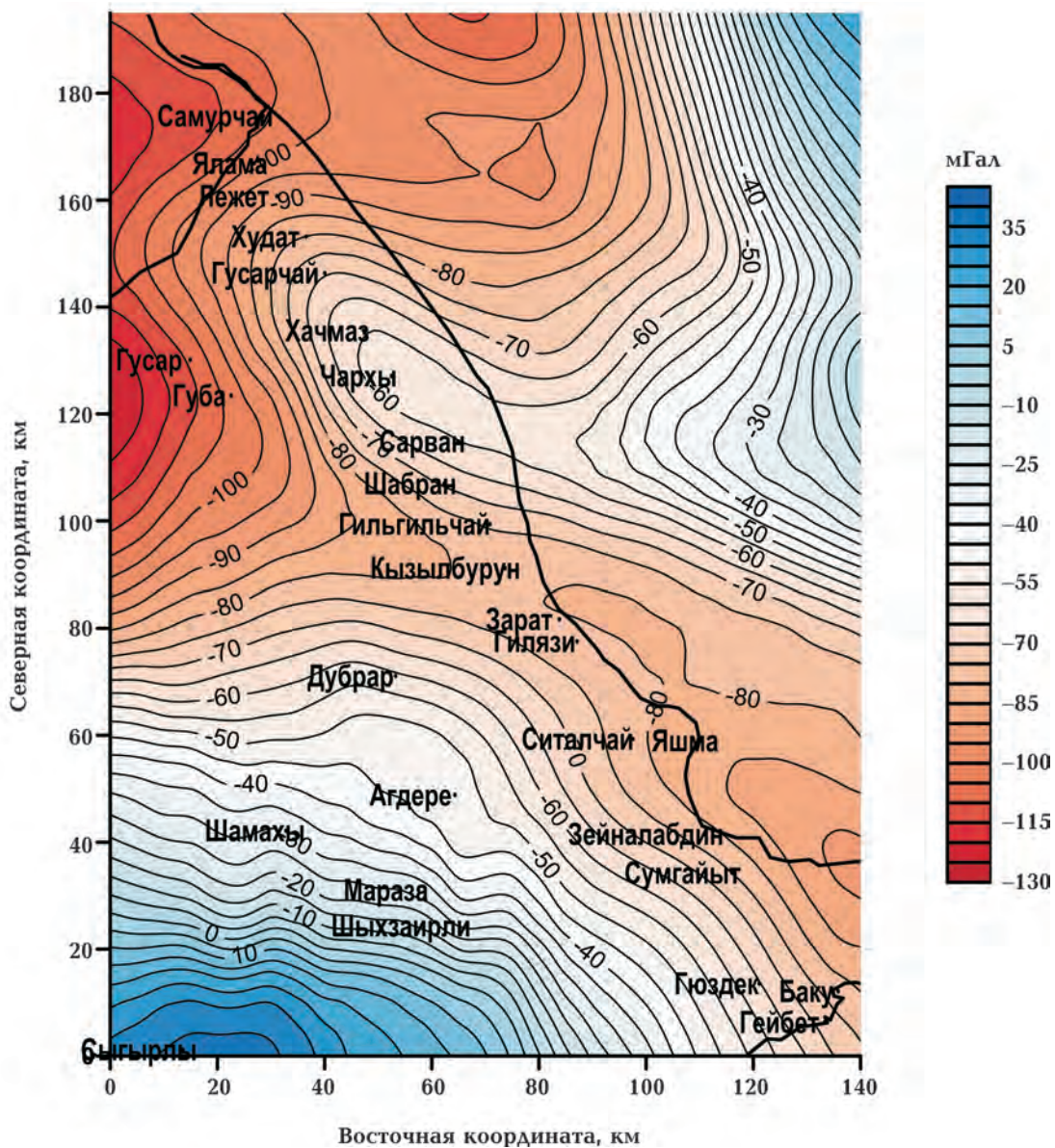


Рис. 1. Схема тектонического районирования территории Азербайджанской республики: Главные тектонические единицы: 1 — Гусар-Шабранский краевой прогиб; 2 — складчатая система Большого Кавказа; 3 — Куринский межгорный прогиб; 4 — складчатая система Малого Кавказа; 5 — складчатая система Нахчывана; 6 — складчатая система Эльбурса: Талышская зона; 7, 8 — границы структурных зон (7 — тектонические (а — обнаженные, б — погребенные); 8 — стратиграфические).

Структурные зоны (цифры на схеме): Гусар-Шабранский прогиб (1, 2): 1 — Хачмазская, 2 — Губинская; Большой Кавказ (3—12): 3 — Таирджальская, 4 — Судурская, 5 — Шахдаг-Хызынская, 6 — Гонагкендская, 7 — Тфанская, 8 — Загатала-Говдагская, 9 — Абшеронская, 10 — Вандамская; 11 — Шамаха-Гобустанская; 12 — Ганых(Алазань)-Айричайская; Куринский прогиб (13—17) — Среднекуринские: 13 — Аджиноурская, 14 — Кюрдамир-Саатлинская, 15 — Джейранчельская, 16 — Евлах-Агджабединская; 17 — Нижнекуринская; Малый Кавказ (18—22): 18 — Предмалокавказская, 19 — Лок-Гарабагская, 20 — Гейча-Акеринская, 21 — Гафанская, 22 — Нижнеарзская; Нахчыван (23—25): 23 — Ордубадская, 24 — Шарур-Джультинская, 25 — Нахчыванская; Талыш (26—29): 26 — Астаринская, 27 — Лерик-Ярдымлинская, 28 — Буроварская, 29 — Джалилабадская.

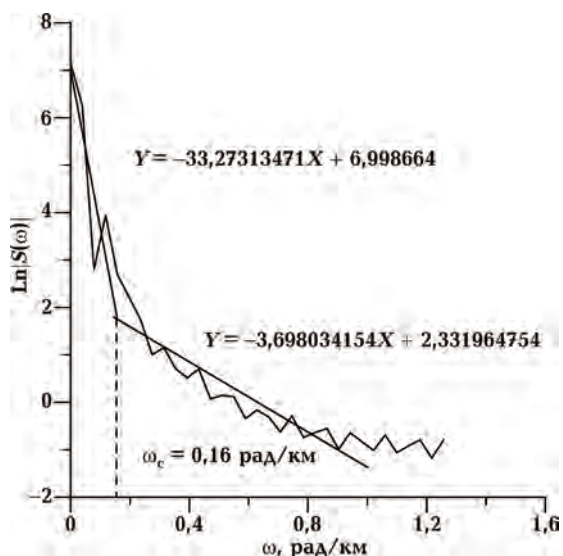
Fig. 1. Scheme of tectonic zoning of the territory of the Azerbaijan Republic. The main tectonic units: 1 — Gusar-Shabran marginal trough; 2 — the Greater Caucasus fold system; 3 — the intermountain Kur River trough; 4 — the Lesser Caucasus fold system; 5 — Nakhchivan Fold system; 6 — Elburs fold system; Talysh zone; 7, 8 — the boundaries of the structural zones (7 — tectonic (a — naked, b — buried); 8 — stratigraphic).

Structural zones (numbers on the scheme). Gusar-Shabran trough (1, 2): 1 — Khachmaz, 2 — Guba; Greater Caucasus (3—12): 3 — Tairdzhali, 4 — Sudur, 5 — Shahdag-Khyzy, 6 — Gonagkend, 7 — Tfan, 8 — Zagatala-Govdag, 9 — Absheron, 10 — Vandam; 11 — Shamakhy-Gobustan; 12 — Ganykh (Alazan)-Airichay; The Kur trough (13—17) — Middle Kur: 13 — Ajinour, 14 — Kurdamir-Saatly, 15 — Jairanchel, 16 — Yevlakh-Agdzhabedy; 17 — Lower Kur; Lesser Caucasus (18—22): 18 — Pre-Lesser Caucasus, 19 — Lok-Garabag, 20 — Goycha-Nakary, 21 — Gafan, 22 — Lower Araz; Nakhchivan (23—25): 23 — Ordubad, 24 — Sharur-Dzhulfa, 25 — Nakhchivan; Talysh (26—29): 26 — Astara, 27 — Lerik-Yardimli, 28 — Buravar, 29 — Jalilabad.



↑
Рис. 2. Гравиметрическое поле исследуемого региона в редукции Буге.

Fig. 2. Gravity field in Bouguer reduction of the studied region.



←
Рис. 3. Кривая логарифма спектра мощности гравитационного поля.

Fig. 3. Curve of the logarithmic power spectrum of the gravity field.

ченные из преобразования (12), запишем в следующем виде [Rao et al., 1995]:

$$H(u, v) = \frac{1}{2} [X(u, v) + X(M - u, v) + \dots],$$

для $u \neq 0, v \neq 0$ и $H(u, v) = X(v, v)$
 для $u = 0, v = 0$. (13)

После такого изменения амплитудный коэффициент преобразования Хартли определяется как

$$A(u, v) = \left[\frac{H^2(u, v) + H^2(Nu, Mv)}{2} \right]^{1/2}, \quad (14)$$

где $H(u, v)$ и $H(Nu, Mv)$ — соответственно позитивные и негативные коэффициенты преобразования Хартли. Для параметров Nu и Mv выполняются следующие условия: $Nu = u, Mv = v$ при $u = 0, v = 0$; $Nu = u, Mv = M - v$ при $u = 0, v \neq 0$; $Nu = N - u, Mv = v$, при $u \neq 0, v = 0$.

Амплитудные и фазовые спектры преобразования с помощью четных и нечетных коэффициентов Хартли определяются следующими формулами:

$$A(u, v) = [E^2(u, v) + O^2(u, v)]^{1/2}, \quad (15)$$

$$\theta(u, v) = \arctan \left(-\frac{O(u, v)}{E(u, v)} \right), \quad (16)$$

где $A(u, v)$ и $\theta(u, v)$ — соответственно амплитудный и фазовый спектры преобразования Хартли.

В частотной области двумерная фильтрация определяется произведением двумерных спектров весовой функции $\Psi(u, v)$ и входной функции $A(u, v)$:

$$Y(u, v) = \psi(u, v) A(u, v), \quad (17)$$

где $u = 2\pi/N\Delta x$ и $v = 2\pi/M\Delta y$ — пространственные частоты ($N\Delta x$ и $M\Delta y$ — протяженности сигналов вдоль профиля и по площади).

С использованием преобразования Хартли составлена программа (на языке Фортран-77), позволяющая вычислить

спектр мощности и высшие производные гравитационного потенциала, пересчет гравитационного поля на разные высоты, осреднение и фильтрацию гравитационных данных.

Спектр мощности и фильтрация гравитационных данных. С целью исследования гравитационных аномалий гравиметрическое поле исследуемого региона предварительно было разбито квадратной сеткой с шагом 5 км, а в узловых точках были определены значения аномалий Буге. Начало координатной системы расположено в юго-западном углу области исследования. Ось X направлена к востоку, а ось Y — к северу. Число элементов на осях X и на Y было выбрано $N_x = 29$ и $N_y = 40$.

Обработка гравиметрических данных в частотной области позволяет оценить глубины аномалиеобразующих источников с помощью анализа радиального спектра. Для определения глубины залегания аномальных тел логарифм спектра мощности графически изображается в зависимости от пространственной частоты. Получаемый график состоит из прямолинейных отрезков, наклон которых уменьшается с увеличением частоты. Линейные участки спектров мощности указывают на существование дискретных границ плотности. По наклонам прямых, определенных с применением метода наименьших квадратов, для каждого отрезка оцениваются средние глубины залегания гравитационных источников по формуле

$$Z = \frac{\text{Ln } S(\omega_2) - \text{Ln } S(\omega_1)}{2(\omega_2 - \omega_1)},$$

где ω_2 и ω_1 — некоторые значения пространственной частоты ω , для которых с проведенной прямой берутся значения $\text{Ln } S(\omega)$.

Преобразование Хартли было применено к гравиметрическим данным исследуемой области, заданным в узловых точках сетки размером 29×40 с шагом 5 км. Логарифмический спектр мощности аномалий Буге исследуемого региона приводится на рис. 3. Спектр мощности гравитационного

поля по наклону кривой разделяем на две низкочастотные и высокочастотные области, связанные с глубокими и неглубокими источниками гравитационного поля. Низкочастотные и высокочастотные области были приняты как области региональных и остаточных аномалий. Частота среза, отделяющая региональную и локальную области, определяется точкой пересечения прямых, полученных аппроксимацией данных спектра мощности в длинноволновых и коротковолновых областях. Частота (волновое число) среза в данном случае равна $\omega_c = 0,16$ рад/км. Частота среза позволяет разделить региональную часть гравитационного поля, применяя низкочастотные фильтры.

Наклон кривой указывает глубину аномалиеобразующих границ в длинноволновой области, равных 16,6 км, а в коротковолновой области 1,8 км [Bhattacharyya, 1966; Spector, Grant, 1970].

Региональные и локальные аномалии.

Разделения региональных и локальных аномалий с использованием преобразования Хартли и фильтра Баттерворта выполнены по методике, описанной в работах [Кадиров, 2000; Kadirov, 2000а, б]. Фильтр Баттерворта наиболее точно аппроксимирует характеристику идеального фильтра. Преимуществом этих фильтров является простота аналитического выражения и возможность управления степенью подавления в переходной зоне.

Идеальный низкочастотный фильтр Баттерворта [Kulhanek, 1976; Никитин, 1986] задается в виде

$$H_B(\omega) = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{\omega}{\omega_c}\right)^{2n}}},$$

где ω — волновое число, ω_c — волновое число среза, n — целое число, определяющее порядок фильтра. В настоящем исследовании было принято $n = 1$. Процесс применения фильтра Баттерворта был проведен в следующей последовательности. Сеточные значения аномалий Буге с использованием преобразования Хартли преобразовывают-

ся в частотно-пространственную область. В области Хартли в направлении рядов и колонок, с учетом частоты среза, составляется фильтр Баттерворта и умножается по одному (поодиночке) со спектром данных в области Хартли. Далее с помощью обратного преобразования возвращаемся в пространственную область.

На рис. 4 изображены результаты низкочастотной фильтрации с частотой среза $\omega_c = 0,16$ рад/км с использованием преобразования Хартли. На этой региональной карте видна полоса глубокого минимума. Минимальное значение аномалий фиксируется в морской части (–155 мГал). Относительный максимум наблюдается в районе Губа (–85 мГал) и Дубрар (–80 мГал). Эти аномалии распространяются до Маразы. Отрицательная аномалия к минимальным значениям определяется в районе Шамахи (–105 мГал) и на западе от Баку в районе Гюздек (–120 мГал). На рис. 5 изображены результаты высокочастотной фильтрации $\omega_c = 0,16$ рад/км с использованием преобразования Хартли. Зона положительных аномалий занимает площадь на северо-западе и юго-востоке исследуемой области. Максимальное значение этой аномалии, равное 1 мГал, отмечено в районе Губа и северной части Абшеронского полуострова. Отрицательная аномалия занимает северо-восточную и юго-западную части региона. Минимальное значение этой аномалии, равное –8 мГал, отмечено в морской части и в районе Гейбет (–6 мГал). Ряд замкнутых отрицательных аномалий наблюдается в районе Чархы (–2 мГал), Леджет (–3 мГал), Сарван (–3 мГал) и Яшма (–3 мГал).

По характеру взаимосвязи локальных гравитационных аномалий с тектоникой палеоген-неогеновых и мезозойских отложений зона разделена на три подзоны: а) Дубрарский региональный максимум, где имеется прямое соответствие между локальными аномалиями и тектоникой мезозойских отложений; б) Абшероно-Гобыстанский региональный минимум, где отмечается обратное соответствие между локальными аномалиями и тектоникой миоцен-неогенового комплекса отложений;

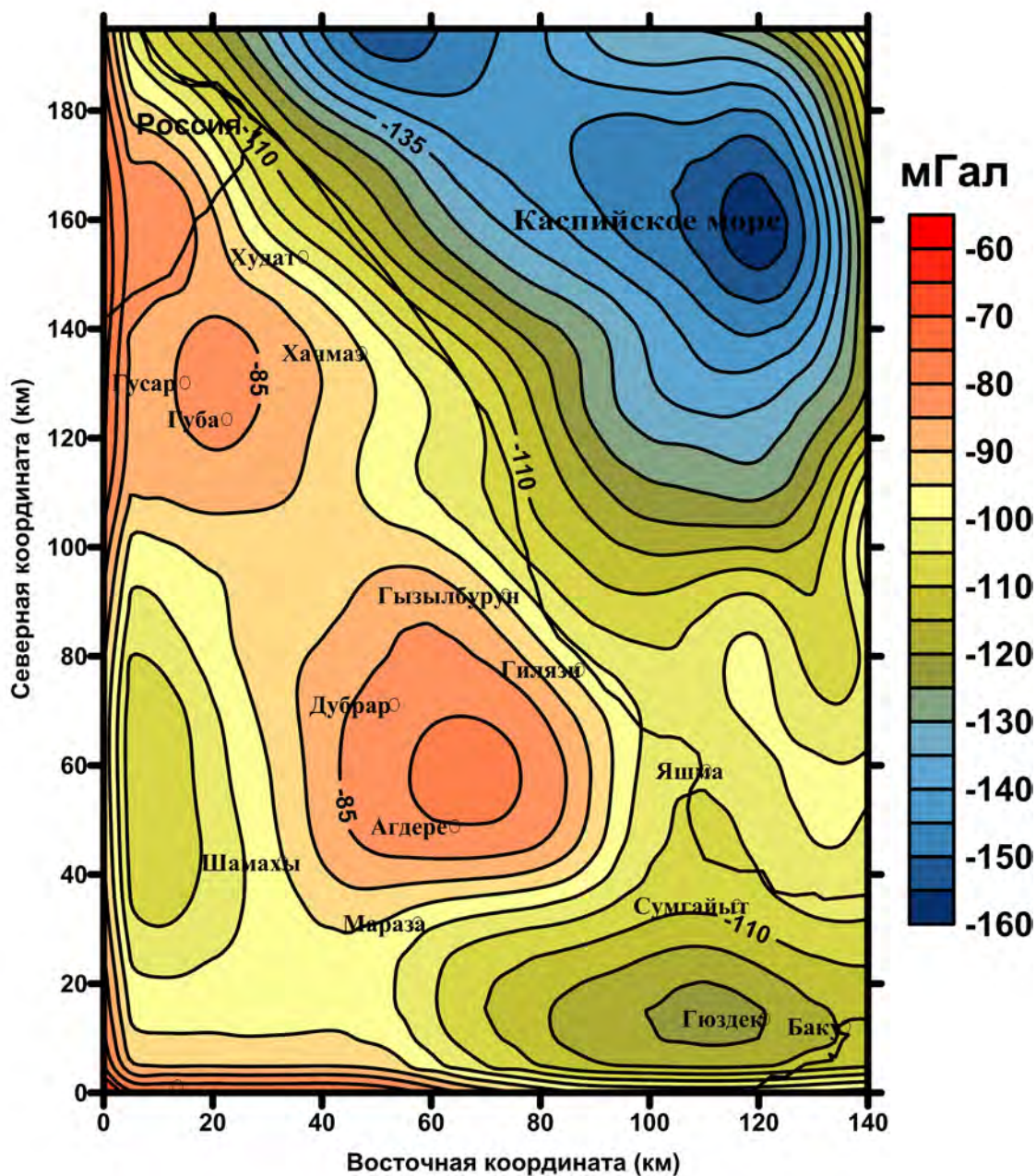


Рис. 4. Результаты низкочастотной фильтрации с использованием преобразования Хартли.

Fig. 4. Result of the low-frequency filtering with the use of the Hartley transform.

в) переходная зона от Дубрарского максимума к Абшероно-Гобыстанскому минимуму, где отсутствует единой критерий интерпретации аномалий силы тяжести, т. е. структура мезо-кайнозойского комплекса отложений отмечается знакопеременными аномалиями [Цимельзон, Амирасланов, 1980].

С локальными структурами связаны основные нефтегазоносные месторожде-

ния. Для успешного проведения гравиметрических работ необходимо изучение плотностей пород. По результатам многолетних определений плотностей на участках структур различных морфолого-генетических типов по 6 тыс. образцам керн и диаграммам ГИС трехсот скважин было установлено, что для сводовых и присводовых частей структур характерно закономерное разуплотнение пород. Оно

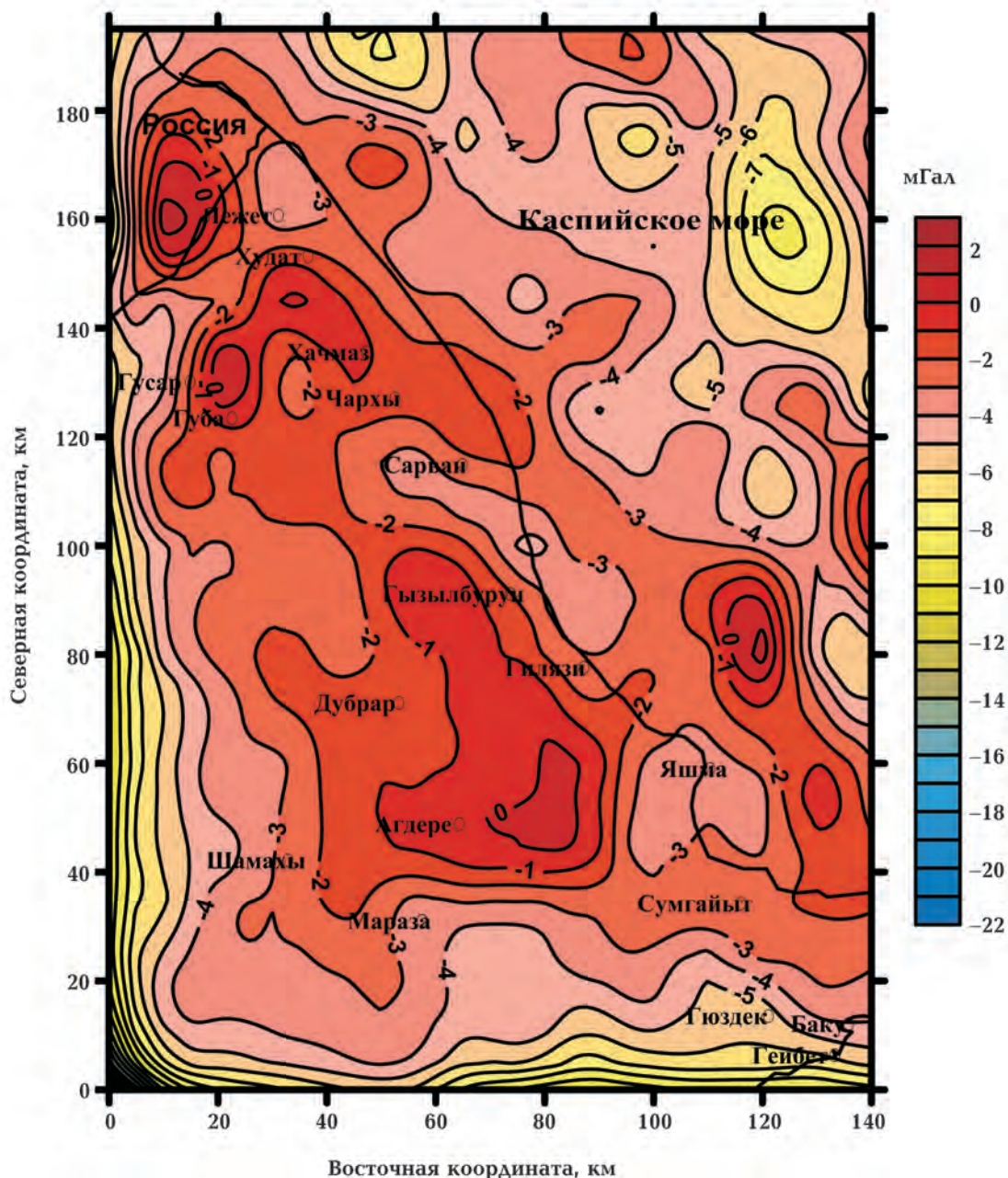


Рис. 5. Результаты высокочастотной фильтрации использованием преобразования Хартли.

Fig. 5. Result of the high-frequency filtering with the use of the Hartley transform.

может прослеживаться над нефтяными залежами по всему осадочному комплексу (для крыльев структур характерно уплотнение пород). Это разуплотнение отображается уменьшением гравитационного поля (локальными минимумами на фоне максимумов и др.), которое является поисковым признаком структур на глубине. Следует отметить, что в северной и центральной

частях региона выделенные локальные минимумы силы тяжести интенсивностью около 1 мГал предположительно связаны с нефтяными месторождениями (см. рис. 5). Результаты комплексного анализа показали, что юго-восточное погружение Большого Кавказа (Прикаспийско-Губинский, Абшеронский, Шамакы-Гобустанский нефтегазоносные районы) с точки зрения по-

исков залежей нефти и газа в разрезе мезозоя является наиболее перспективным.

Глубины залегания аномалиеобразующих объектов, определенные наклонном спектра мощности, находятся в согласии с данными сейсморазведки и скважинных исследований. По результатам КМПВ, МОВЗ, МТЗ глубина залегания кристаллического фундамента в зоне Гусарчай-Гусар-Ялама определена 8—18 км. В центральной части она имеет глубины 14—18 км [Ахундов и др., 1996]. Такие изменения кристаллического фундамента согласуются с изменениями региональных гравитационных аномалий. Глубина 16,6 км связана с поверхностью кристаллического фундамента, а 1,8 км с поверхностью внутри кайнозойских отложений.

Заключение. Анализ спектра мощности гравитационного поля Юго-Восто-

го Кавказа позволяет оценить среднюю глубину аномалиеобразующих факторов, равных 16,6 и 1,8 км. Глубина 16,6 км связана с поверхностью кристаллического фундамента, а 1,8 км с поверхностью внутри кайнозойских отложений. Хорошее согласование результатов фильтрации гравиметрических данных Юго-Восточного Кавказа с использованием трансформации Хартли и одномерного фильтра Баттерворта с результатами ранее проведенных исследований подтверждают надежность полученных результатов. Интерпретация региональных аномалий показывает, что эти аномалии зависят от геометрии кристаллического фундамента.

Благодарности. Выражаю благодарность проф. Ф.А. Кадирову за его поддержку в вычислениях и в подготовке рукописи.

Список литературы

- Амирасланов Т.С. Методика и результаты анизотропных трансформаций гравитационного поля Прикаспийско-Губинской нефтегазоносной области. *Изв. ВУЗов. Нефть и газ.* 1978. № 10. С. 8—11.
- Ахундов А.Б., Веремеенко О.В., Шекинский Э.М. Региональные исследования. В кн.: Геофизические исследования в Азербайджане. Баку: Шарг-Гарб, 1996. 282 с.
- Бат М. Спектральный анализ в геофизике. Москва: Недра, 1980. 535 с.
- Гаджиев Р.М. Глубинное геологическое строение Азербайджана. Баку: Азернешр, 1965. 200 с.
- Геология Азербайджана. Т. V. Физика Земли. Гл. ред. А. Ализаде. Баку: Nafta-Press, 2005. 352 с.
- Геологическая карта Азербайджана. Масштаб 1 : 500 000. Объяснительная записка. Ред. А. Ализаде). Баку: Нафта-Пресс, 2008. 86 с.
- Кириллова И.В., Люстих Е.Н., Растворова В.А., Сорский А.А. и Хаин В.Е. Анализ геотектонического развития и сейсмичности Кавказа. Москва: Изд-во АН СССР, 1960. 340 с.
- Кадилов Ф.А. Гравитационное поле и модели глубинного строения Азербайджана. Баку: Изд. Ин-та геологии АН Азербайджана, 2000. 112 с.
- Колесова В.И. Аналитические методы магнитной картографии. Москва: Наука, 1985. 222 с.
- Никитин А.А. Теоретические основы обработки геофизической информации. Москва: Недра, 1986. 342 с.
- Серкерев С.А. Спектральный анализ в гравиразведке и магниторазведке. Москва: Недра, 1991. 279 с.
- Снеддон И. Преобразование Фурье. Москва: Иностранлит, 1955. 668 с.
- Страхов В.Н. О новом этапе в развитии гео-

- рии интерпретации гравитационных и магнитных полей. *Изв. АН СССР. Сер. Физика Земли*. 1997. № 12. С. 20—41.
- Цимельзон И.О. Глубинное строение земной коры и тектоника Азербайджана по данным геофизических исследований. *Советская геология*. 1965. № 4. С. 103—111.
- Цимельзон И.О., Амирасланов Т.С. Комплексирование детальной грави- и сейсморазведки в зоне сочленения Абшеронской, Шемахино-Кобыстанской и Прикаспийско-Кубинской нефтегазоносных областей Азербайджана. *Нефтегазовая геология и геофизика*. 1980. Вып. 8. С. 44.
- Bhattacharyya, B.K. (1966). Continuous spectrum of the total magnetic anomaly due to a rectangular prismatic body. *Geophysics*, 31(1), 97—121. <https://doi.org/10.1190/1.1439767>.
- Blakely, R.J. (1995). *Potential theory in gravity and magnetic applications*. Cambridge University Press. 441 p.
- Bracewell, R.N. (1986). *The Fourier Transform and Its Applications*. New York: McGraw-Hill Book Co. 474 p.
- Duka, B. (1998). Comparison of different methods of analysis of satellite geomagnetic anomalies over Italy. *Annals of Geophysics*, 41(1), 49—61. <https://doi.org/10.4401/ag-3793>
- Haines, G. (1990). Spherical cap harmonic analysis. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 90(B3), 2583—2592. <https://doi.org/10.1029/JB090iB03p02583>.
- Hartley, R.V.L. (1942). A more symmetrical Fourier analysis applied to transmission problems. *Proc. of the IRE*, 30(2), 144—150.
- Kadirov, F.A. (2000a). Application of the Hartley transform for interpretation of gravity anomalies in the Shamakhy-Gobustan and Absheron oil and gas-bearing regions, Azerbaijan. *Journal of Applied Geophysics*, 45(1), 49—61. [https://doi.org/10.1016/S0926-9851\(00\)00018-5](https://doi.org/10.1016/S0926-9851(00)00018-5).
- Kadirov, F.A. (2000b). Filtering of Gravity Data Using the Hartley Transform: A Case Study of the Kura Intermontane Trough. *Izvestiya. Physics of the Solid Earth*, 36(10), 866—871.
- Kulhanek, O. (1976). *Introduction to digital filtering in geophysics*. Amsterdam—Oxford—New York: Elsevier Scientific Publishing Company. 168 p.
- Mohan, N.L. & Anand, B.L. (1994). A note on 2D Hartley Transform. *Geophysics*, 59(7), 1150—1155. <https://doi.org/10.1190/1.1443670>.
- Rao, B.N., Rama, K.P. & Markandeyulu, A. (1995). Mapros — A computer program for basement mapping and filtering of gravity and magnetic data using a Hartley transform. *Computer & Geosciences*, 22(3), 197—218. [https://doi.org/10.1016/0098-3004\(95\)00073-9](https://doi.org/10.1016/0098-3004(95)00073-9).
- Saatcilar, R. Ergintav, S. & Canitez, N. (1990). The use of the Hartley transform in geophysical applications. *Geophysics*, 55(11), 1488—1495. <https://doi.org/10.1190/1.1442796>.
- Spector, A., & Grant, F.S. (1970). Statistical models for interpreting aeromagnetic data. *Geophysics*, 35(2), 293—302. <https://doi.org/10.1190/1.1440092>.
- Sundararajan, N. (1995). 2D Hartley transforms. *Geophysics*, 60(1), 262—267 <https://doi.org/10.1190/1.1443754>.

Гравитационные аномалии юго-восточного Кавказа

Г.Р. Садыгова, 2020

В статье изучены гравитационные аномалии возмущающих масс по значениям спектра мощности и цифровой фильтрации гравитационных данных. Вычисление спектра мощности и цифровая фильтрация выполняется с использованием преобразований Хартлея и фильтра Баттерворта. Обработка гравиметрических данных в частотной области позволяет оценить глубины аномалиеобразующих источников с помощью анализа радиального спектра. Для определения глубины залегания аномальных тел, логарифм спектра мощности графически изображается в зависимости от пространственной частоты. По кривой логарифма спектра мощности определяются низкочастотная и высокочастотная области и частота среза. Частота среза, отделяющая региональную и локальную области, определяется точкой пересечения прямых, полученных аппроксимацией данных спектра мощности в длинноволновых и коротковолновых областях. Частота (волновое число) среза в данном случае определяется равным $\omega_c = 0,16$ рад/км. Низкочастотные и высокочастотные области были приняты как области региональных и локальных аномалий. Наклон кривой в длинноволновой области указывает глубины аномалиеобразующих границ, равных 16,6 км, а в коротковолновой области — 1,8 км. Глубина 16,6 км связана с поверхностью кристаллического фундамента, а 1,8 км с поверхностью внутри кайнозойских отложений. Хорошее согласование результатов фильтрации гравиметрических данных Юго-Восточного Кавказа с использованием трансформации Хартлея и одномерного фильтра Баттерворта с результатами ранее проведенных исследований подтверждают надежность полученных результатов. Интерпретация региональных аномалий показывает, что эти аномалии зависят от геометрии кристаллического фундамента.

Ключевые слова: спектр мощности, преобразование Хартлея, гравитационная аномалия, Юго-Восточный Кавказ.

Gravity anomalies of the Southeast Caucasus

G.R. Sadygova, 2020

The article studies gravity anomalies of disturbing masses by the values of the power spectrum and digital filtering of gravity data. The calculation of the power spectrum and digital filtering is performed using the Hartley transform and Butterworth filter. Processing of gravimetric data in the frequency component makes it possible to estimate the depths of anomaly-forming sources by analysing the radial spectrum. The logarithm of the power spectrum is graphically described depending on the spatial frequency, to determine the depth of density boundaries. The low-frequency and high-frequency components and the cutoff frequency are determined from the curve of the logarithm of the power spectrum. The cutoff frequency separating the regional and local components is determined by the point of intersection of the lines obtained by approximating the data of the power spectrum in the long and short wavelength components. The cutoff frequency (wavenumber) is determined to be equal to $\omega_c = 0.16$ rad/km in this case. Low-frequency and high-frequency components are accepted as components of regional and local anomalies. The power spectrum indicates depths of 16.6 km for the long component and 1.8 km for the short components. The depth of 16.6 km is connected with the surface of the crystalline basement, and 1.8 km with the surface inside the Cenozoic sediments. Good agreement between the results of filtering gravimetric data of the Southeast Caucasus using the Hartley transform and the one-dimensional Butterworth filter with the results of previous studies confirm the reliability of the results. The interpretation of the regional anomalies shows that these anomalies depend on geometry crystalline basement.

Key words: power spectrum, hartley transform, gravity anomaly, Southeast Caucasus.

References

- Amiraslanov, T.S. (1978). Methodology and results of anisotropic transformations of the gravitational field of the Caspian-Guba oil-and-gas region. *Izvestiya VUZov. Neft i gaz*, (10), 8—11 (in Russian).
- Akhundov, A.B., Veremeenko, O.B., & Shekinskiy, E.M. (1996). Regional studies. In: *Geophysical exploration in Azerbaijan*. Baku: Sharg-Garb, 282 p. (in Russian).
- Bat, M. (1980). *Spectral analysis in geophysics*. Moscow: Nedra, 535 p. (in Russian).
- Gadzhiev, P.M. (1965). *The deep geological structure of Azerbaijan*. Baku: Azerneshr, 200 p. (in Russian).
- Alizade, A. (Ed.). (2005). *Geology of Azerbaijan. Vol. V. Physics of the Earth*. Baku: Nafta-Press, 352 p. (in Russian).
- Alizade, A. (Ed.). (2008). *Geological map of Azerbaijan. Scale 1 : 500 000. Explanatory letter*. Baku: Nafta-Press, 86 p. (in Russian).
- Kirillova, I.V., Lustikh, E.H., Rastvorova, B.A., Sorskiy, A.A. & Khain, B.E. (1960). *Analysis of geotectonic development and seismicity of the Caucasus*. Moscow: Publ. House of the Academy of Sciences of the USSR, 340 p. (in Russian).
- Kadirov, F.A. (2000). *Gravitational field and models of the deep structure of Azerbaijan*. Baku: Edition of the Institute of Geology of the Azerbaijan Academy of Sciences, 112 p. (in Russian).
- Kolesova, V.I. (1985). *Analytical methods of magnetic cartography*. Moscow: Nauka, 222 p. (in Russian).
- Nikitin, A.A. (1986). *The theoretical basis of the processing of geophysical information*. Moscow: Nedra, 342 p. (in Russian).
- Serkerov, C.A. (1991). *Spectral analysis in gravity and magnetic exploration*. Moscow: Nedra, 279 p. (in Russian).
- Sneddon, I. (1955). *Fourier Transform*. Moscow: Publ. House of Foreign Literature, 668 p. (in Russian).
- Strakhov, V.N. (1997). About a new stage in the development of the theory of interpretation of gravitational and magnetic fields. *Izvestiya AN SSSR. Ser. Fizika Zemli*, (12), 20—41. (in Russian).
- Tsimelzon, I.O. (1965). The deep structure of the Earth's crust and tectonics of Azerbaijan according to geophysical research. *Sovetskaya geologiya*, (4), 103—111 (in Russian).
- Tsimelzon, I.O., & Amiraslanov, T.S. (1980). Integration of detailed gravity and seismic surveys in the junction zone of the Absheron, Shemakhino-Kobystan and Caspian-Cuban oil and gas regions of Azerbaijan. *Neftegazovaya geologiya i geofizika*, (8), 44—47 (in Russian).
- Bhattacharyya, B.K. (1966). Continuous spectrum of the total magnetic anomaly due to a rectangular prismatic body. *Geophysics*, 31(1), 97—121. <https://doi.org/10.1190/1.1439767>.
- Blakely, R.J. (1995). *Potential theory in gravity and magnetic applications*. Cambridge University Press. 441 p.
- Bracewell, R.N. (1986). *The Fourier Transform and Its Applications*. New York: McGraw-Hill Book Co. 474 p.
- Duka, B. (1998). Comparison of different methods of analysis of satellite geomagnetic anomalies over Italy. *Annals of Geophysics*, 41(1), 49—61. <https://doi.org/10.4401/ag-3793>
- Haines, G. (1990). Spherical cap harmonic analysis. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 90(B3), 2583—2592. <https://doi.org/10.1029/JB090iB03p02583>.
- Hartley, R.V.L. (1942). A more symmetrical Fourier analysis applied to transmission problems. *Proc. of the IRE*, 30(2), 144—150.
- Kadirov, F.A. (2000a). Application of the Hartley transform for interpretation of gravity anomalies in the Shamakhly-Gobustan and Absheron oil and gas-bearing regions, Azerbaijan. *Journal of Applied Geophysics*, 45(1), 49—61. [https://doi.org/10.1016/S0021-4785\(00\)00049-9](https://doi.org/10.1016/S0021-4785(00)00049-9)

- [//doi.org/10.1016/S0926-9851\(00\)00018-5](https://doi.org/10.1016/S0926-9851(00)00018-5).
- Kadirov, F.A. (2000b). Filtering of Gravity Data Using the Hartley Transform: A Case Study of the Kura Intermontane Trough. *Izvestiya. Physics of the Solid Earth*, 36(10), 866—871.
- Kulhanek, O. (1976). *Introduction to digital filtering in geophysics*. Amsterdam—Oxford—New York: Elsevier Scientific Publishing Company. 168 p.
- Mohan, N.L. & Anand, B.L. (1994). A note on 2D Hartley Transform. *Geophysics*, 59(7), 1150—1155. <https://doi.org/10.1190/1.1443670>.
- Rao, B.N., Rama, K.P. & Markandeyulu, A. (1995). Mapros — A computer program for basement mapping and filtering of gravity and magnetic data using a Hartley transform. *Computer & Geosciences*, 22(3), 197—218. [https://doi.org/10.1016/0098-3004\(95\)00073-9](https://doi.org/10.1016/0098-3004(95)00073-9).
- Saatcilar, R. Ergintav, S. & Canitez, N. (1990). The use of the Hartley transform in geophysical applications. *Geophysics*, 55(11), 1488—1495. <https://doi.org/10.1190/1.1442796>.
- Spector, A., & Grant, F.S. (1970). Statistical models for interpreting aeromagnetic data. *Geophysics*, 35(2), 293—302. <https://doi.org/10.1190/1.1440092>.
- Sundararajan, N. (1995). 2D Hartley transforms. *Geophysics*, 60(1), 262—267 <https://doi.org/10.1190/1.1443754>.