

Глубинное строение Большого Кавказа на основе геофизических данных по новым технологиям.

Ч. 1. Гравиметрия, магнитометрия, локальная сейсмотомография и микросейсмозондирование

© С. А. Гонгадзе, 2016

Государственный университет им. И. Джавахишвили,
Институт геофизики им. М. Нодиа, Тбилиси, Грузия

Поступила 7 сентября 2015 г.

Представлено членом редколлегии Т. П. Егоровой

Проведено обробку та інтерпретацію даних гравірозувідки, магніторозвідки і сейсмології для дослідження глибинної будови земної кори Великого Кавказу за новими комп'ютерними технологіями. Побудовано вертикальні розрізи, що характеризують розподіл контрастів густини і швидкостей в земній корі до глибини 100 км під Великим Кавказом. Виділено кілька швидкісних і густинних неоднорідностей, які відображують зональний поділ Великого Кавказу і вносять корективи в питання його горотворення. Виконано порівняльний аналіз отриманих результатів з результатами локальної сейсмотомографії і микросейсмічного зондування.

Ключові слова: Великий Кавказ, гравиметрія, глибинне сейсмозондування, сейсмотомографія, микросейсмічне зондування.

Введение. Проблема механизма орогенеза — одна из наиболее сложных в геодинамике, она привлекает внимание многих специалистов в различных областях наук о Земле. Регион Большого Кавказа, рассматриваемый в настоящей статье, входит в состав крупнейшего на Земле коллизионного Альпийско-Гималайского пояса, вдоль которого наблюдаются высочайшие горные комплексы. Во многих случаях основным процессом горообразования является сближение континентальных плит — коллизия, которая приводит к смятию и утолщению коры [Adamia et al., 2011].

Для лучшего понимания глубинных механизмов региональных геологических процессов важно использовать информацию геофизических исследований о строении коры и мантии.

Многие исследователи как наши, так и зарубежные занимались изучением глубинного строения Большого Кавказа. На основе имеющихся в отделе физики Земли Института геофизики им. М. Нодиа гравиметрических, магнитометрических и сейсмометрических данных сдела-

на попытка провести (качественную) обработку этих материалов с использованием новых технологий и новейших компьютерных программ, что позволило обосновать свою точку зрения на эту проблему. Сравнительный анализ проведен по нашим данным и по данным локальной томографии, обработанных с помощью программы LOTOS под руководством И. Ю. Кулакова, а также с использованием новых геофизических методов микросейсмического зондирования (работы А. В. Горбатиков, Е. А. Рогожин). На рис. 1 приведены гравиметрические профили, профили ГСЗ и микросейсмического зондирования.

Обработка и интерпретация гравиметрических и магнитометрических данных. Аномальное гравитационное поле, которое содержит информацию о подошве земной коры как границы с существенным скачком плотностей, в комплексе с аномальным магнитным полем и с профилями ГСЗ позволяет решить некоторые вопросы глубинного строения.

Однако наблюдаемое гравитационное поле отображает влияние практически всех неодно-

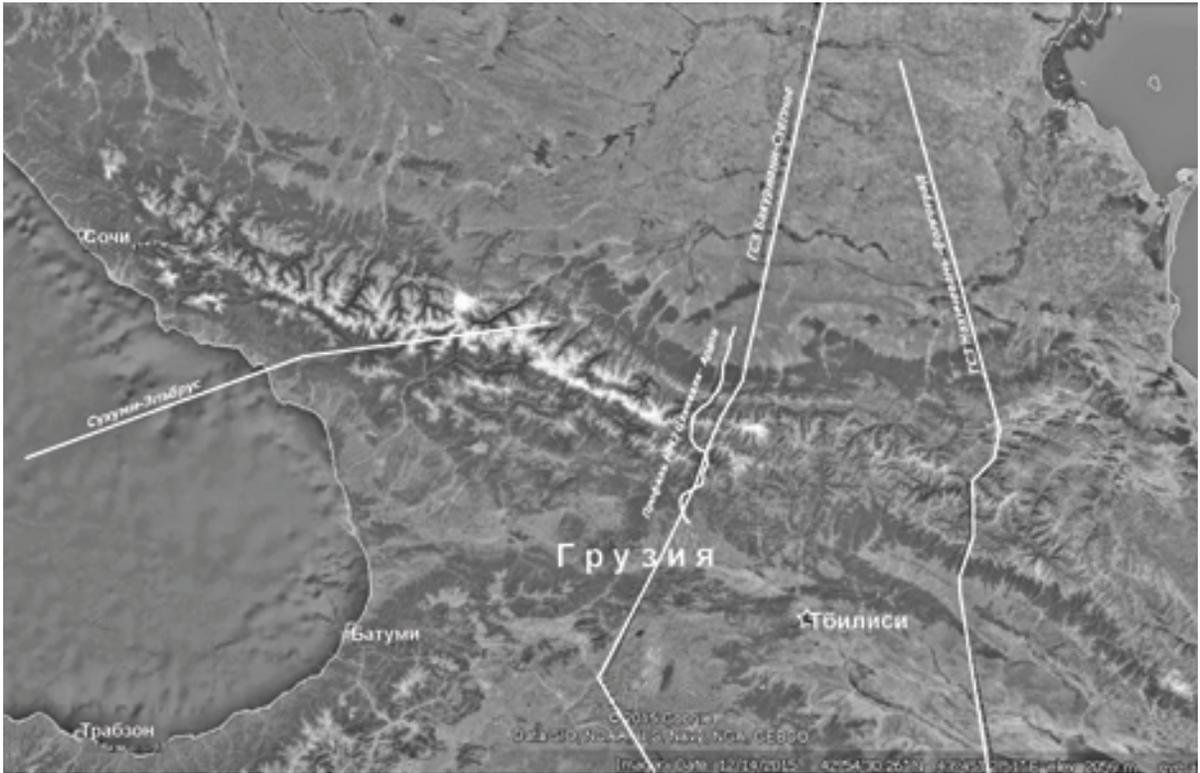


Рис. 1. Схема профилей ГСЗ и ММЗ.

родностей Земли. Для выделения мантийной составляющей его необходимо максимально очистить от эффекта неоднородностей коры, который является наиболее значительным и определяющим характер наблюдаемого гравиметрического поля.

Остаточные аномалии силы тяжести, которые с определенной точностью оценки надежности исходной модели коры можно считать мантийными аномалиями, лучше всего подходят для геодинамических построений и определения характера и интенсивности глубинных процессов.

Направление в теории интерпретации потенциальных полей, связанное с попытками изучения в некоторых частных случаях вертикального распределения намагниченности и плотности по данным магниторазведки и гравиразведки, получило название интерпретационной томографии. Интерпретационная томография позволяет по гравитационному либо магнитному полю изучить строение геологических структур и получить их послойное отображение. В настоящее время в этом направлении уже сложилось несколько подходов, предложенных разными исследователями (хотя и не все они в своих публикациях явно относят предмет своих исследо-

ваний именно к томографии). Их можно подразделить на две группы: аппроксимационную (Ю.Я. Вашилов, А.И. Кобрунов, А.П. Петровский, В.И. Сегалович, А.В. Овчаренко, Д. Ольденбург, Я. Ли и др.) и фильтрационную (П.С. Мартышко, В.М. Новоселицкий, В.Я. Подгорный, И.И. Приезжев, И.Л. Пруткин, А.Ф. Шестаков и др.).

Очевидно, что в общем случае задача получения вертикального распределения намагниченности и плотности по данным магниторазведки и гравиразведки принципиально невозможна. Тем не менее попытки подобных построений в надежде на то, что ситуация в конкретном районе является более благоприятной, несомненно должны предприниматься [Долгаль, Шархимуллин, 2009].

Фильтрационный подход реализован в компьютерной программе "Oasis montaj" канадской фирмы Geosoft и базируется на использовании процедур оптимальной фильтрации и аппроксимационном продолжении полей (Руководство пользователя, montaj MagMap Filtering).

Для математического удобства модуль MAGMAP применяет фильтры в области Фурье или области волновых чисел. Математически преобразование Фурье $f(x, y)$ определяется так:

$$f(\mu, \nu) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(x, y) e^{-i(\mu x + \nu y)} dx dy.$$

Обратная зависимость:

$$f(x, y) = \frac{1}{4\pi^2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(\mu, \nu) e^{-i(\mu x + \nu y)} d\mu d\nu,$$

где i — мнимая часть, e — расстояние каждого элемента трансформанты, μ, ν — волновые числа соответственно в направлениях x и y , измеренные в радианах на метр, при условии, что x и y выражены в метрах. Они связаны с пространственными "частотами" f_x и f_y , выраженными в периодах на метр.

Аналитическое продолжение поля в верхнее полупространство считается "чистым фильтром", поскольку он не производит побочных эффектов, которые могут требовать применения других фильтров или процедур для коррекции. Благодаря этому, его часто используют для удаления или минимизации в регулярных сетках полей неглубоких источников или шума [Страхов, 2001].

Фильтр Баттерворта прекрасно подходит для применения прямых высокочастотных или низкочастотных фильтров к данным, так как можно без труда регулировать степень сглаживания фильтра, оставляя при этом центральное волновое число фиксированным.

Наиболее общие представления о глубинах особых точек и источников гравитационных и магнитных аномалий можно получить, анализируя энергетический спектр полей. На рис. 2 показан график логарифма радиально осредненного амплитудного спектра аномального гравитационного и магнитного полей в зависимости от пространственной частоты, полученный с помощью специальной опции пакета программ "Oasis montaj", а также выполненная той же системой оценка глубин источников в различных диапазонах пространственных частот. Анализ графика гравитационного поля показывает, что узкая полоса частот в низкочастотной части спектра связана с глубокозалегающими источниками, особые точки которых соответствуют глубинам более 16 км (наибольшая из отмеченных глубин — 18 км). Таким образом, судя по спектру, содержащаяся в аномальном гравитационном поле информация относится к верхнему слою земной коры мощностью около 16 км. На графике аномального магнитного поля это соответствует глубине до 18 км. Эти данные использовались при трансформации гравимагнитометрических полей с применением фильтрации для исключения эффекта осадочного слоя.

Заметим, что определенная "ущербность" методов, основанных на трансформациях и разделении геофизических полей, стала очевидна практически с момента их становления. Трансформированные поля позволяют только улучшить наглядность влияния отдельных возмущающих факторов [Блох, 2009] (см. рис. 2).

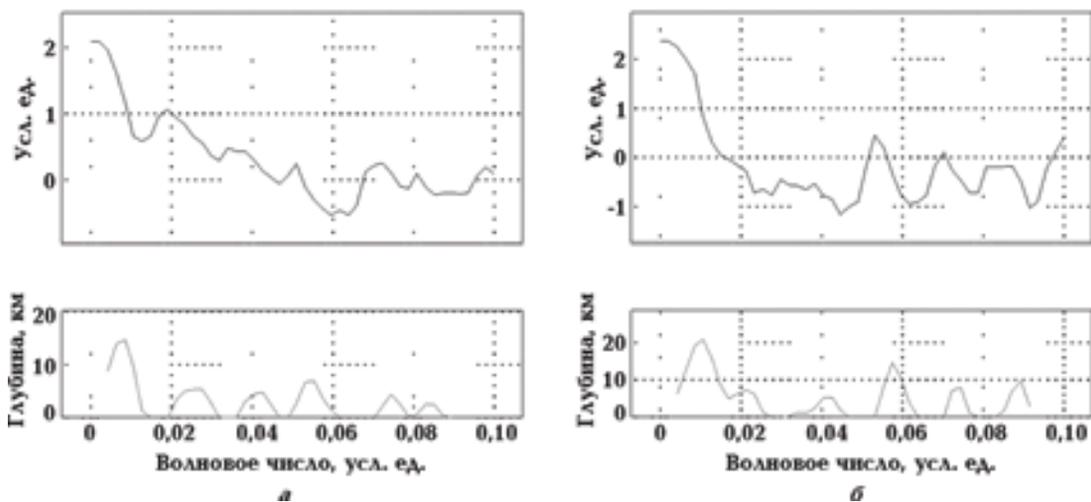


Рис. 2. Оценка глубин источников в различных диапазонах пространственных частот по графику логарифма радиально осредненного амплитудного спектра гравитационного поля (а), магнитного поля (б).

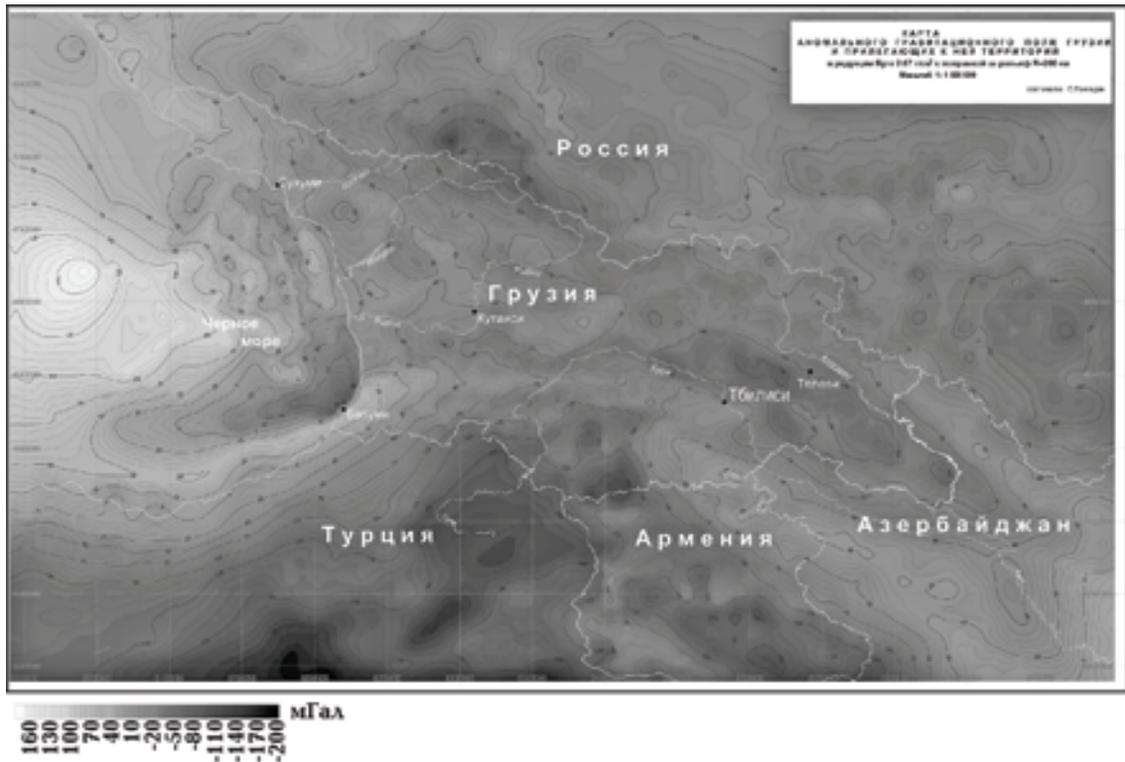


Рис. 3. Карта аномального гравитационного поля Грузии и прилегающих к ней территорий.

В качестве исходного гравитационного поля для получения остаточных аномалий использовано аномальное поле в редукции Буге с плотностью промежуточного слоя $2,67 \text{ г/см}^3$ и поправкой за рельеф до 200 км. Погрешность измерений при съемке масштаба 1 : 50 000 составляла 0,5 мГал, а при масштабе 1 : 200 000 — до 1 мГал [Гамкрелидзе и др., 2012]. На рис. 3 показана карта аномального наблюдаемого гравитационного поля масштаба 1 : 500 000. На представленной карте области низких аномалий соответствуют складчато-надвиговым горным сооружениям Большого и Малого Кавказа, а зоны высоких и повышенных аномалий — Восточно-Черноморской впадине и Закавказским межгорным впадинам (Рионской и Куринской).

Остаточные аномалии гравитационного поля (рис. 4) были получены путем пересчета аномального поля в редукции Буге на разные высоты до 100 км. Трансформированные таким образом поля устранялись из аномального гравитационного поля, которое обусловлено неоднородностями в осадочном чехле и в земной коре, топографией поверхности раздела Мохо, а также региональными полями, связанными с влиянием наиболее существенных масс подкоровой мантии. В качестве инструмента разделения по-

лей использовалась программа "Oasis montaj" с учетом перечисленных выше фильтров.

На рис. 4 приведены горизонтальные срезы на глубинах 15 и 45 км гравитационного и магнитного полей (для трансформированного и остаточного полей), на которых видны изменения, связанные с низко- и высокоплотными неоднородностями.

Локальная сейсмическая томография. В комплексном анализе использовались результаты локальной сейсмографии P - и S -волн. Референтная модель земной коры для Грузии посылалась в Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН (Новосибирск). Данные обрабатывались по методике И. Ю. Кулакова по программе Local Tomography Software, LOTOS-09 (локальное сейсмографическое программное обеспечение) [Кулаков, 2009]. Полученные горизонтальные срезы на разных глубинах в дальнейшем обраба-

| Глубина, км | V_P , км/с | V_S , км/с | Слой |
|-------------|--------------|--------------|------------------|
| 0,000 | 4,53 | 2,78 | осадочный |
| 6,000 | 5,70 | 3,35 | гранитный |
| 21,000 | 6,43 | 3,70 | базальтовый |
| 44,000 | 7,98 | 4,70 | поверхность Мохо |

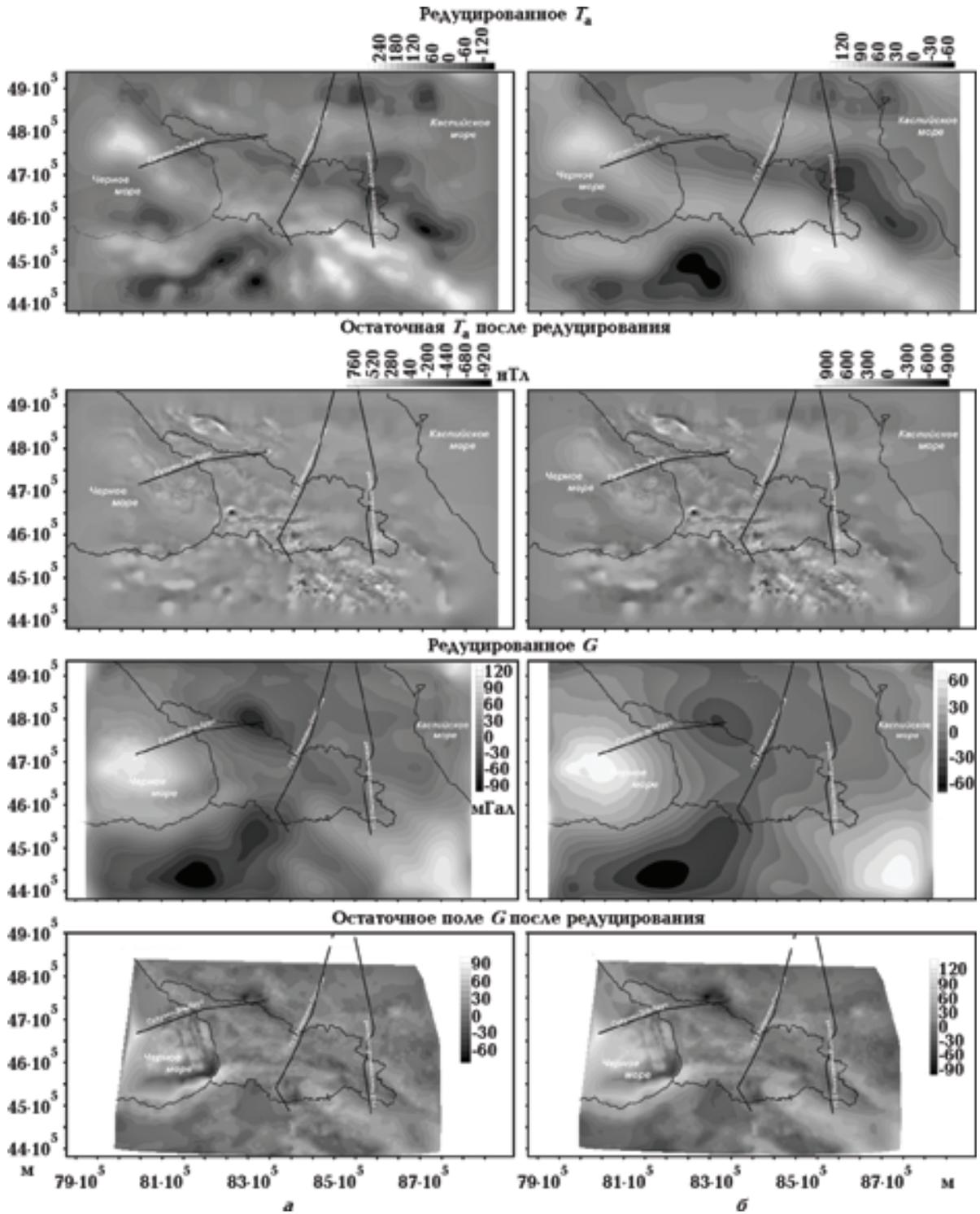


Рис. 4. Горизонтальные срезы редуцированных и остаточных магнитного, гравитационного полей на глубине 15 (а) и 45 км (б).

тывались с помощью компьютерной программы Surfer. На рис. 5 показаны горизонтальные срезы скоростной модели на глубине 15 и 45 км [Балавадзе, Шенгелая, 1961].

Алгоритм томографии LOTOS-09 предназначен для одновременного обращения P - и S -скоростей и координат источников. Использовались данные времен пробега P - и S -волн за период

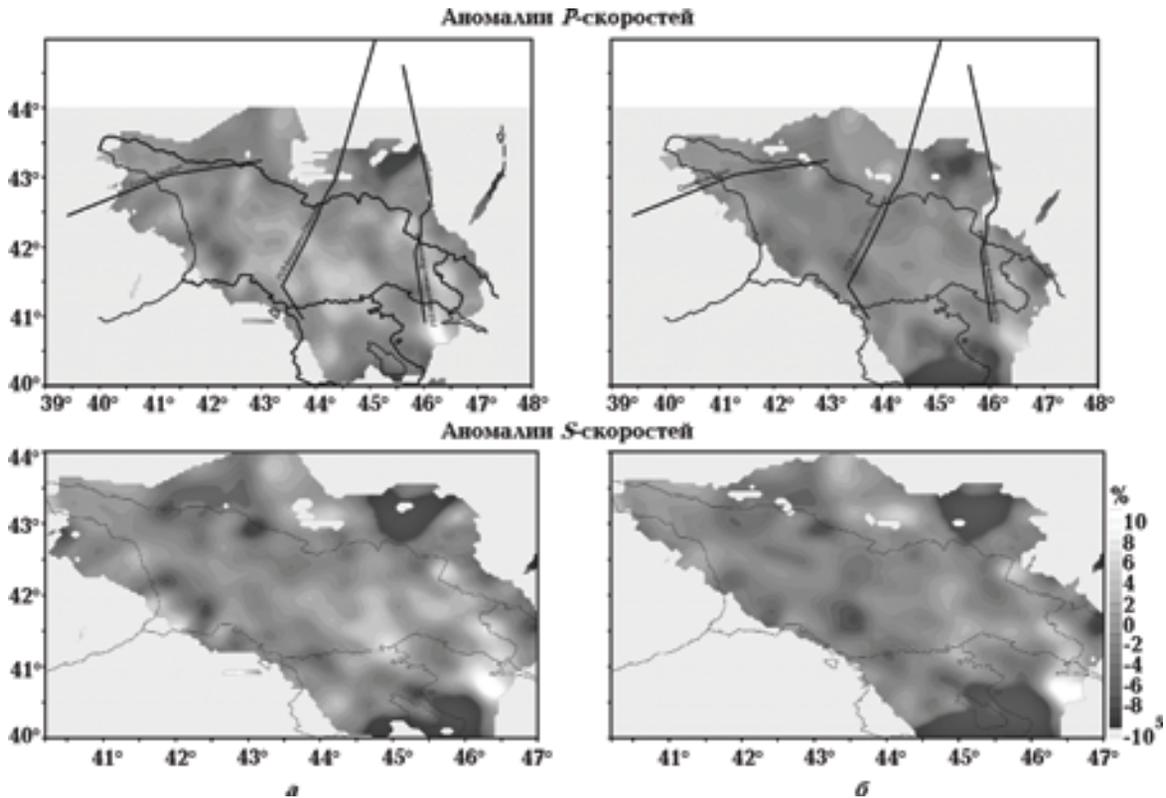


Рис. 5. Горизонтальные срезы аномалий P - и S -скоростей для глубин 15 (а) и 45 км (б).

1964—2007 гг. из каталога Международного сейсмологического центра (ISC).

Алгоритм LOTOS-09 может быть непосредственно применен к весьма различным наборам данных без сложных настроек параметров. Он имеет довольно широкий спектр возможностей для выполнения различных тестов и достаточно прост в эксплуатации. Алгоритм содержит следующие основные процедуры:

- одновременная оптимизация 1D глубинно-скоростной модели при предварительном согласовании размещения источников;
- расположение источников в 3D глубинно-скоростной модели;
- задание распределения скоростей, которое основано на узловом способе параметризации с использованием нескольких сеток.

Одним из критериев верификации томографических моделей служит сравнение аномалий P - и S -скоростей, полученных независимо. Они имеют весьма схожую конфигурацию, что может свидетельствовать о надежности результатов инверсии (см. рис. 5).

Отмечается тенденция связи отрицательных аномалий трансформант потенциальных полей и относительных сейсмических скоростей (гравиметрия, магнитометрия и сейсмотомография)

со складчато-надвиговыми сооружениями Большого Кавказа, тогда как положительные аномалии (гравимагнитометрические и сейсмологические данные) коррелируются с Закавказскими межгорными впадинами (см. рис. 4, 5). Особенно хорошо это проявилось в остаточном гравитационном поле и скоростях P -волн. Так, на срезе $H = 45$ км областям пониженных значений гравитационного поля соответствуют низкие аномалии P -скоростей, что представляет собой основную особенность этого глубинного среза.

По трем профилям, показанным на рис. 4, а это профили ГСЗ Бакуриани—Степное, Нахичевань—Волгоград, а также профиль Сухуми—Эльбрус, построены вертикальные разрезы по остаточным гравитационному и магнитному полям, а также вертикальные разрезы аномалий P -скоростей. Для сравнения представлены результаты метода микросейсмического зондирования по профилю Цхинвали—Ардон [Горбатики и др., 2015].

По профилю Нахичевань—Волгоград (рис. 6) на вертикальном срезе P -скоростей Большой Кавказ выделяется двумя областями — с юга повышенными значениями P -аномалий, к северу пониженными. В остаточном гравитационном поле ΔG ороген характеризуется чередованием

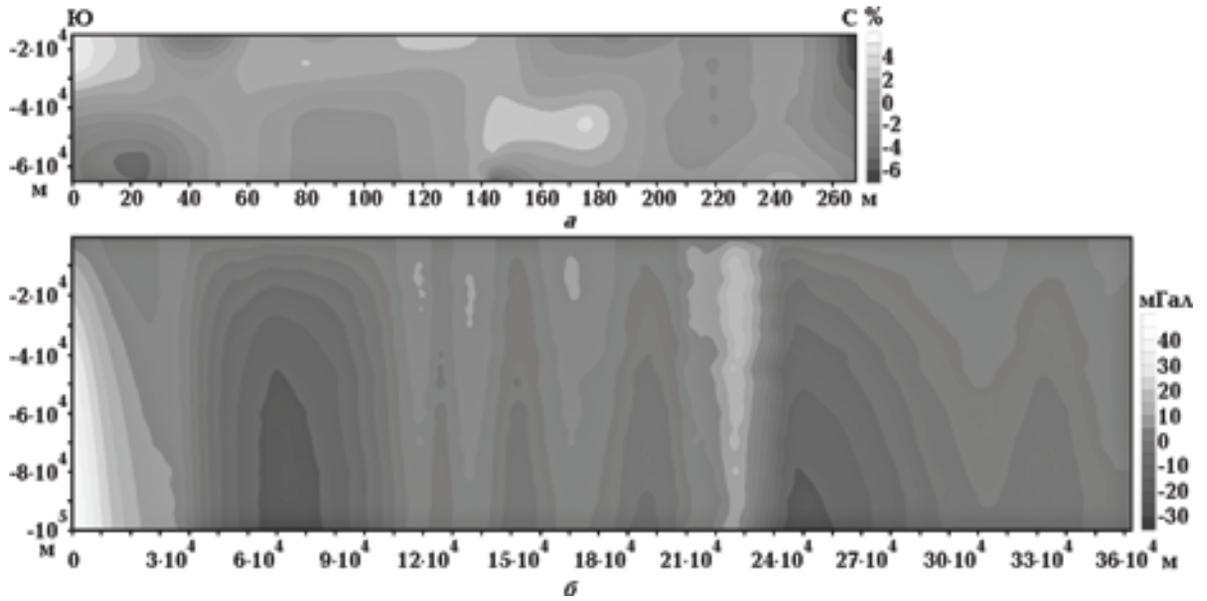


Рис. 6. Вертикальные разрезы локальной сейстотомографии (а) и остаточного гравиметрического поля (б) по профилю Нахичевань—Волгоград.

вертикальных пониженных и повышенных плотностных неоднородностей. Необходимо отметить, что скоростной разрез для P -инверсий построен только до глубины 65 км, так как референтная модель была задана до 65 км, а оста-

точные потенциальные поля получены при редуцировании до 100 км.

При рассмотрении западного профиля Сухуми—Эльбрус (рис. 7), на котором представлены вертикальные срезы томографии P -инвер-

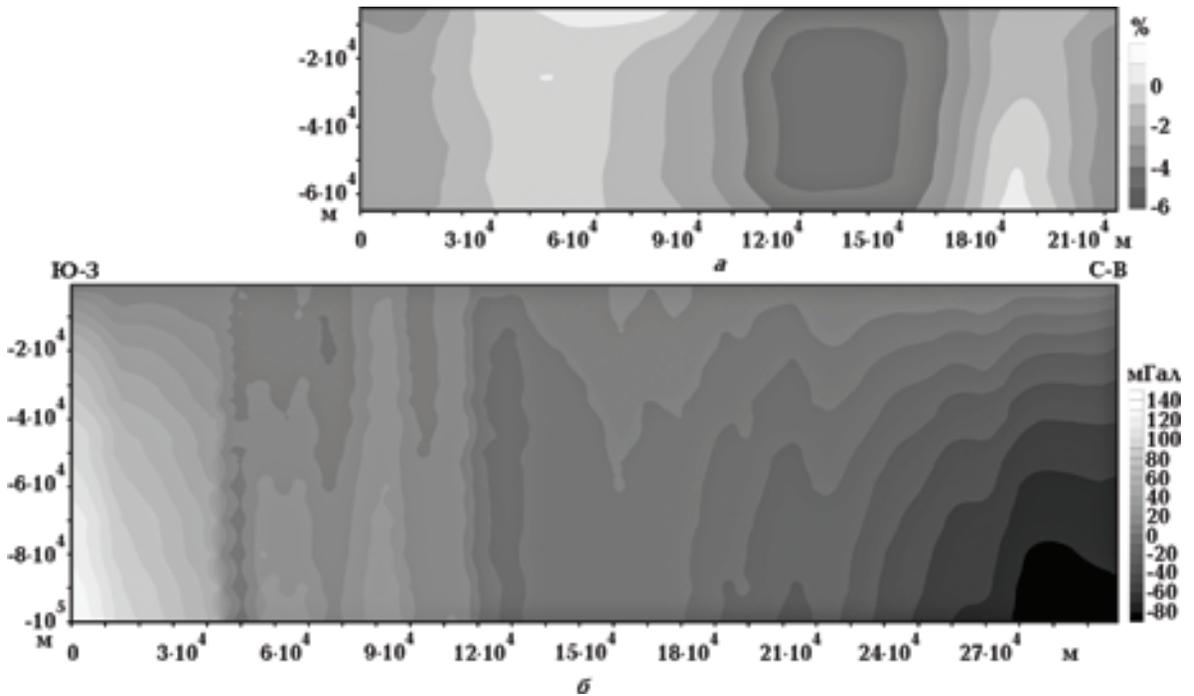


Рис. 7. Вертикальные разрезы локальной сейстотомографии V_p (а) и остаточного гравиметрического поля (б) по профилю Сухуми—Эльбрус.

сии и остаточного гравитационного аномального поля, Большой Кавказ выделяется низкими значениями скорости и плотности.

Метод микросейсмического зондирования (ММЗ) относится к группе пассивных методов сейсморазведки и может применяться при решении геолого-геофизических и структурных задач для разных классов геологических объектов в различных географических и климатических условиях [Горбатиков, Цуканов, 2011; Горбатиков и др., 2015].

В основе метода лежит измерение фонового микросейсмического поля. В роли основного параметра сигнала, несущего в себе полезную информацию, используется амплитуда (интенсивность). Интересно, что субвертикальные геологические неоднородности и скоростные границы для ММЗ являются предпочтительными,

а субгоризонтальные границы — “неудобными” объектами, тогда как для сейсморазведки субгоризонтальные геологические тела и скоростные границы являются предпочтительными объектами. Это объясняется взаимным пространственным расположением волновых фронтов и скоростных границ. Так, идеально горизонтальная в пределах измерительного профиля скоростная граница в ММЗ будет незаметна. О горизонтальных границах в ММЗ можно судить по нарушению характера волновой картины по аналогии с тем, как определяют присутствие и положение субвертикальных разломов в МОВ. В этом смысле ММЗ можно рассматривать как своеобразное “ортогональное дополнение” к МОВ.

В 2012 и 2013 гг. получены два геолого-геофизических профиля с использованием ММЗ

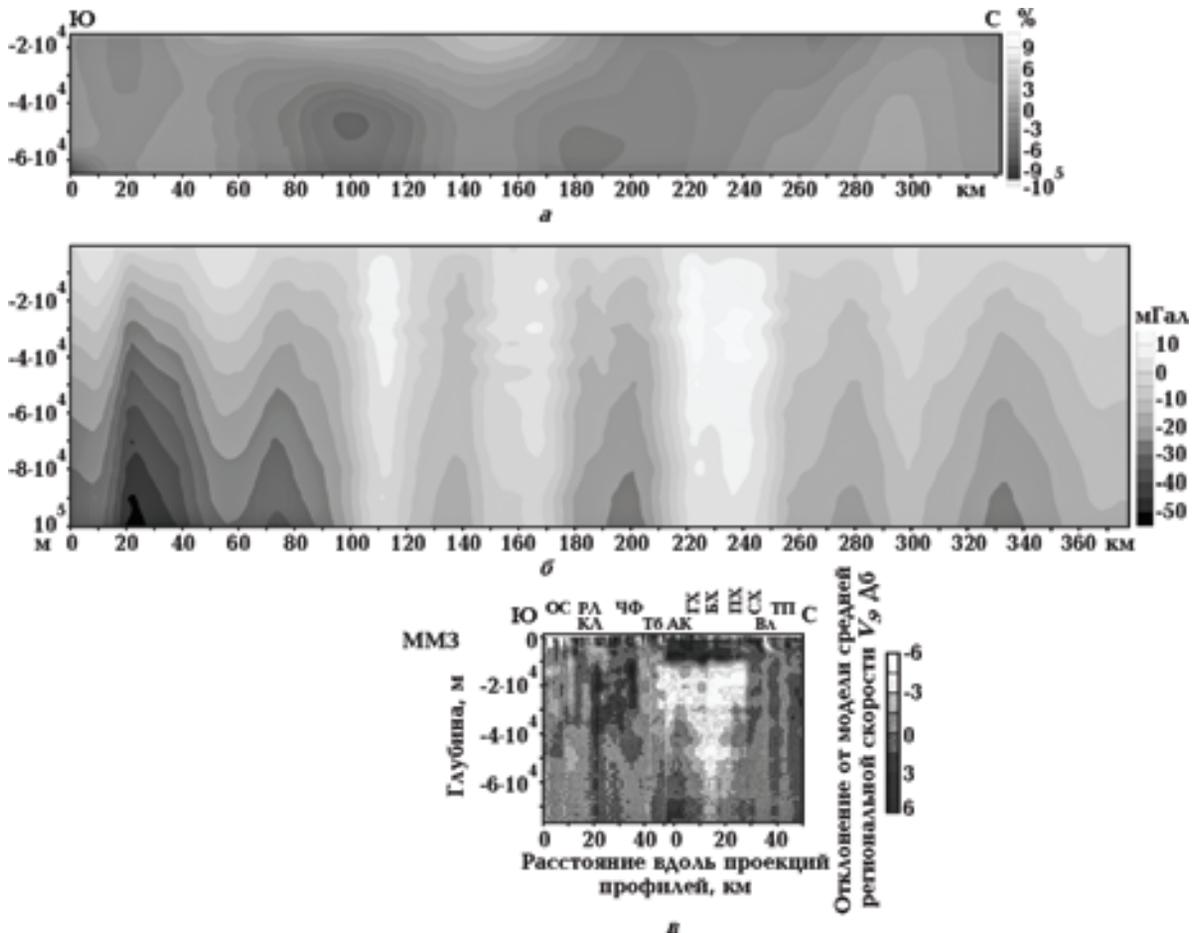


Рис. 8. Вертикальные разрезы локальной сейсмотомографии V_P (а), остаточного гравиметрического поля по профилю Бакуриани—Степное (б) и по профилю ММЗ Цхинвали—Ардон (в). Тектонические зоны: ОС — Окрибо-Сачхерская, РА — Рача-Лечхумская, ЧФ — Чиаурский флишевый синклиниорий, ГХ — Главного хребта, БХ — Бокового хребта, СХ — Скалистого хребта, ПХ — Пастбищного хребта, ТП — Терского прогиба. Разломы: КЛ — Кахетинско-Лечхумский, Тб — Тибский, АК — Адайком-Казбекский, Вл — Владикавказский.

вкрест простирания складчатого сооружения Большого Кавказа: Цхинвали—Ардон и Туапсе—Апшеронск. Профиль ММЗ Цхинвали—Ардон фактически совпадает с центральной частью профиля ГСЗ Бакуриани—Степное. Это дает возможность провести сопоставление результатов профилирования по двум профилям.

ММЗ позволяет оценивать пространственное распределение скоростных вариаций на глубинном разрезе относительно региональной скоростной модели.

На профиле Цхинвали—Ардон (рис. 8) под Большим Кавказом начиная с глубины 20 км прослеживается зона низкоскоростных неоднородностей, которая коррелируется с низкоплотностной областью на разрезе остаточного гравитационного поля по профилю Бакуриани—Степное. Чередование областей повышенных и пониженных значений скорости и плотности, очевидно, связано с зональным делением Большого Кавказа. Как в остаточном гравиметрическом поле, так и на разрезе по ММЗ эти зоны выделяются вертикальными неоднородностями.

Основные выводы. На основании данных, представленных на рис. 3—8 и показывающих результаты обработки гравиметрических, маг-

нитометрических данных и данных ММЗ, а также результаты локальной сейсмотомографии *P*-волн до глубины 100 км, несмотря на сложную картину, можно сделать некоторые выводы о взаимосвязи этих аномалий с геологическим строением Большого Кавказа:

1. Большой Кавказ по всем рассматриваемым методам выделяется пониженными скоростными и плотностными параметрами.

2. На вертикальном сечении гравиметрических данных и данных по ММЗ видна корреляция между скоростными и плотностными параметрами, соответствующими зональному разделению Большого Кавказа. По профилю Бакуриани—Степное это тектонические зоны Окрибо-Сачхерская, Рача-Лечхумская, Чиаурская, Главного хребта, Скалистого хребта и т. д., которые разделяются по своим скоростным и плотностным параметрам.

3. Наблюдается четкая пространственная связь областей наименьших значений *P*- и *S*-скоростей с гравиметрическими аномалиями, что хорошо видно на профиле Сухуми—Эльбрус. Очевидно, это связано с областями неоген-четвертичной вулканической активности.

Список литературы

- Балавадзе Б. К., Шенгелая Г. Ш. Основные черты структуры земной коры Большого Кавказа по гравиметрическим данным. Докл. АН СССР. 1961. Т. 136. № 6. С. 131—140.
- Блох Ю. И. Интерпретация гравитационных и магнитных аномалий. 2009. С. 126—170. sigma3d.com/pdf/books/blokh-2009.pdf.
- Гамкрелидзе Н. П., Гонгадзе С. А., Миндели П. Ш., Кириа Д. К., Яволовская О. В. Физика земной коры Грузии. Тбилиси: Изд. Ин-та геофизики АН Грузии, 2012. 221 с.
- Горбатиков А. В., Рогожин Е. А., Степанова М. Ю., Харазова Ю. В., Андриева Н. В., Перегдерин Ф. В., Заалишвили В. Б., Мельков Д. А., Дзеранов Б. В., Дзедзедзиев Б. А., Габараев А. Ф. Особенности глубинного строения и современной тектоники Большого Кавказа в осетинском секторе по комплексу геофизических данных. Физика Земли. 2015. Т. 51. № 1. С. 26—37.
- Горбатиков А. В., Цуканов А. А. Моделирование волн Рэлея вблизи рассеивающих скоростных неоднородностей. Исследование возможностей метода микросейсмического зондирования. Физика Земли. 2011. № 4. С. 96—112.
- Долгаль А. С., Шархимуллин А. Ф. "Гравитационная томография" — практика, опережающая теорию. Геоинформатика. 2009. № 3. С. 59—64.
- Кулаков И. Ю. Взгляд на процессы под вулканами через призму сейсмической томографии. Вестник РАН. 2013. Т. 83. № 8. С. 698—710.
- Страхов В. Н. Интерпретационные процессы в гравиметрии и магнитометрии — это реализации единого аппроксимационного подхода. I. Основные идеи и конструктивные принципы. Физика Земли. 2001. № 10. С. 3—18.
- Adamia S., Alania V., Chabukiani A., Kutelia Z., Sadradze N., 2011. Greater Caucasus (Caucasioni): a long-lived North-Tethyan back-arc basin. Turk. J. Earth Sci. 20, 611—28.
- Koulakov I., 2009. LOTOS code for local earthquake tomographic inversion. Benchmarks for testing tomographic algorithms. Bull. Seismol. Soc. Amer. 99(1), 194—214.

The deep structure of the Greater Caucasus on the basis of geophysical data according to new technologies.

1. Gravimetry, magnetometry, local seismic tomography and micro seismic sounding

© S. A. Gongadze, 2016

The data of gravity prospecting, magnetic prospecting and seismology for the study of deep structure of the earth crust of the Greater Caucasus according to software technologies have been processed and interpreted. The vertical sections depicting the distribution of the contrasts of the density and speeds in the earth crust up to the depth of 100 km under the Greater Caucasus have been constructed. Several speed and density heterogeneities of the zonal division of the Greater Caucasus, which make some corrections for the issues of orogenesis of the Greater Caucasus, have been distinguished. Comparative analysis of the obtained results and the results of the local seismic tomography and micro seismic sounding has been done.

Key words: the Greater Caucasus, gravimetry, deep seismic sounding, seismic tomography, micro seismic sounding.

References

- Balavadze B. K., Shengelaya G. Sh.*, 1961. Main features the structure of the crust of the Greater Caucasus from gravity data. *Doklady AN SSSR* 136(6), 131—140 (in Russian).
- Bloch Yu. I.*, 2009. Interpretation of gravity and magnetic anomalies, 126—170. sigma3d.com/pdf/books/blokh-2009.pdf (in Russian).
- Gamkrelidze N. P., Gongadze S. A., Mindeli P. Sh., Kiria D. K., Yavolovskaya O. V.*, 2012. Physics of the Earth's crust Georgia. Tbilisi: The Institute of Geophysics of the Academy of Sciences of Georgia Publ., 221 p. (in Russian).
- Gorbatikov A. V., Rogozhin E. A., Stepanova M. Yu., Kharazova Yu. V., Andreeva N. V., Perederin F. V., Zaalishvili V. B., Mel'kov D. A., Dzeranov B. V., Dzeboev B. A., Gabaraev A. F.*, 2015. The pattern of deep structure and recent tectonics of the Greater Caucasus in the Ossetian sector from the complex geophysical data. *Fizika Zemli* 51(1), 26—37 (in Russian).
- Gorbatikov A. V., Tsukanov A. A.*, 2011. Modeling of Rayleigh waves near the scattering velocity heterogeneities. Research opportunities microseismic sensing method. *Fizika Zemli* (4), 96—112 (in Russian).
- Dolgal' A. S., Sharkhimullin A. F.*, 2009. "Gravitational imaging" — a practice ahead of theory. *Geoinformatika* (3), 59—64 (in Russian).
- Kulakov I. Yu.*, 2013. A look at the processes under the volcanoes through the prism of seismic tomography. *Vestnik RAN* 83(8), 698—710 (in Russian).
- Strakhov V. N.*, 2001. Interpretive process in gravity and magnetic — is the implementation of a common approximation approach. I. The basic ideas and design principles. *Fizika Zemli* (10), 3—18 (in Russian).
- Adamia S., Alania V., Chabukiani A., Kutelia Z., Sadradze N.*, 2011. Greater Caucasus (Cavcasioni): a long-lived North-Tethyan back-arc basin. *Turk. J. Earth Sci.* 20, 611—28.
- Koulakov I.*, 2009. LOTOS code for local earthquake tomographic inversion. Benchmarks for testing tomographic algorithms. *Bull. Seismol. Soc. Amer.* 99(1), 194—214.