

**НОВЫЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ОБ ИСТОЧНИКАХ МАГНИТНЫХ АНОМАЛИЙ
В ВОСТОЧНОМ СРЕДИЗЕМНОМОРЬЕ: КЛЮЧ К ЛОКАЛИЗАЦИИ ОФИОЛИТОВ
И ГАББРОИДНЫХ ИНТРУЗИЙ**

М. Рыбаков, В. Гольдшмидт, Дж.К. Холл*, Ж. Бен-Аврахам, М. Лазар*****

Geophysical Institute of Israel, P.O. Box 182, Lod 71100, Israel

** Geological Survey of Israel, 30, Malkhei Israel Street, Jerusalem 95501, Israel*

*** Dept. of Geophysics and Planetary Sciences, Tel Aviv University, Tel Aviv 69978, Israel*

**** The Dr. Moses Strauss Department of Marine Geosciences, University of Haifa, Mount Carmel, Haifa 31905, Israel*

Для установления особенностей расположения магматических пород в Леванте (Восточное Средиземноморье) рассмотрены полученные ранее данные регионального магнитного картирования, результаты гравитационных и петрофизических исследований, а также их интерпретация на тот момент. Вектор магнитного поля Земли в этом регионе имеет низкий наклон, поэтому использовать карту суммарной интенсивности магнитного поля для определения расположения и ориентации в пространстве магнитных тел достаточно сложно. В связи с этим была составлена приведенная к полюсу карта магнитного поля. Совместный анализ магнитных и гравитационных аномалий позволил оценить глубину залегания и размеры магматических тел; в отдельных случаях определить их состав. Надежность и достоверность полученных результатов подтверждается расчетными данными, а также результатами сейсмического изучения и глубинного бурения.

В исследуемом регионе, согласно магнитным данным, были выделены пять областей. В основу их разграничения положены не только формальные результаты по изменению вектора магнитного поля, но и данные по известному (или предполагаемому) геологическому строению территорий. Места близкого совпадения магнитных и положительных гравитационных аномалий соответствуют, вероятно, наличию офиолитовых массивов в северной части региона и магматическим интрузиям основного состава в его южной части. Сильные магнитные аномалии, не связанные с положительными гравитационными аномалиями, вызваны, по-видимому, мезозойскими и кайнозойскими вулканитами в центральной части региона. Отсутствие магнитных аномалий в некоторых районах дает основание предполагать, что здесь нет вулканических или плутонических тел основного состава. В то же время эти данные не позволяют судить о наличии здесь кислого магматизма (гранитов и др.).

Магнитные аномалии, гравитационные аномалии, офиолиты, вулканиты, основные интрузии, Восточное Средиземноморье.

NEW INSIGHTS INTO THE SOURCES OF MAGNETIC ANOMALIES IN THE LEVANT

M. Rybakov, V. Goldshmidt, J.K. Hall, Z. Ben-Avraham, and M. Lazar

The magmatic characteristics of the Levant were investigated by combining recompiled regional scale magnetic maps, revised petrophysical and gravity databases, and previous interpretations. In the study area, the inclination of the Earth's magnetic field vector is low and the total magnetic intensity map is, therefore, difficult to interpret for location and strike of magnetic bodies. Hence, a pole-reduced magnetic map was compiled. The integrated interpretation of magnetic and local gravity anomalies allowed for the estimation of depth and size of magmatic bodies and, in some cases, permitted identification of their composition. Reliability and accuracy of the results were approximated by forward modeling and by comparison with seismic reflection and drillhole data.

The study area was divided into five regions of consistent regional-scale magnetic patterns with more or less distinct boundaries. This was based not only on recognition of formal magnetic patterns but also on correlation with known (or expected) geology. The strong coincident magnetic and positive gravity anomalies probably correspond to ophiolite massifs in the northern part of the study area and basic magmatic intrusions in the southern part. Strong magnetic anomalies, which are not associated with positive gravity anomalies, most likely correspond to Mesozoic and Cenozoic volcanics located mainly in the central part of the region. The absence of magnetic anomalies in some areas suggests the lack of basic magmatic bodies (volcanic or plutonic) but provides no information on the presence of acid magmatics (granite, etc.).

Magnetic and gravity anomalies, ophiolites, volcanics, basic intrusion, eastern Mediterranean

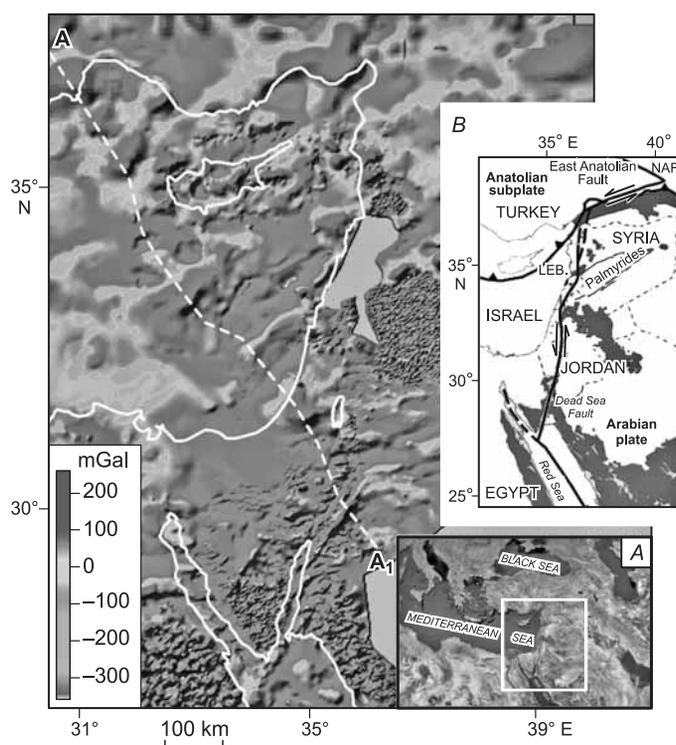
ВВЕДЕНИЕ

Восточное Средиземноморье (рис. 1), часто называемое Левантом, представляет собой небольшую по площади, но имеющую сложное геологическое строение территорию. Эта сложность выражается в интенсивной складчатости и нарушениях структуры (разломы, сдвиги и др.) пород и проявлениях магматизма. Данная территория испытывает сильное воздействие со стороны Африканской, Аравийской и Евразийской плит и тектонического разлома вдоль Мертвого моря — самой активной в регионе границей между плитами. Континентальные подвижки вдоль этого разлома начались, вероятно, в среднем миоцене (около 18 млн лет) [Garfunkel, Ben-Avraham, 1996]. Этот синистральный со смещением пород вдоль простирания разлом, характеризующийся дифференциальным смещением в 100 км [Freund et al., 1970; Garfunkel, 1981], проходит от северного окончания расширяющегося Красного моря, через Эйлат-Акабский залив, Аравийскую долину, Мертвое море и Иорданскую долину до места стыковки в Турции зон конвергенции пород, сформированных на территориях Ливана, Сирии и Тауруса.

Кристаллический фундамент коры Леванта сформировался в течение панафриканского орогенеза в позднем докембрии [Freund et al., 1970]. Уменьшение мощности кристаллического фундамента и наращивание осадочного чехла в северном и западном направлениях к Средиземному морю отвечает условиям пассивной континентальной окраины Аравийско-Нубийской платформы, которые имели место в период триасового—раннеюрского рифтинга. Обширные морские отложения на погружающейся под действием нагрева континентальной окраине продолжались вплоть до среднего миоцена; в настоящее время они составляют значительный объем всей осадочной толщи [Freund, Garfunkel, 1976]. Во время позднемелового и раннекайнозойского периодов небольшое сжатие вдоль северо-западной—юго-восточной оси реактивировало некоторые из прежних нормальных разломов, что в окончательном виде сформировало складчатый пояс Сирийской дуги.

Об отдельных участках изучаемой территории, благодаря геологическому картированию и развитой структуре нефтедобычи, известно многое. Общая геологическая карта региона, показывающая местонахождение осадочных и магматических формаций разного возраста, представлена на рис. 2. В то же время значительные участки территории, особенно прилегающие к Средиземному морю, изучены не столь тщательно. Геологическая изученность промежуточных между палеозоем и ранним мезозоем толщ базируется на незначительном количестве известных обнажений и ограниченном количестве данных, полученных из глубоких нефтяных скважин. Для лучшего понимания глубинных формаций и геологической истории региона желательно опереться на результаты анализа всей совокупности имеющихся геологических данных.

Магнитные и гравиметрические методы играют главную роль в геофизической разведке. Магнитные методы, позволяющие выявить изменения магнитного поля Земли (аномалии) за счет различий в собственном магнетизме пород с высоким и низким содержанием магнетита, широко используются для исследований недр. В ряде случаев эти методы фиксируют уже известные геологические структуры, а также с их помощью обнаруживаются и ранее неизвестные особенности геологического строения. На рис. 1 представлены кривые изменения магнитного поля. Эта карта магнитных аномалий региона дает подробную картину крупномасштабных магнитных аномалий, представляя тем самым надежную основу для их качественной интерпретации. Однако для количественных расчетов использовались исходные данные магнитных наблюдений в воздухе, в море и на суше,



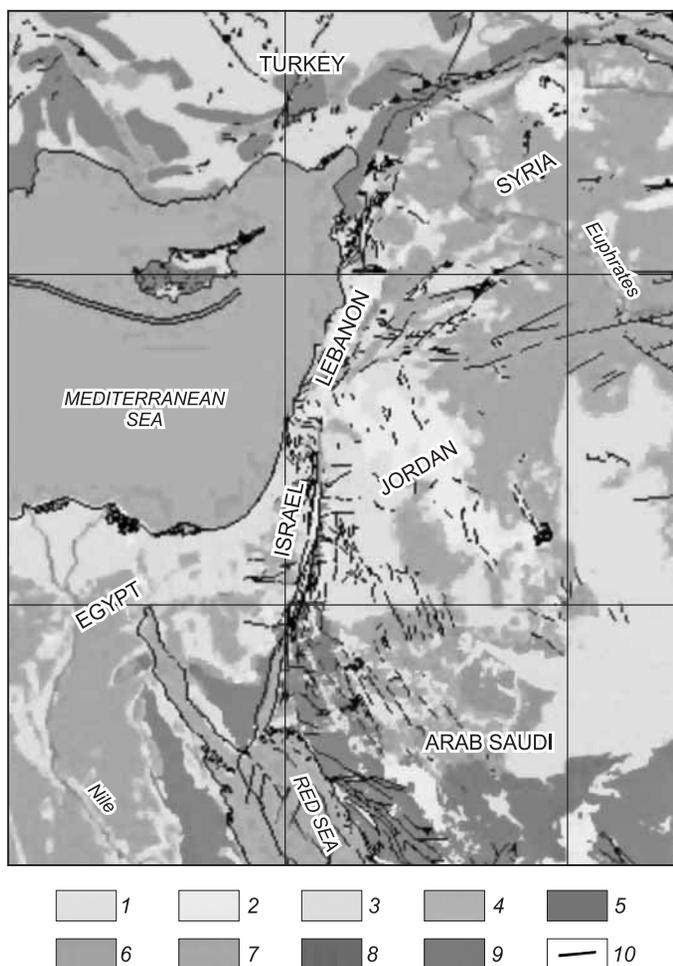
исследований недр. В ряде случаев эти методы фиксируют уже известные геологические структуры, а также с их помощью обнаруживаются и ранее неизвестные особенности геологического строения. На рис. 1 представлены кривые изменения магнитного поля. Эта карта магнитных аномалий региона дает подробную картину крупномасштабных магнитных аномалий, представляя тем самым надежную основу для их качественной интерпретации. Однако для количественных расчетов использовались исходные данные магнитных наблюдений в воздухе, в море и на суше,

Рис. 1. Региональная карта магнитных аномалий Восточного Средиземноморья и прилегающих территорий.

A — географическая позиция района исследования, изображение предоставлено «Google Earth»; *B* — дана упрощенная тектоническая схема района, по [Brew, 2001]. Белая штриховая линия *A-A₁* показывает местоположение суммарного магнитного и гравитационного полей и профиля коры, показанного на рис. 7, сплошная — береговые линии.

Рис. 2. Геологическая карта Леванта, <http://atlas.geo.cornell.edu/projects.html>

1 — позднекайнозойский преимущественно осадочный террейн; 2 — среднекайнозойский преимущественно вулканический террейн; 3, 4 — раннекайнозойский (3) и позднемезозойский (4) преимущественно осадочный террейн; 5 — позднемезозойский плутонический террейн; 6—8 — мезозойский (6), среднепалеозойский (7), раннепалеозойский (8) преимущественно осадочный террейн; 9 — протерозойский метаморфический и/или плутонический террейн; 10 — разломы.



которые помогли более точно определить магнитные градиенты, что дало возможность получить более надежные оценки глубин залегания интересующих объектов.

Ранее полученные результаты количественных расчетов могут быть разделены на две группы. В первую — вошли данные, относящиеся к низкочастотным магнитным аномалиям, обусловленным большими блоками консолидированной коры с различающимися магнитными свойствами. Исходные модели, построенные главным образом на основе профилей сейсмического преломления и значений магнитной восприимчивости, привязывались к уже выявленным блокам для того, чтобы рассчитать их магнитный ответ. Такой подход был применен при изучении магнитных аномалий в Сирии [Al-Saad et al., 1991] и Восточном Средиземноморье [Makris et al., 1994; Ben-Avraham et al., 2002].

Для получения хорошего соответствия между расчетными и наблюдаемыми аномалиями вектор остаточной намагниченности специально несколько раз меняли на противоположный. Следует отметить, что окончательные магнитные модели ни разу не были проверены с помощью бурения.

Данные, вошедшие во вторую группу, свидетельствуют, что вызывающие возмущения магнитного поля объекты являются компактными телами наподобие магматических массивов, поднявшихся к дневной поверхности вместе с блоками кристаллического фундамента. Используя данный подход, авторы работ [Domzalski, 1967, 1986; Folkman, 1976; Rybakov et al., 1995, 2000] провели обработку аэромагнитных данных для территории Израиля. Результаты согласуются с геологическими данными и обычно хорошо сопоставимы с известными проявлениями магматизма. Предметом настоящей работы является анализ всей совокупности как ранее полученных, так и новых данных.

Термин «магнитный фундамент», используемый в статье, относится к верхней поверхности массивных кристаллических пород, имеющих большую по сравнению с осадочными породами магнитную восприимчивость. Часто, но не обязательно, эти породы совпадают с геологическим фундаментом, т.е. поверхностью, ниже которой осадочные породы не встречаются [Integrated..., 2009]. К сожалению, это определение не относилось к карте магнитного фундамента Израиля [Domzalski, 1986], часто используемой в качестве структурной карты докембрия [Cohen, 1988]. Например, сравнивая мощность осадочной толщи и расстояние до кровли магнитного тела, ответственного за самую большую магнитную аномалию в Израиле (Хевронскую), можно предположить, что магматическое тело, по-видимому, прорывает пермско-триасовую страту. По оценкам М. Рыбакова с соавторами [Rybakov et al., 1995], эта магматическая активность имела место в период между поздним триасом и ранней юрой.

Следует заметить, что регион имеет аномально низкие значения теплового потока. Это означает, что граница Кюри расположена более глубоко, чем ожидалось, часто ниже границы Мохо [Erpelbaum, Pilchin, 2006]. Следовательно, магнитные методы следует использовать только для определения глубины расположения подошвы намагниченных тел, которые на первый взгляд кажутся залегающими неожиданно глубоко.

Главным содержанием работы является интерпретация магнитных данных. Поскольку большинство предыдущих исследований были основаны на сейсмических и гравиметрических данных, а ученые редко прибегали к магнитным моделям, настоящая статья призвана заполнить данный пробел.

МЕТОДЫ

Магнитные данные. С целью пересмотра карты магнитных аномалий были использованы все имеющиеся в наличии данные магнитных исследований по Израилю, Сирии, Саудовской Аравии, Египту, Турции и Восточному Средиземноморью. Новая карта была составлена на основе тщательной обработки всех данных, полученных аэромагнитными и морскими службами в регионе. Ранее [Rybakov et al., 1997] магнитные карты Сирии, Иордании, Израиля, Саудовской Аравии и Египта были оцифрованы, чтобы охватить территорию на суше. Для Восточного Средиземноморья, включая Кипр, была использована сводка Дж. Макриса с соавторами [Makris et al., 1994]. В настоящее исследование вошли данные по оцифрованной карте магнитных аномалий Южной Турции [Ates et al., 1999] и результаты по Южно-Аравийской долине [Al-Zoubi et al., 2004], полученные в 2003 г. при ее изучении с небольшой высоты Аэромагнитной службой высокого разрешения (HRAM). Использовались также отдельные данные воздушных и морских магнитных служб, полученные в разный период с помощью съемки местности с разной высоты, с различным разрешением и разной процедурой обработки исходных параметров. Для того чтобы свести все эти разрозненные результаты в единую цифровую базу, в качестве основы была выбрана карта магнитных аномалий Израиля [Rybakov et al., 1994], на которой фиксировалась поступающая информация.

Сначала карта магнитных аномалий Израиля была проверена путем сравнения с рядом протяженных магнитных профилей, записанных вдоль линий преломления сейсмических волн в регионе. После визуального сравнения и корректировки смежных областей расхождения между различными линиями были признаны незначительными. На составленной карте границы между разными источниками были незаметны. В нескольких точках, где показания морской и воздушной магнитных служб можно было сравнить (например, акватория Израиля, Суэцкий и Эйлатский заливы), магнитные данные были проверены. После приведения всех результатов к одному знаменателю сравнение показателей разных служб, нормированных на высоту съемки в 1 км, показало, что расхождение между ними не превышает 15 нТл. Магнитное поле, измеренное вдоль оси север—юг, видимо, не изменяется, подтверждая, таким образом, корректность данных [IGRF, 2009]. Магнитные показатели, снятые на разном расстоянии друг от друга, были перенесены на сетку с размером ячейки в 2 км с помощью минимизирующей исходную кривизну методики. Эта сетка покрыла большую часть Леванта (1040 × 1180 км) кроме Ливана (см. рис. 1) [Rybakov et al., 1997].

Гравитационные данные были взяты из соответствующей базы данных, детально описанной в работе [Rybakov, Al-Zoubi, 2005]. Гравитационная сетка построена с учетом всех имеющихся данных (127 000 точек). Гравитационные значения Буге были составлены с учетом эллипсоида и формулы от 1967 г. и плотности в 2670 кг/м^3 для всех точек на суше. В качестве отправной точки была взята высота уровня моря, для плотности водного массива взято то же значение (2670 кг/м^3). Все гравитационные данные нанесли на сетку с размером ячейки 2 км, при интерполяции использовалась методика, минимизирующая исходную нелинейность в их распределении. Новая гравитационная карта Буге (рис. 3) является самой надежной картой Леванта: главные тектонические особенности здесь показаны. Совместный анализ локальных магнитных и гравитационных аномалий позволил во многих случаях установить состав соответствующих тел, а также получить достоверные оценки глубины их залегания и геометрии.

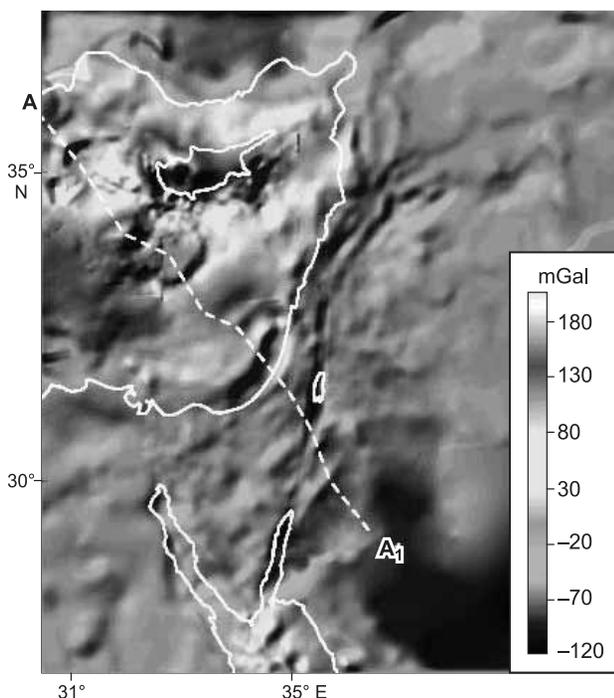


Рис. 3. Гравитационная карта Буге Леванта.

Усл. обозн. см. на рис. 1.

Сейсмические профили. Профили сейсмического отражения и преломления взяты из разных источников (см. ниже). В ряде случаев они оказались полезными при интерпретации гравитационных и магнитных данных.

Петрофизика. Характеристики пород (в обнажениях и на глубине), их привязка к стратиграфии и корреляция с магнитными данными были детально изучены Геофизическим институтом Израиля. В базу данных магнитных исследований вошли более десяти тысяч значений намагниченности пород, измеренных на обнажениях, в проходческих скважинах, кернах и штуфах, взятых из опубликованных работ и других источников [Rybakov et al., 1999a]. База петрофизических данных была дополнена многочисленными неопубликованными материалами по магнитной восприимчивости меловых и кайнозойских базальтов и туфов Северного Израиля, офиолитовых пород Троодосского (Кипр) и Анталийского (Южная Турция) массивов, а также докембрийских магматических пород (кунайский диорит), которые обнажены на восточном склоне трансформы Мертвого моря, недалеко от Лотского монастыря (Иордания). Значения магнитной восприимчивости, опубликованные в работах [Khesin, Feinstein, 2005; Khesin et al., 2005], а также предоставленные А.С. Аль-Зуби, были проанализированы.

Намагниченность породы (I), которая проявляет себя в магнитных аномалиях, определяется своей магнитной восприимчивостью (κ) и намагничивающим полем; κ зависит в основном от содержания в породах магнетита. Взаимосвязь между намагниченностью, обусловленной обычным внешним магнитным полем (H) и наведенной намагниченностью (J_i), выражается соотношением $J_i = \kappa \times H$. Некоторые породы (обычно базальты) имеют сильную остаточную намагниченность, вызванную еще древним магнитным полем. Остаточную намагниченность часто относят к «магнитной памяти», она может значительно отличаться от наведенной намагниченности. Отношение остаточной намагниченности к наведенной непосредственно выражается через отношение Кенигсбергера (Q). Для отношений больших 1.0, типичных для базальтов, вектор остаточной намагниченности вносит основной вклад в общую интенсивность намагниченности.

Однако для большинства пород на Земле $Q < 0.3$, при этом вектор их намагниченности в подавляющем числе случаев ориентирован параллельно вектору нормального магнитного поля Земли [Логачев, Захаров, 1979]. Отношение между остаточной и наведенной намагниченностями, измеренное на образцах юрских вулканитов и рассчитанное М. Рыбаковым с соавторами [Rybakov et al., 1999b], оказалось в диапазоне 0.03—0.3. Это дает основание предполагать, что магнитные аномалии, вызванные такими телами, зависят преимущественно от наведенной намагниченности. Анализ карты магнитных аномалий Израиля говорит в пользу того, что большинство из них имеет характеристики, присущие нормальному наведенному геомагнитному полю. Однако остаточная намагниченность раннемелового рамоновского базальта, измеренная Дж. Гвиртцманом и Р. Вейнбергером [Gvirtzman, Weinberger, 1994], превышает наведенную намагниченность ($Q = 6—15$). Остаточная намагниченность для таких случаев должна учитываться при моделировании и анализе. Тем не менее карта магнитных аномалий Израиля [Rybakov et al., 1994] дает основание предполагать, что большинство магнитных аномалий имеют характеристики нормального наведенного магнитного поля; магнитные особенности, соответствующие магнитным телам в Израиле, имеют отрицательную аномалию к северу от положительной. При моделировании учитывалась, таким образом, наведенная намагниченность. Остаточная же намагниченность ввиду отсутствия данных не рассматривалась.

В дополнение к непосредственным измерениям магнитной восприимчивости были собраны многочисленные оценочные данные значения этого параметра, как и величины глубин, полученные из количественной обработки магнитных данных [Allan et al., 1964; Interpretation report..., 1969; Faris et al., 1967; El-Hakim, Nakhla, 1970; Phillips, 1970; Khatlab, 1974; Маловицкий, Осипов, 1975; Ben-Avraham et al., 1976, 1980; Folkman, 1976, 1981; Comprehensive..., 1980; Sabri, 1981; Report..., 1984; Domzalski, 1986; Ginzburg, Ben-Avraham, 1986; Frieslander, Ben-Avraham, 1989; Gvirtzman et al., 1990; Meshref, 1990; Alami et al., 1991; Al-Saad et al., 1991, 1992; Processing..., 1991; Ibrahim et al., 1993; Ghazala, 1994; Gvirtzman, Weinberger, 1994; Makris et al., 1994; Rybakov et al., 1995, 1999a, 2000, 2009; Segev et al., 1995, 1996, 2000; Ates et al., 1997; Al-Zoubi, Ben-Avraham, 2002; Bilim, Ates, 2003; Ergiin et al., 2003; Eppelbaum et al., 2004a,b; Khesin, Feinstein, 2005; Khesin et al., 2005]. Анализ данных по магнитной восприимчивости пород докембрийского кристаллического фундамента, измеренных через породы плейстоценового возраста, дает основание полагать, что осадочные породы имеют низкие магнитные свойства и поэтому не вносят существенного вклада в большинство магнитных аномалий. Это также означает, что осадочный чехол является магнитно-прозрачным и не экранирует магнитную аномалию, вызванную глубинным магнитным телом.

Магнитная восприимчивость пород кристаллического фундамента в отличие от осадочных изменяется в широком диапазоне. Данные говорят о низкой намагниченности докембрийских гранитов, магматитов, гнейсов и сланцев ($n \times 10^{-4} — n \times 10^{-3}$ ед. СИ). Такая же намагниченность была установлена для метаморфического сланца, до которого на глубине 6.093 м дошла скважина Хелец Дип-1А. Эти дан-

ные подтвердились в результате сравнения геологических и аэромагнитных карт, в которые вошли обнажения пород в южной части Синайского полуострова и Восточной пустыни Египта [Folkman, Assael, 1981; Western Atlas..., 1989].

Намагниченность известково-щелочных и щелочных докембрийских комплексов имеет значения от средних до высоких ($n \times 10^{-3}$ ед. СИ); для магматических пород основного состава типичны высокие магнитные свойства ($n \times 10^{-2}$ — $n \times 10^{-3}$ ед. СИ).

Породы офиолитовых формаций (серпентинитов, перидотитов, габбро) имеют аномально высокую магнитную восприимчивость ($n \times 10^{-2}$ ед. СИ). Объединив данные о плотности пород, измеренной непосредственно на образцах, с результатами, полученными на основе гравитационных исследований, И.Г. Гасс и Д. Массон-Смит [Gass, Masson-Smith, 1963] оценили объемную плотность глубинных ультраосновных пород (3.3 г/см^3), приповерхностных ультраосновных пород (2.9 г/см^3), пород расслоенного интрузивного комплекса (2.77 г/см^3), подушечных лав (2.65 г/см^3) и полностью гидратированного серпентина (2.55 г/см^3). Средняя плотность офиолитовых пород не меньше 3 г/см^3 . Многочисленные примеры из практики гравитационных и магнитных служб позволяют предполагать, что офиолиты являются причиной уникально-высокого совпадения гравитационных и магнитных аномалий.

Мезозойские вулканические формации (раннеюрские вулканиты Ашера, позднеюрские вулканиты Дебораха, раннемеловые вулканиты Таяссира и Позднемеловые вулканиты Кармеля) составляют другую группу пород с сильными магнитными свойствами. По оценкам, средняя магнитная восприимчивость этих пород и кайнозойских вулканитов находится в диапазоне 0.02 — 0.03 ед. СИ [Rybakov et al., 1999b].

Отношение Кенигсбергера, измеренное на образцах из вулканических нект Ашера и Дебораха, находится в пределах 0.03 — 0.3 . Это означает, что магнитные аномалии, вызванные такими вулканитами, определяются в основном нормальным магнитным полем.

Из сравнения данных по магнитной восприимчивости (срезы и керны) и плотности коротажа нефтяных скважин Дебора 1, Ашер Атлит и др. было установлено, что это породы мезозойских вулканических формаций, так как они состоят в основном из туфов, имеют средние плотности, примерно равные или более низкие, чем плотности окружающих пород. Это иллюстрируют данные по плотностям и магнитным свойствам скв. Ашер Атлит 1 (рис. 4). Следовательно, эти породы не могут быть источником наблюдаемых положительных гравитационных аномалий (см. рис. 3). Такой вывод противоречит данным гравитационной и магнитной карт района Кармеля. Гравитационное поднятие и сильные магнитные аномалии на этих картах совпадают (см. рис. 1, 3). Данный случай был детально изучен, и это позволило предположить [Rybakov et al., 2000], что гравитационные аномалии Буге отвечают только колебаниям мощности осадочной толщи, соответствующей сенонскому и третичному периодам. При изучении геологических структур, предшествующих сенону, этот эффект из гравитации Буге был удален, в результате чего выступаю-

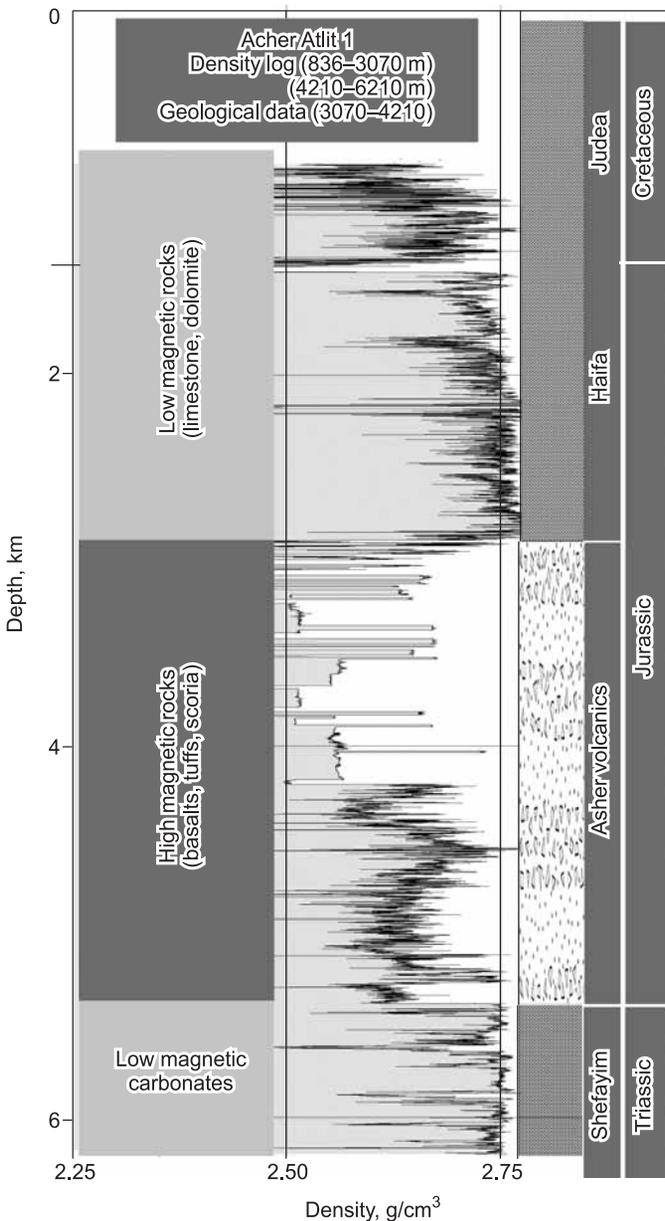


Рис. 4. Объединенный геологический и геофизический разрез пород, пройденных скважиной Ашер Атлит 1.

Высоконамагниченные вулканиты характеризуются низкой плотностью.

щее поднятие Кармеля, ясно видимое на гравитационной карте Буге, на новой карте полностью исчезло. Это дает основание полагать, что относительно положительная гравитационная аномалия вызвана мощными толщами молодых осадков низкой плотности и, следовательно, не может быть отнесена за счет присутствия магматических пород высокой плотности. Вышеприведенные (см. рис. 4) данные по магнитным свойствам и плотности скв. Ашер Атлит 1 подтвердили данное объяснение. Совместный анализ большой Хевронской магнитной аномалии и гравитационных данных Буге также позволял предполагать отсутствие тела с высокой плотностью [Rybakov et al., 1995].

Обобщая петрофизические данные, которые были использованы для установления состава вызывающих магнитные аномалии глубинных тел, можно сказать следующее:

— близкое совпадение магнитных и положительных гравитационных аномалий отвечает, возможно, присутствию офиолитовых массивов в северной части исследуемой территории или магматических интрузий основного состава в южной ее части;

— сильные магнитные аномалии, не совпадающие с положительными гравитационными аномалиями, отвечают, наиболее вероятно, мезозойским и кайнозойским вулканитам, расположенным в основном в центральной части региона;

— остаточная намагниченность, по-видимому, не оказывает существенного влияния на ориентацию общего магнитного поля;

— отсутствие магнитных аномалий в некоторых областях дает основание считать, что здесь нет магматических тел основного состава (вулканического и плутонического генезиса); однако эти данные не могут быть индикатором присутствия или отсутствия кислых магматических пород (гранитов и др.).

Обработка данных. Анализ магнитных и гравитационных данных был проведен в ходе их совместной обработки, которая включала в себя модифицированные преобразования потенциальных полей, 3D прямую гравитацию и магнитное моделирование, инверсионные схемы и эксклюзивное построение изображений. Для качественного и количественного анализа были использованы различные пакеты программ для обработки и графического представления данных.

Качественная обработка проведена с целью установления характерных особенностей объектов исследования, их расположения в пространстве и предварительной геологической идентификации. С целью усиления разных частотных компонентов были задействованы ряд фильтрующих методик: регионально-остаточное гравитационное смещение; горизонтальные и вертикальные производные гравитационного и магнитного полей; вертикальное продолжение магнитного поля; псевдогравитационная и гравитационно-магнитная корреляция; приведение к полюсу (RTP).

Вследствие низкого наклона вектора магнитного поля Земли в Восточном Средиземноморье, пользуясь общей картой магнитной интенсивности (ТМІ), сложно определить местонахождение и простирающиеся магнитных тел. Магнитная аномалия, полученная путем расчета для тела, намагниченного стандартным геомагнитным полем, состоит из сопряженных максимумов и минимумов (последние имеют направления к северу) (рис. 5, А). Такое расчетное построение важно для геологической интерпретации картин экспериментально наблюдаемых магнитных аномалий. Магнитные максимумы смещены относительно местоположения соответствующих пород. При этом магнитные аномалии, протяженные вдоль оси север—юг, ослабляются, а вдоль оси восток—запад усиливаются. Таким образом, случайно распределенные, обладающие магнитными свойствами породы могут вызвать магнитные аномалии в восточно-западном направлении. Чтобы избавиться от искажений, вызванных малым значением широты магнитных наблюдений, ТМІ сетка была перестроена с помощью приведенной к полюсу методики (RTP). RTP устраняет асимметрию магнитных аномалий, вызванную их ориентацией, и позволяет пространственно их совместить с соответствующим геологическим объектом (телом). Таким образом, измерения, которые были проведены при реальном для данной местности наклоне магнитного поля Земли, приводятся к тому виду, какой они должны бы были иметь при строго вертикальном направлении силовых линий магнитного поля (см. рис. 5, В). Методика RTP дает магнитную карту, более адекватно отражающую объективную геологию местности [Bilim, Ates, 2003].

Следует отметить, что в случае установления высокоплотных и обладающих магнитными свойствами магматических пород имеет место лучшая корреляция между RTP и гравитационными аномалиями (см. рис. 5, С, D). Эта корреляция широко использовалась для определения состава пород тел, вызывающих аномалии.

Для расчета RTP аномалий необходимо измерить наклон, склонение и интенсивность магнитного поля Земли. Значения этих параметров были взяты из [IGRF, 2009] с привязкой к координатам территории 35° в.д., 34° с.ш. (на период 1980 г.). Предполагалось, что уровни остаточного магнетизма в сравнении с наведенным были незначительными. Общая интенсивность магнитного поля Земли составляет 44763 нТл, наклон — 49.6° и склонение — 2.7°. RTP аномалии были рассчитаны на основе ТМІ сетки.

RTP преобразование было приложено ко всей площади исследуемого региона. На рис. 6 представлена новая карта пространственного распределения намагниченных тел, которая дает шаг вперед к лучшему пониманию геологии Восточного Средиземноморья (таблица).

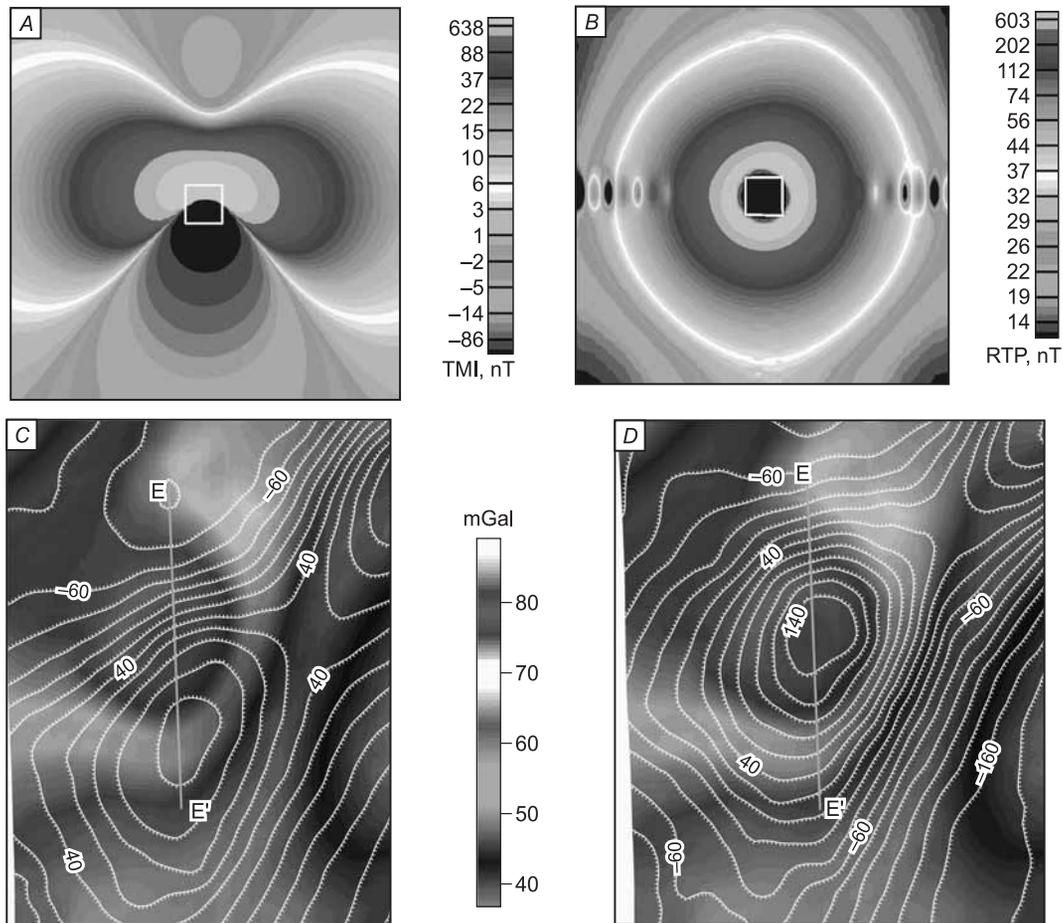


Рис. 5. Приведенное к полюсу (RTP) преобразование.

A — учитывающая все источники интенсивности расчетная магнитная аномалия (использована программа MAGPOLY [Godson, 1983]) для суммарной интенсивности магнитного поля Земли в 44 763 нТл, наклоне 49.6° и склонении 2.7°; *B* — приведенная к полюсу магнитная аномалия, белый прямоугольник на обеих фотографиях показывает местоположение тела, вызывающего возмущения полей; *C, D* — гравитационная карта Буге отдаленного от берега Йонахского магматического массива [Folkman, Ben-Gai, 2004] с наложенной на него магнитной картой суммарной интенсивности (*C*) и приведенного к полюсу преобразования этой карты (*D*), линия *E—E'* показывает профиль сейсмического отражения, представленного на рис. 11. Интервал между контурами равен 2 нТл. Примеры для расчетных и реальных ситуаций показывают, что аномалии, полученные с помощью процедуры приведения к полюсу, совпадают с гравитационными данными и позволяют лучше очертить скрытые под поверхностью магматические тела в районах с низким значением широты. Иллюстрируется важность RTP преобразования. Из сравнения расчетных ТМИ и RTP карт (части *A, B*) можно предполагать, что процедура RTP позволяет лучше определить контуры тела возмущающего поля. RTP карта обеспечивает хорошую корреляцию магнитного тела с данными гравитации в море (части *C, D*), наблюдаемой в окрестности морского Йонахского магматического тела [Folkman, Ben-Gai, 2004].

Результаты позволяют по-новому взглянуть на магматизм и тектонику данного региона. Наиболее интересно следующее:

- количество и величина негативных аномалий существенно уменьшаются, в то время как величина положительных аномалий увеличивается (ТМИ и RTP, см. рис. 5, *A, B*);
- некоторые большие отрицательные ТМИ аномалии преобразовались в положительные (тело 30 в Северном Израиле, тело 25 в акватории Ливана и тела 14, 16 и 17 в акватории Северного Кипра (см. рис. 6));
- в нескольких точках максимумы ТМИ и RTP совпадают (тело 21 в Сирии и тела 40—42 в Центральном Синае (см. рис. 6));
- RTP аномалии более четко показывают особенности магнитных полей: северная часть региона характеризуется случайно распределенными магнитными телами, тогда как в южной части они образуют линейные структуры (см. рис. 6).

RTP сетка не использовалась при количественной обработке данных, так как ее разрешение в два раза меньше картины исходных магнитных данных. Первое сглаживание в распределении данных про-

**Компиляция магнитных источников в Леванте (местоположение, глубина и состав),
основанная на анализе опубликованных работ и неопубликованных внутренних отчетов,
состоящих из количественных магнитных интерпретаций**

Номер на рис. 6	Название	Координаты, град.		Глубина, км	Глубина ос- нования, км	Порода	Источник
		в.д.	с.ш.				
1	Ангалия	30.3991	36.7037	Обнажение (4)*	1.6	Офиолит	[Blumenthal, 1963]
2	Караман	32.1663	36.4874	Обнажение	1.8	»	»
3	Мерсин	35.5344	36.9331	Обнажение (2)	2.2	»	[Erentöz, Ternek, 1962]
4	Гоксун	39.9231	37.1349	3	0.4	»	[Tarhan, 1984]
5		38.9057	35.0040	4	6.2	Основной интрузив	[Al-Saad et al., 1991]
6		37.7348	36.3623	3	4.8	»	[Al-Saad et al., 1992]
7		40.1658	36.1107	2	3.6	Офиолит	[Настоящая работа]
8		31.0496	36.1383	3	5.6	»	[Ergün et al., 2003]
9		31.5381	35.6253	3	5.4	»	»
10	Тродос	32.2553	35.4618	Обнажение (3)	5.2	»	[Gass, Masson-Smith, 1963]
11	»	32.8485	34.7522	»	5.1	»	»
12	»	33.5547	35.2220	Обнажение	2.8	»	»
13	»	33.1312	35.0463	Обнажение (1.5)	4.1	»	»
14		34.4813	35.6686		2.9	»	[Настоящая работа]
15	Хатай	36.1412	36.3071	Обнажение (1.5)	3.0	»	[Tolun, Erentöz 1962]
16	Баер-Бассит	36.1327	35.5251	Обнажение	3.8	»	[Поникаров и др., 1967]
17		36.0982	35.2148		2.0	»	[Настоящая работа]
18		38.1429	35.4828	2	4.7	Основной интрузив	[Al-Saad et al., 1991]
19	Пальмира	37.4564	34.0773	3	8.6	»	[Al-Saad et al., 1992]
20		35.4512	34.5814	4	7.4	Вулканиты	[Настоящая работа]
21	Никлас	32.2499	33.9639	7	12.3	Офиолит	[Rybakov et al., 2005]
22	Эратосфен	32.8212	33.5402	6	11.1	Вулканиты	[Ben Avraham et al., 1976]
23		34.8527	33.4609		9.3	»	[Настоящая работа]
24	Йонах	33.9298	32.5891	5	6.9	»	[Folkman, Ben Gai, 2004]
25		40.1893	34.7242	10 (?)		Основной интрузив	[Brew, 2001]
26	Гилбоа	35.4832	32.6089	1.2	6.5	»	[Настоящая работа]
27	Кармел	34.9756	32.9366	2	6.6	Вулканиты	[Gvirtzman et al., 1990]
28	Галил	35.7251	33.0326		7.1	»	[Настоящая работа]
29	Ирбид	35.9865	32.5016	4	5.2	»	»
30	Хеврон	34.7756	31.8410	4	5.3	»	[Rybakov et al., 1995]
31		32.3497	31.5550				[Настоящая работа]
32	Ариф	34.7299	31.0047	Обнажение	3.7	Основной интрузив	[Segev et al., 1996]
33	Фейнан	35.7050	30.8486	1	2.5	»	[Comprehensive..., 1980]
34		36.2354	30.7527	3	3.9		[Настоящая работа]
35	Северо-Восточ- ный Йаалак	32.3899	30.1913		1.8		»
36	Тамада	33.4515	29.8686		2.1	Основной интрузив	»
37	Накхел	34.0958	29.7635	2	1.3	»	[Domzalski, 1986]
38	Тимна	34.8784	29.7372	Обнажение (1)	-0.1	»	[Segev et al., 1995]
39	Маан	35.6508	30.1395	Обнажение (2)	1.1	»	[Comprehensive..., 1980]

Номер на рис. 6	Название	Координаты, град.		Глубина, км	Глубина основания, км	Порода	Источник
		в.д.	с.ш.				
40	Джафр	36.3970	29.7884	3	2.6	Основной интрузив	[Comprehensive..., 1980]
41		31.5767	29.9677	Обнажение (3)	1.9	»	[Bartov, 1994]
42		31.3046	27.3581		1.9		[Настоящая работа]
43		31.5845	28.7666		2.0		»
44		32.1585	28.9233		1.3		»
45	Умм Богма	33.6526	28.9592		1	-0.1	Основной интрузив
46	Восточная Шаира	34.4171	28.9964	0.5	-1.2	»	[Ghazala, 1994]
47	Тиран	34.5230	28.0438		3.3	»	[Настоящая работа]
48	Север Красного моря	34.8410	27.1023	2.5	4.0	»	»

Примечание. Координаты представляют собой центры тел (ответственных за магнетизм). Глубины тел (глубина до верхнего края отвечающих за магнетизм пород) указана в километрах до среднего уровня моря. Значения глубин оснований взяты из структурной карты кристаллического фундамента [Rybakov, Segev, 2004]. Большинство тел, описанных в настоящем исследовании, безмянны, и их глубины и составы не всегда известны.

* Частично обнаженный массив, где число в скобках означает глубину основания (км) магматического тела.

исходит при нанесении наблюдаемых магнитных значений на ТМІ сетку. Двойное сглаживание реальной картины магнитных данных приводит к уменьшению амплитуд и градиентов магнитных аномалий. Поэтому ТМІ данные, полученные вдоль воздушных линий, морских путей, и магнитные профили суши в процессе количественной обработки анализировались непосредственно, что способствовало лучшей делинеаризации магнитных градиентов и обеспечило более надежную и точную оценку глубины залегания магнитных тел.

Количественная обработка данных была проведена с помощью двух автоматических инверсионных методов — особых точек [Трошков, Грознова, 1984] и деконволюции Вернера [Li, 2003]. Их использование необходимо для повышения разрешения при определении глубины залегания объектов, обладающих магнитными свойствами. В сравнении с деконволюционным методом Вернера, метод особых точек известен не столь хорошо. Последний позволяет рассчитывать неоднородности скрытых под поверхностью Земли неоднородностей магнитного поля и плотности (особые точки) и эффективные параметры при отсутствии геологических данных. С помощью его можно также рассчитать смещения и эффективные параметры вектора намагниченности (его наклон, склонение и величину, которые зависят от магнитной восприимчивости и формы магнитного тела).

На рис. 7 представлены магнитные и гравитационные данные, полученные вдоль оси север—юг, пересекающей самую крупную в Израиле Хевронскую магнитную аномалию [Rybakov et al., 1995], а также скрытые

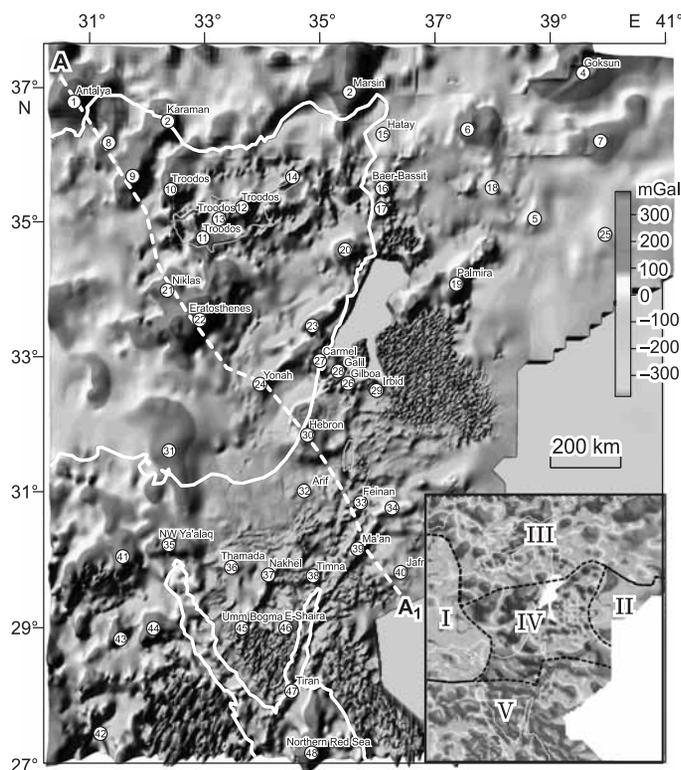


Рис. 6. RTP карта Леванта.

Усл. обозн. см. на рис. 1. Цифры в кружках соответствуют установленным магнитным телам (см. таблицу). На вставке обозначены районы (I—V), имеющие схожие картины распределения магнитного поля (пояснения см. в тексте).

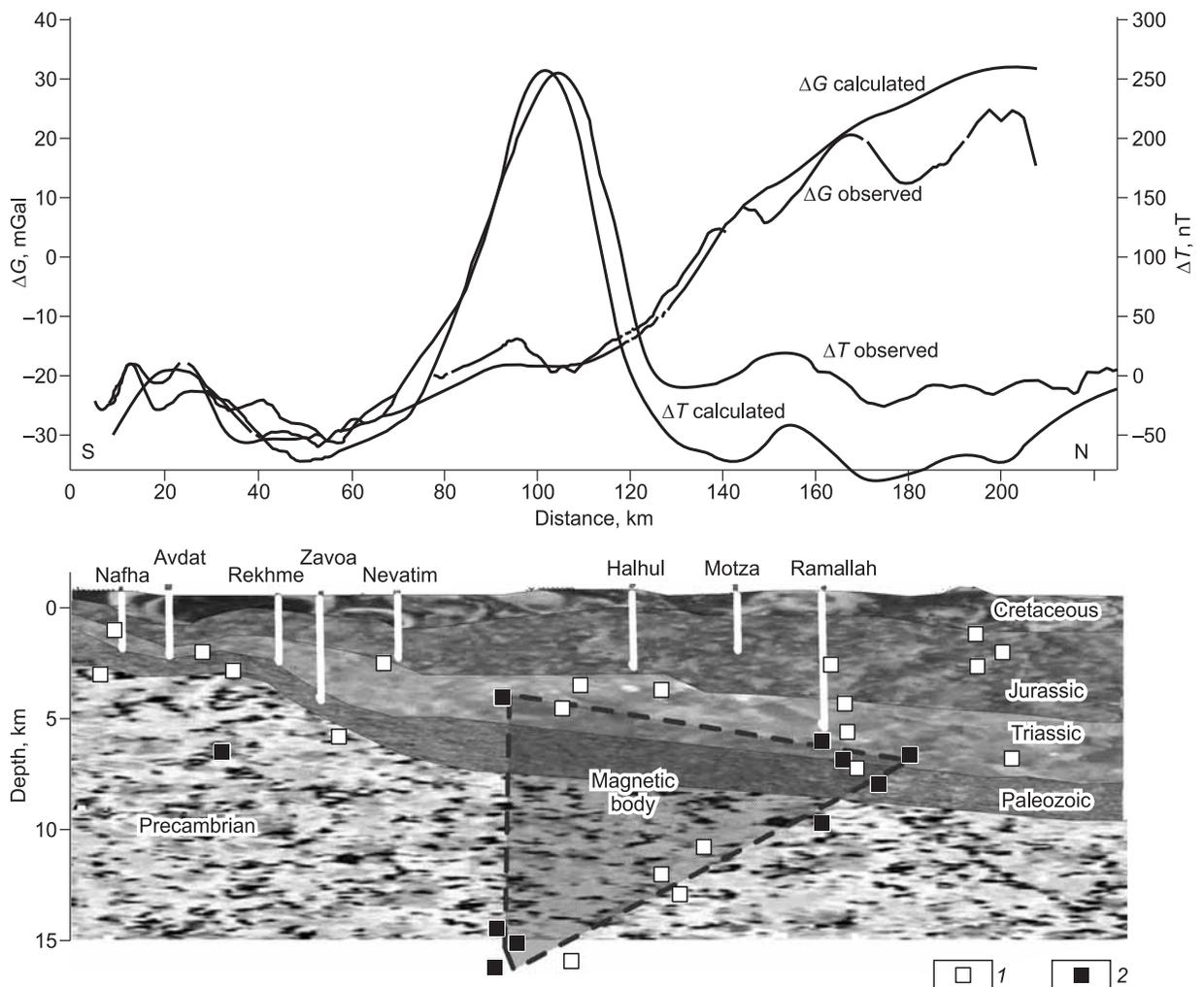


Рис. 7. Результаты автоматической инверсии (метод особых точек) и наилучший подбор согласованных магнитных и гравитационных данных, полученных вдоль северо-южной линии, пересекающей главную Хевронскую магнитную аномалию Израиля, по [Rybakov et al., 1995].

1 — находящиеся под дневной поверхностью неоднородности плотности пород; 2 — неоднородности магнитного поля. Высокая плотность точек свидетельствует о верности решения.

под дневной поверхностью неоднородности магнитного поля и плотности, определенные с помощью метода особых точек. Как и ожидалось после просмотра исходных данных, скрытый под дневной поверхностью континуум имеет большее количество точек, соответствующих неоднородностям плотности пород, чем их магнитным характеристикам, хотя в общем эти два распределения более или менее совпадают. Для большинства точек рассчитанные наклоны эффективной намагниченности имеют те же значения, что и существующее на данный момент общее магнитное поле. Полученные значения магнитной восприимчивости составляли 0.01—0.06 ед. СИ. Магнитная восприимчивость многих образцов основных пород Израиля находится примерно в этом диапазоне [Rybakov et al., 19996]. Наборы множества особых точек использованы при сборе и первичной итерации данных в процессе построения моделей (см. рис. 7). Моделирование дает наилучшее соответствие между магнитными и гравитационными данными, полученными вдоль северо-южной оси Хевронской магнитной аномалии. Приложение геофизической модели к геологии района, изученной с помощью сейсмического отражения и бурения, позволило определить позицию тел магматических пород Хеврона (см. ниже).

Быстрая предварительная оценка результатов была проведена с помощью программы 2D моделирования, разработанной М. Рыбаковым [Rybakov, 1992]. Однако для построения окончательной модели и определения достоверных интервалов параметров магнитных объектов потребовалось дополнительное программное обеспечение. Данные по изометрическим аномалиям обрабатывались с помощью метода, описанного в работах [Godson, 1983; Phillips, 1997]. Магнитные данные были интерпретированы,

исходя из предположения, что общий вектор намагниченности совпадал с вектором общего магнитного поля Земли.

Глубины залегания магнитных источников (см. таблицу) были рассчитаны методом полуширины [Логачев, Захаров, 1979]. Результаты, полученные на основе параметров магнитных и гравитационных полей с учетом глубин залегания магнитных тел (см. таблицу), не могут считаться абсолютно верными. Полученную картину распределения аномалий следует рассматривать как одно из возможных решений соответствия расчетных и реальных магнитных неоднородностей. Точность и надежность параметров модели находятся в сильной зависимости от верности исходной модели и характера ее изменения. Рассчитанные значения глубин залегания магнитных тел следует рассматривать как приблизительные оценки. Исходя из реальных оценок параметров магнитного тела, при этом сводя к минимуму величину расхождения между наблюдаемой и рассчитанной аномалиями, точность определения глубины магнитного тела составляет около 20 %. Эта цифра была проверена путем обработки данных по магнитным аномалиям от обнаженных магматических массивов основного состава в Южном Синае. В целом форма магнитных тел наиболее ясно видна в плоскости их пересечения с дневной поверхностью, в отличие от скрытых частей массива пород. Предполагаемая в модели относительно простая геометрия тел может быть изменена в сторону усложнения с помощью экстраполяции его формы набором полигональных призм (типа пирамид), которая дала бы более обтекаемую форму тела. Однако разница в местоположении аномалий, установленных с помощью простой и более сложной моделей, очень мала.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Сравнение магнитной и геологической карт (см. рис. 1, 2) показывает, что как и во многих других частях мира, магнитные аномалии в Леванте прямо коррелируют с обнажением докембрийских кристаллических пород на юге (Западная пустыня Египта, Синайский полуостров и Северо-Западная Саудовская Аравия), с мезозойскими магматитами в центральной части, офиолитами на севере и кайнозойскими базальтами вблизи Сирийско-Иорданской границы. Для других районов такая корреляция отсутствует. Таким образом, интересно изучить информацию, предоставляемую магнитными исследованиями, для выяснения геологических особенностей соответствующих районов.

Пространственное распределение магнитных тел, установленное с помощью RTP преобразования, представлено на рис. 6, 8. Они имеют по району случайное распределение, которое не совпадает с четкими крупномасштабными особенностями на гравитационных картах (см. рис. 3). Региональные гравитационные аномалии связаны, наиболее вероятно, с особенностями континентальной коры, тогда как магнитные аномалии отражают более мелкие структуры, обусловленные локальными магнитными неоднородностями в районах моря и островов. Однако, принимая во внимание такие моменты, как особый рельеф местности, геометрическую конфигурацию, характерные тенденции, присутствие или отсутствие аномалий особого типа и т.д., территория исследования может быть разделена на пять районов, имеющих свои характерные картины распределения магнитных полей и более или менее четкие границы. Разумеется, что в основе такого районирования магнитных тел лежит не только абстрактная магнитная картина, но и привязка к уже известным или предполагаемым особенностям геологического строения.

Район I (см. рис. 6). Западная граница района I совпадает с субмеридиональным линеamentом, который по гравитации Буге отделяет его от района II региональным отрезком в 40 мГал. Этот линеament, названный Эратосфенской тектонической зоной (ETZ) [Woodside, 1977], соответствует ступеньке на границе Мохо величиной около 3 км и разделяет бассейны Геродота и Леванта [Woodside, Bowin, 1970; Woodside, 1991]. Следует отметить, что ETZ расположена примерно в 100 км западнее Эратосфенской морской горы. По оценкам Дж. Макриса и Дж. Ванга [Makris, Wang, 1995], высота этой ступеньки Мохо около 5 км. ETZ характеризуется также протяженным субмеридиональным повышением гравитации в свободном воздухе, максимум магнитуды которой достигает 60 мГал на $\sim 34^\circ$ с.ш. В региональном масштабе это гравитационное поднятие является северным продолжением значительной аномалии в свободном воздухе, соответствующей конусу выноса Нила. Его мощная осадочная толща покрывает тело 31 (см. рис. 6). Авторы работ [Woodside, 1977, 1991; Nur, Ben-Avraham, 1978] выделили ETZ как основной разрыв коры в Восточном Средиземноморье, который тянется вдоль север-северо-западного направления от Египта до Флорентийского поднятия между 31° и 32° в.д. По мнению Дж. Маскля с соавторами [Mascle et al., 2000], этот фундаментальный разрыв относится к западной части Левантийско-Синайской плиты.

В районах I или II не обнаружено никаких существенных магнитных аномалий; их источники обладают либо слабыми магнитными свойствами, либо находятся на большой глубине. Этот факт можно объяснить отсутствием заметных процессов магматизма в течение длительного периода геологической истории этих районов. Из региональных карт земного магнетизма [Маловицкий и др., 1982; Makris et al., 1994] можно видеть, что такая картина типична почти для всего Восточного Средиземноморья, по край-

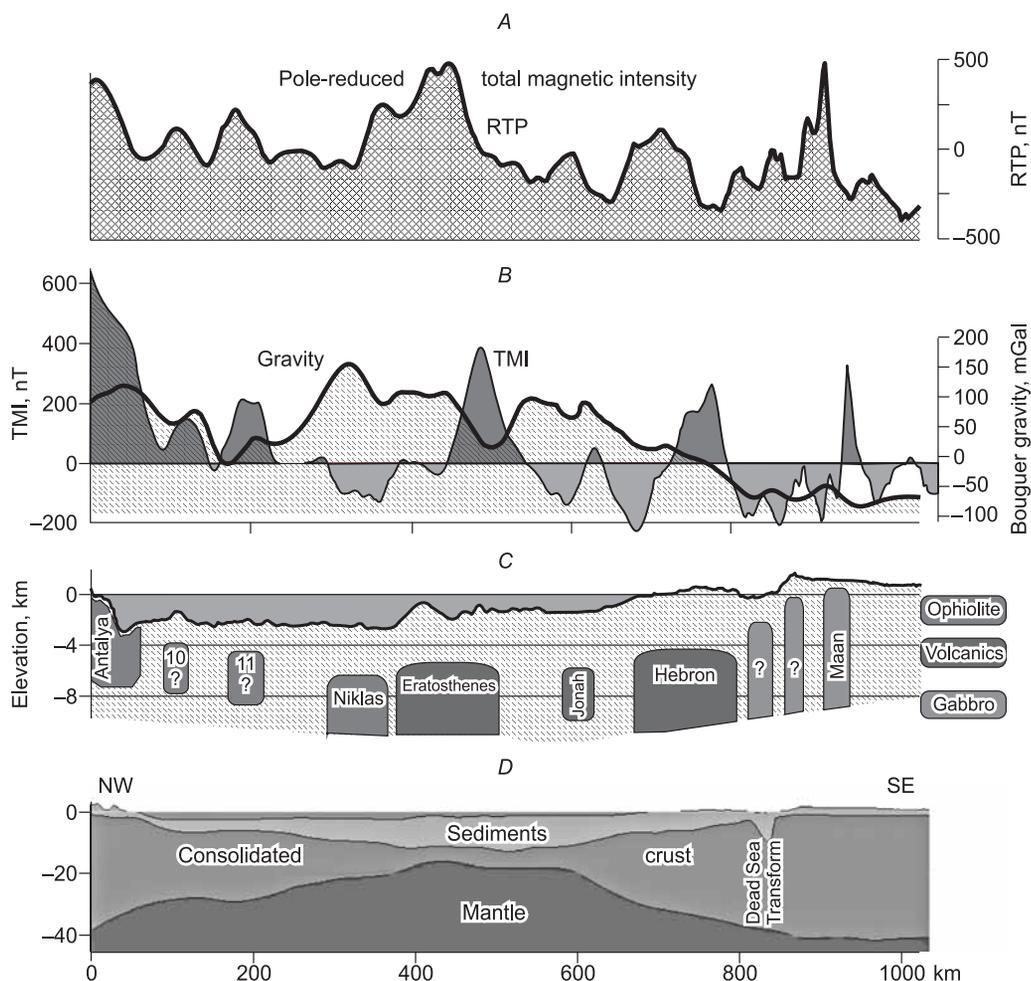


Рис. 8. Источники магнитных аномалий, наложенные на региональные магнитный, гравитационный и геологический профили вдоль линии А—А₁ (см. рис. 1, 3).

A — приведенное к полюсу магнитное поле, *B* — амплитуда гравитационного поля Буге (жирная линия) и общего магнитного поля, следует отметить лучшее соответствие между локальной гравитацией и RTP аномалиями; *C* — местоположение магнитных тел в верхней части земной коры (пояснения см. в тексте). Вертикальное увеличение $\times 10$; *D* — схема разреза литосферы Леванта, составлена на основе базы данных Института континентальных исследований Корнельского университета (<http://atlas.geo.cornell.edu/projects.html>) с учетом новой информации. Вертикальное увеличение $\times 4$.

ней мере, до Крита. Оценивая глубину залегания немногих магматических тел, потенциально обладающих магнитными свойствами, Я.П. Маловицкий, Г.В. Осипов [1975] предположили, что они перекрыты мощным (более 10 км) осадочным чехлом.

Район II (см. рис. 6). Похожая картина магнитного поля (т.е. отсутствие магнитных аномалий) наблюдается в восточной части Иордании и в Юго-Восточной Сирии. В районе II наблюдаются несколько широких поднятий и понижений магнитного поля. Принимая во внимание относительно невысокую глубину фундамента (5—6 км) [Brew et al., 1997; Rybakov, Segev, 2004], причиной этих аномалий являются постепенные изменения кристаллических пород. Следует заметить, что гравитационные картины районов I и II принципиально различны (см. рис. 3). Западный район находится в области высокой плотности Средиземноморской океанической коры, гравитация Буге которой достигает +200 мГал, тогда как в восточном районе (Арабская плита) плотность континентальной коры ниже, отрицательные значения гравитации здесь достигают −150 мГал.

Дополнительные районы. На магнитной картине остальных частей региона есть много сильных магнитных аномалий (см. рис. 1), отвечающих крупномасштабным магматическим телам (см. рис. 6). В пределах этих магматических провинций различия не так заметны, как между вышерассмотренными районами I и II и остальной частью региона. Взаиморасположение этих областей и установление их границ (см. рис. 6) произвольны и базируются на сравнении с известными тектоническими особенностями и картиной магнитных аномалий. С севера на юг можно выделить три района:

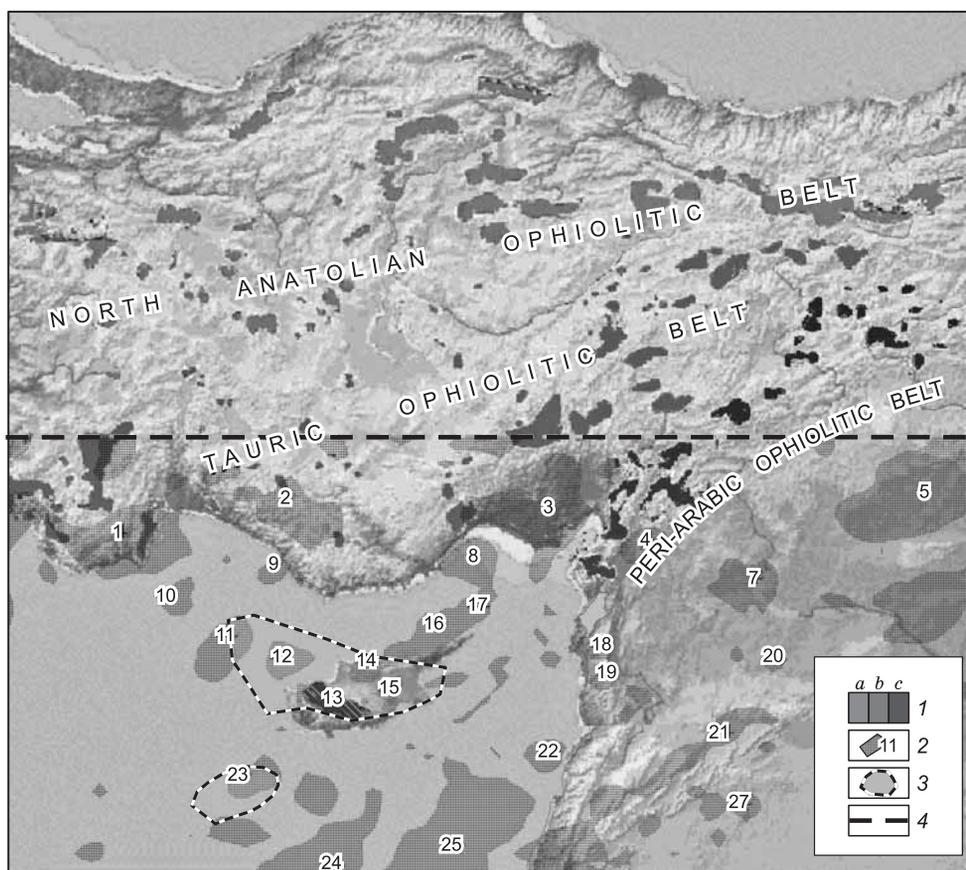


Рис. 9. Распределение обнажений офиолитовых массивов (по данным разных источников) и установленные магнитные тела.

1 — обнаженные офиолитовые массивы Северо-Анатолийского (a), Таурического (b) и Арабского (c) офиолитовых поясов; 2 — установленные магнитные тела и их номера; 3 — полигоны, представляющие собой общие контуры скрытых Троодосского и Никласского массивов, по гравитационным данным; 4 — северная граница исследуемого региона.

— северный район III имеет ряд особенностей, наблюдаемых в Южной Турции, Сирии и на севере самой восточной части Средиземноморья, включая Кипр;

— центральный район IV включает западную часть Иордании, юго-западную часть Сирии, Израиль и прилегающую акваторию Средиземного моря;

— южный район V охватывает самую северную часть Арабско-Нубийского кристаллического щита.

Район III (см. рис. 6) имеет многочисленные магнитные тела, большинство из которых надежно идентифицируются как офиолитовые массивы. На рис. 6 они отвечают Анталии (тело 1), Караману (тело 2), Мерсину (тело 3), Хатаи (тело 15) и Троодосу (тела 10—13). Эти тела имеют обнажения в Южной Турции и на Кипре (рис. 9) и являются классическими примерами офиолитовых массивов. Троодосский массив один из наиболее больших и хорошо изученных офиолитовых комплексов в мире. Измеренные гравитационные аномалии достигают здесь +250 мГал. Гравитационных аномалий такой силы в Средиземноморье не было. В работе [Gass, Masson-Smith, 1963] изучена площадь величиной 120×70 миль и обнаружено тело с высокой плотностью пород мощностью не менее 7 миль, которое может вызывать сильную гравитационную аномалию. Значение гравитации вокруг этого тела составляет 100 мГал. Авторы предположили, что высокая плотность пород (порядка 3.3 г/см^3) обусловлена неизменными на глубине дунитами и перидотитами троодосского плутонического комплекса. Магнитная восприимчивость этих ультраосновных пород, измеренная на образцах и в обнажениях, достигает $n \cdot 10^{-2}$ ед. СИ. Внутри контура положительной гравитационной аномалии находятся несколько сильных магнитных аномалий. Однако только тело 13 (см. рис. 6) совпадает с видимым на поверхности сечением Троодоса. Другие магнитные тела 10—13 (см. рис. 6) находятся внутри контура в 100 мГал и наиболее вероятно отвечают локальным изменениям геометрии и состава гигантского Троодосского массива. Обнаженная часть Троодоса, как собственно и весь массив, имеют несогласную запад-северо-западную ориентацию относительно протяженности Таурического и Арабского офиолитовых поясов.

Между южным побережьем Турции и Кипром магматические аномалии, скорее всего, связаны с офиолитовыми массивами. Западнее, между Кипром и Анталией, согласно мнению М. Эрджиина с соавторами [Ergiın et al., 2003], магнитные аномалии вызваны присутствием офиолитовых тел. Магнитные тела 8 и 9 (см. рис. 6), находящиеся между Анталийским и Троодосским массивами, оказывают влияние на локальные положительные гравитационные аномалии (см. рис. 8). Эти тела принадлежат ориентированному на северо-запад офиолитовому горизонту (см. рис. 9), соединяющему друг с другом Таурический и Арабский офиолитовые пояса. Тела 14 и 15 (см. рис. 6), которые, по всей вероятности, являются прямым северо-восточным продолжением Троодосского массива, дают такие же картины магнитных и гравитационных полей. Вместе с телом 12 (см. рис. 6) эти три тела представляют собой ориентированный на северо-восток офиолитовый горизонт, продолжающийся до Аденского залива. Скорее всего, этот горизонт входит в Арабский офиолитовый пояс. К тому же в северо-восточном направлении (уже на суше) можно видеть большое магнитное тело 3 в нижней части Аденской равнины (см. рис. 6). Оно имеет высокое значение гравитации (до 20 мГал) и офиолитовый состав пород, видимых в небольшом обнажении, что говорит о его соответствующем происхождении. Предположительно, данное тело представляет собой большой офиолитовый массив, который вместе с телами 8 и 9 заполняет пространство между Таурическим и Арабским офиолитовыми поясами. Эти обнажения, за которыми скрываются офиолитовые массивы, ранее принимались за фрагменты большого аллохтонного пластового надвига офиолитовых пород [Rybakov et al., 2005, 2009].

Высокая гравитация на юго-востоке Кипра впервые обсуждалась в работах [Woodside, Bowin, 1970; Woodside, 1977] (см. рис. 2). Детальная карта этой аномалии была составлена Службой морской гравитации [Toulin, 2005]. Эта аномалия, имеющая максимальное значение гравитации 100 мГал и совпадающая с магнитным диполем (см. рис. 6, тело 21) была недавно привязана к плотному магнитному телу [Rybakov et al., 2006] (см. рис. 8). Это большое (100 × 75 км) глубокопогруженное (~7 км) и мощное (~7 км) тело находится примерно в 95 км к юго-востоку от Кипра. Присутствие такой неоднородности в недрах было подтверждено с помощью глубинной сейсморазведки, проведенной Геологической службой Кипра [Makris, Wang, 1995; см. профиль VI] (рис. 10, В). На основании очевидной схожести гравитационных и магнитных данных по Троодосскому и Никласскому массивам предполагается, что последний также представлен офиолитовыми породами. Менее четкие градиенты и меньшие магнитуды гравитации и магнитных аномалий Никласского массива обусловлены его более глубоким, чем у частично обнаженного Троодоса, залеганием. Простираение и локализация ориентированного на северо-восток Никласского массива находятся в хорошем согласии с расположением Арабского офиолитового пояса. Единственное, что возмущает эту хорошо согласованную картину, это Троодосский массив.

Сводка данных распределения офиолитовых массивов по литературным данным представлена на рис. 9 и в таблице. При анализе распределения известных обнаженных и предположительно скрытых на глубине офиолитовых массивов можно видеть, что они расположены случайным образом. Некоторые из них можно отнести к Таурическому или Арабскому офиолитовым поясам, другие же заполняют пространство между этими двумя структурами. Результаты настоящего исследования дают основание полагать, что все офиолитовые тела (известные и предполагаемые) в данной области остались от огромного аллохтонного надвига пластов офиолитовых пород.

Хатайский и Баер-Басситский офиолитовые массивы принадлежат, по всей вероятности, к самой юго-восточной части этого огромного аллохтона, тогда как разлом Мертвого моря является его восточной границей. Картины магнитных и гравитационных данных тела 15 (Хатаи-Курдаг) (см. рис. 6) имеют типичный для офиолитовых массивов вид, как и в случае обнажения баер-басситских офиолитов. Этот массив находится в северной части прибрежной полосы сирийского обрамления Средиземного моря между Ливаном и Турцией. Два магнитных тела — 16 и 17 (см. рис. 6), находящиеся южнее Баер-Бассита неподалеку от городов Тартус и Баньяс, совпадают с наличием значительной положительной гравитационной аномалии, занимающей самую западную часть Сирии (см. рис. 3) [Brew et al., 2000]. Такой вид гравитационных и магнитных кривых согласуется с геологическими данными. В этом районе было установлено несколько небольших интрузий долеритов [Razvalyayev et al., 2005]. Принимая во внимание наличие сильной магнитной аномалии, совпадающей с предполагаемыми центрами извержения вулканического материала, авторы отмечают, что эти тела могут свидетельствовать о присутствии на глубине больших интрузий основного состава. Однако корреляция между высокой гравитацией и сильными магнитными аномалиями может также говорить об офиолитовом генезисе этих тел. В этом случае они должны быть перекрыты мощными (около 2—3 км) осадочными толщами Третичного неогавтохтона [Brew, 2001].

Разлом Мертвого моря делит район III на западную и восточную зоны, имеющие разную картину распределения гравитационного и магнитного полей. На основе гравитационной карты можно полагать, что типичные для Средиземноморья высокие значения гравитации распространяются к востоку вплоть до разлома Мертвого моря (см. рис. 3). После заметного скачка гравитации на этом разломе относитель-

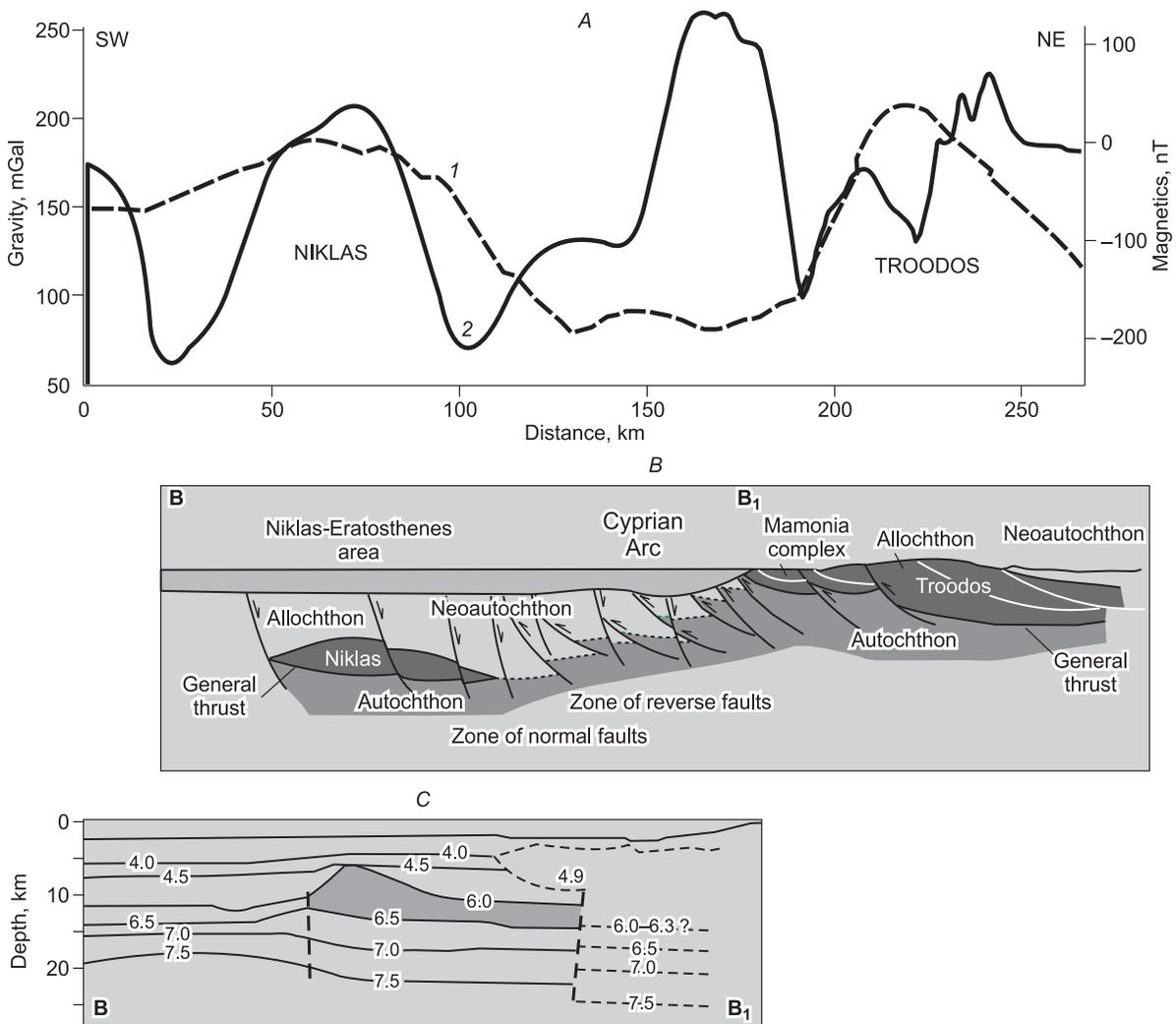


Рис. 10. Гравитационная (1) и магнитная (2) кривые Троодосского и Никласского массивов, по [Rybakov et al., 2009] (A).

Положительная гравитационная аномалия между этими объектами достигает 200 мГал; магнитуда магнитных аномалий 300 нТл. Значительные горизонтальные градиенты гравитационных и магнитных аномалий типичны для суши. Кривая потенциального поля Никласского тела имеет похожий вид, однако размах аномалии меньше и горизонтальные градиенты менее резкие.

B — тектоническая модель Кипр-Никласского разреза, объясняющая имеющееся смещение офиолитов (пояснение см. в тексте), неавтохтонные верхнемеловые—плиоценовые осадки. **C** — профиль глубинного сейсмического зондирования VI, по данным Геологической службы Кипра с упрощениями [Makris, Wang, 1995].

В модели глубина—скорость выявляется мощный конусообразный блок, которому отвечает высокая скорость распространения сейсмических волн, что дает основание приписать его к Никласскому массиву, установленному на основании гравитационных и магнитных данных.

но положительная гравитация сохраняется и дальше на восток, проходя через территорию на севере Сирии. Субширотная полоса широких магнитных аномалий совпадает с особенностью гравитации. В противоположность западной (офиолитовой) зоне, характеризующейся интенсивными магнитными аномалиями, восточная зона имеет низкочастотные магнитные аномалии, которые позволяют предполагать, что магматические тела залегают здесь на большей глубине.

Самая большая аномалия (см. рис. 6, тело 4) лежит к северо-востоку неподалеку от г. Мардин (Афсин-Эльбистан-Гоксунская область Южной Турции). Здесь наблюдаются два сильных повышения гравитации (до +20 мГал) [Ates et al., 1999], совпадающие с вытянутым вдоль север-северо-западного направления магнитным телом. Сравнение с геологической картой [Tarhan, 1984] дает основание предполагать, что это тело принадлежит гоксунскому метаофиолиту, имеющему высокую плотность пород и магнитные свойства, и частично — обнаженному в центре Мардинского купола.

Примерно в 400 км от Мардинского купола Д. Аль-Саад с соавторами [Al-Saad et al., 1991, 1992], проводя исследования коры в этом районе, установили три отдельных магнитных аномалии (см. рис. 6, тела 5, 6, 18). По соответствующим геологическому и геофизическому разрезам длиной 450 км, пересекающим Центральную Сирию, были получены данные сейсмического отражения, разведочного бурения, значения потенциального поля, и составлена геологическая карта поверхности. Говоря о магнетизме пород в этом районе, авторы отмечают относительно скромные значения магнитного поля на Алеппском плато и Рутбахском поднятии, что согласуется с присутствием мощного осадочного чехла поверх кристаллического фундамента. В северной части разреза Д. Аль-Саад с соавторами [Al-Saad et al., 1991] отмечали наличие магнитной аномалии (см. рис. 6, тело 6). Она находится в северо-западной части Алеппского плато у подножия Курд-Дагских гор и обусловлена месторождениями железа, находящимися к северо-западу от г. Алеппо. Принимая во внимание отсутствие в этом месте положительной гравитационной аномалии, наиболее подходящим объяснением причины данной магнитной аномалии является внедрение вулканических пород основного состава в осадочную толщу.

Южнее на основании результатов, полученных при сравнении точек разрыва сейсмических профилей с местоположением небольших магнитных аномалий (см. рис. 6, тело 18), авторы вышеуказанной работы предположили наличие относительно небольших и неглубоко залегающих (несколько километров) интрузий. Их глубина, по оценочным данным, составляет около 2 км.

Магнитное тело 5 (см. рис. 6) совпадает с местным протяженным гравитационным поднятием. По мнению Д. Аль-Саада с соавторами [Al-Saad et al., 1991], оно обусловлено прорывающей породы коры высокоплотным телом, находящимся ниже к северо-востоку от Пальмирид. В ряду магматических тел вдоль системы Пальмирских разломов этот массив является самым крайним в северо-восточном направлении.

Восточнее магнитное тело 25 (см. рис. 6), расположенное в самом низу восточной складки Хамадского поднятия, примерно в 80 км южнее Евфрата, совпадает с обособленным гравитационным поднятием округлой формы. По данным Дж.Е. Брю [Brew, 2001], эта гравитационная аномалия обусловлена плотным (2.88 г/см^3) телом, прорывающим консолидированную кору и находящимся на глубине около 10 км от поверхности. Данные гравитационная и магнитная картины могут быть объяснены присутствием магматического тела основного состава в континентальной коре малой плотности [Brew, 2001].

Магнитная аномалия, связанная с телом 20 (см. рис. 6), находящимся в районе береговой линии Северного Ливана, достигает 230 нТл. Глубина моря здесь около 1.7 км, а глубина залегания объекта примерно 4 км. Это означает, что тело лежит в осадочной толще поверх кристаллического фундамента, который в этом месте находится на глубине около 7 км. К сожалению, недостаток гравитационных данных не позволяет дать надежную оценку плотности пород данного тела. Тем не менее очевидно, что здесь отсутствует сколько-либо заметная гравитационная аномалия. Поэтому было сделано предположение, что магнитная аномалия вызвана телом основного состава, обладающего магнитными свойствами и имеющего низкую/среднюю плотность, отвечающую вулканическим породам (наиболее вероятно туфам). Такая же картина магнитных и гравитационных полей была установлена южнее этого тела, в окрестностях Хайфы. Соответствующие породы здесь были идентифицированы как вулканы ашеровской свиты [Gvirtzman et al., 1990; Rybakov et al., 2000].

Район IV (см. рис. 6) — центральный район на изучаемой территории. Его можно разделить на две зоны, аномалии в которых имеют континентальную и морскую специфику. Магматические (вулканические и интрузивные) тела этой области сформировались в основном в мезозойский период в результате мощных магматических процессов [Garfunkel, 1989]. Большинство результатов, полученных для данной области, относятся к объектам в районе IV.

Суша. Начиная с северо-востока, здесь можно видеть ряд сильных ТМІ аномалий овальной формы (см. рис. 1), совпадающих с Пальмиридским складчатым поясом [Поникаров и др., 1967]. Отдельные ТМІ максимумы имеют тенденцию к объединению с образованием протяженного (длиной около 230 км), относительно узкого (10 км) RTP хребта (см. рис. 6). Глубина залегания объекта, по оценкам, ~3 км, что указывает на относительно молодую магматическую интрузию, прорывающую кристаллический фундамент (его глубины в этом месте около 9.5 км) и большую часть осадочной толщи. Д. Аль-Саад с соавторами [Al-Saad et al., 1992] предположили, что это магнитное интрузивное тело, имеющее высокую плотность пород (2.9 г/см^3), могло быть связано с раннепалеозойским растяжением. Пальмирский пояс разделяет Рутбахское поднятие и Алеппское плато. Анализ совокупности данных по тектонической позиции, распределению гравитационных и магнитных полей дает основание предполагать, что это тело сложено основными породами (вероятно габбро).

На магнитной карте южной части Пальмирских магматических формаций обозначается обширная территория с резко различающимися картинами коротковолновых магнитных аномалий в Южной Сирии и Северной Иордании. Такая картина находится в прямом согласии с геологическим строением этих районов и обусловлена мощным неоген-четвертичным вулканизмом. Протяженные поля базальтовых

пород покрывают здесь площади величиной несколько тысяч квадратных километров. Мощность вулканического покрова достигает 1200 м [Razvalyaev et al., 2005].

Море. Тело 22 отвечает за Эратосфенскую магнитную аномалию (ЕМА), самую крупную на карте магнитного поля Восточного Средиземноморья [Ben-Avraham et al., 1976]. Эратосфенское морское поднятие (ESM) занимает относительно малую часть этой сложной магнитной аномалии. С последней связан значительный подъем гравитации в свободном воздухе, ясно фиксируемой с помощью космической аппаратуры. Однако значительная гравитационная аномалия Буге, соответствующая ESM или ЕМА, отсутствует [Toulin, 2005]. Гравитационные и магнитные результаты по этой территории недавно были пересмотрены в работе [Ben-Avraham et al., 2002]. На основе данных о параметрах сейсмического отражения авторами было предположено, что ЕМА обусловлена намагниченным блоком пород, имеющих высокую магнитную восприимчивость и плотность 2.75 г/см^3 . Это мощное 10-километровое тело залегает на глубине около 5 км.

Эти факты были подтверждены данными настоящего исследования (см. таблицу, рис. 8). Установлено, что модели плотности и магнитных свойств совпадают только частично. Рассчитанная магнитная восприимчивость и значения плотности не отличаются от реальных для больших Хевронской и Кармельской магнитных аномалий [Rybakov et al., 1995]. Авторы полагают, что эти объекты отвечают вулканическим формациям. Происхождение Эратосфенской структуры рассматривается как отрыв блока вулканических пород и сброс его с Афро-Арабского континентального раздела, имевший место во время раннемезозойского рифтинга [Garfunkel, Derin, 1984; Ben-Avraham, 1989; Kempler, 1998]. Эратосфенское тело находится в уникальной геологической обстановке (см. рис. 8): неглубокое залегание границы раздела коры с мантией (Мохо), аномально тонкая консолидированная кора и очень мощный осадочный чехол.

Тогда как рис. 8 не согласуется с данными сейсмического отражения, которые указывают на наличие континентальной коры под ESM [Makris et al., 1983; Ben-Avraham et al., 2002], заметная магнитная аномалия над этим блоком свидетельствует о том, что его чехол содержит массы вулканических пород (вероятно раннемезозойского возраста) [Garfunkel, 1998]. В дополнение к этому авторы работ [Зверев, Ильинский, 2000; Zverev, Iiinskii, 2005] пришли к выводу, что данный район характеризуется кривыми, относящимися к разным скоростям сейсмических волн, на основании чего можно предполагать его вулканическое происхождение.

Тело 27 (Кармель) (см. рис. 6), залегающее к востоку от Эратосфена на глубине около 3 км, имеет важное значение для установления источников магнетизма в этом районе. Пробуренная скважина прошла через это тело и позволила установить источник аномалии, тем самым предоставив данные для построения количественной модели. Кармельская структура в Северном Израиле являлась объектом многих исследований [Rybakov et al., 2000]. До момента бурения скв. Ашер Атлит 1 в 1981 г. считалось, что эта структура обусловлена высоким поднятием кристаллического фундамента или зарождающимся центром спрединга [Ben-Avraham, Hall, 1977], но результаты заставили склониться к точке зрения о вулканическом спрединге раннеюрского щита на этой территории [Gvirtzman et al., 1990]. Изверженные породы Ашера мощностью 2500 м в скв. Ашер Атлит 1 имеют особое значение для восстановления сложной геологической истории Восточного Средиземноморья.

Как уже сказано, данные о магнитных свойствах и плотности пород из скв. Ашер Атлит 1 представлены на рис. 4. Средние плотности юрских магнитных вулканитов (преимущественно туфов) обычно такие же, как плотности подстилающих пород или меньшие. Чтобы объяснить совпадение гравитационной аномалии Буге с магнитной аномалией, авторы предположили, что значительный кармельский подъем гравитации, ясно видимый на гравитационной карте Буге [Ginzburg et al., 1993], вызван значительной толщиной молодых осадков низкой плотности в окружающих областях, но не высокоплотными магматическими породами или поднятием кристаллического фундамента [Rybakov et al., 2000]. Такие вулканиты являются основной причиной появления магнитных аномалий в континентальных и морских участках, прилегающих к береговой линии Северного Израиля. Самой интересной в этом отношении является большая Хевронская магнитная аномалия (см. рис. 6, тело 30). Как и в случае Кармельской аномалии, ранее полученные результаты [Domzalski, 1967, 1986; Folkman, 1976] дали основание предполагать, что Хевронская аномалия связана с изменением состава пород и глубины залегания магнитного основания. В то же время отмечалось, что термин «магнитное основание» относится просто к глубокозалегающим пластам намагниченных пород, являющихся частью докембрийского фундамента, или любой другой перекрывающей магнитной породой. Однако установление корреляции между фундаментом кристаллических пород, обладающих магнитными свойствами, и докембрийским фундаментом может приводить к неверным выводам [Folkman, 1970]. Сравнение мощности осадочной толщи с верхней поверхностью возбуждающего магнитное поле тела предполагает, что оно прорывает триасовые пласты [Rybakov et al., al., 1995] (см. рис. 7). Эта магматическая активность имела, вероятно, место в период от

позднего триаса до ранней юры. Основное магматическое тело отделено от вулканических тел, известных в центральных областях пустыни Неgev и в районе горы Кармель.

Авторы работы [Folkman, Ben-Gai, 2004] исследовали редкое совпадение данных по сейсмическому отражению, магнитным и гравитационным параметрам над телом 24 (см. рис. 6) и предположили присутствие в осадочной толще глубокозалегающего (8 км) тела изверженных пород изометрической формы (рис. 11). Принимая во внимание смещение вышележащих осадков, они предположили, что наблюдаемые факты лучше объясняются для случая интрузивных, нежели изверженных пород. Магматическое тело и перекрывающая осадочная толща отвечают тектонике Сирийской дуги. Нами рассчитано RTP преобразование магнитного поля (см. рис. 5, 11), которое четко показывает хорошее совпадение гравитационных и RTP аномалий. Эти результаты подтвердили, что Йонахское тело залегает на глубине 8 км, как и было установлено в [Folkman, Ben-Gai, 2004]. Мощность самого тела (~7 км), отличие плотности и магнетизма его пород от окружающих (0.2 г/см^3 и 0.003 ед. СИ соответственно) были определены с некоторыми неточностями. Принимая во внимание значение плотности пород глубинных морских фаций ($2.4\text{—}2.5 \text{ г/см}^3$) [Segev et al., 2006], мы делаем вывод, что состав Йонахского тела отвечает вулканитам. Следует также отметить, что Йонахское тело находится в переходной зоне между плотной, но тонкой корой Восточного Средиземноморья и толстой, но более легкой корой Арабской плиты (см. рис. 8, C, D).

Тело 29 (Ирбид) (см. рис. 6) является, скорее всего, восточным фрагментом большого магматического тела, смещенного в северном направлении примерно на 105 км вдоль разлома Мертвого моря. Сейсмическое смещение Хевронского и Ирбидского тел подтверждает их геологическое смещение вдоль

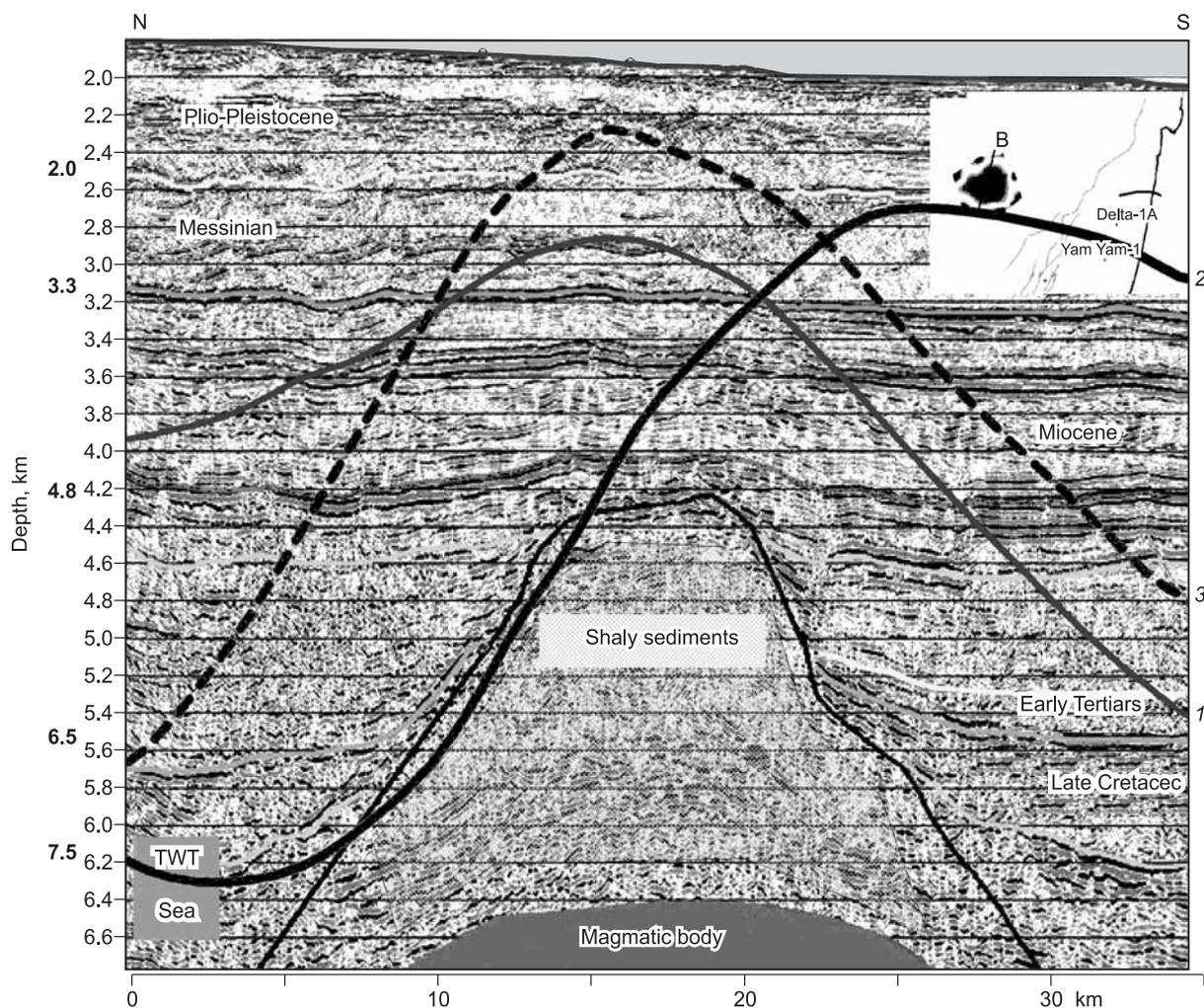


Рис. 11. Профиль сейсмического отражения Йонахской структуры (см. рис. 6, тело 24), построенный по [Folkman, Ben-Gai, 2004].

Изображение нанесено на данные морских гравитационных (1) и магнитных TMI (2) и RTP (3) наблюдений. Позиция показана на вставке и на рис. 5, C, D. Следует отметить совпадение кривых гравитации и RTP.

разлома Мертвого моря. По расчетам, Ирбидское тело залегает на глубине ~4 км. Поэтому похоже, что, как и выше описанное Хевронское, оно представлено внедренными в осадочную толщу вулканитами. Первичные породы магнитного тела 29 (см. рис. 6) вперемежку с силлами изверженных пород (долеритов?) и дайковыми интрузиями внедрялись в осадочные пласты в период от среднего до позднего триаса [Bender, 1974]. Говоря о составе пород тела 28 (Галил) (см. рис. 6), можно отметить отсутствие какой-либо заметной гравитационной аномалии, а также наличие многочисленных обнажений и небольших неглубокозалегающих магматических тел (вулканитов и интрузивов), что дает основание предполагать их вулканическое происхождение. Тело 23 (см. рис. 6) имеет, вероятно, тот же состав.

Район V (см. рис. 6). Здесь находятся многочисленные тела магматических докембрийских пород Арабско-Нубийского щита. Многие из них имеют обнажения, поэтому породы и их магнитные свойства легко можно было исследовать. Даже используя региональную магнитную карту (см. рис. 1), можно достаточно верно очертить крупные массивы основных магматических пород. Однако мелкие тела (менее нескольких километров в поперечнике) можно очертить только с помощью детального картирования. Особенности полной аэромагнитной карты Северо-Западной Саудовской Аравии (м-б карты 1:500 000) [Andreasen, Petty, 1974] относятся к длинным узким аномалиям, которые вызваны крутопадающими четко на север-северо-запад мафическими дайками. Две похожие друг на друга протяженные (150 км) и узкие, имеющие север-северо-восточную ориентацию, магнитные аномалии видны на Синайском полуострове и в Юго-Западной Иордании (см. рис. 1). Однако эти особенности не слишком согласуются с геологическим строением близповерхностных пластов [Bender, 1974; Folkman, Yuval, 1976]. Наиболее вероятно, они обусловлены структурными особенностями глубокозалегающего кристаллического фундамента, благодаря чему предоставляется возможность их изучения.

Пример, приведенный для случая Маанской области (рис. 12), показывает, как скрытые докембрийские магматические интрузии могут быть обнаружены на основе магнитных и гравитационных данных. Совпадение магнитных и гравитационных аномалий предполагает, что они исходят из одного источника (см. рис. 6, тела 39 и 40). Проведенный анализ совокупности этих данных указывает на существование двух различающихся геологических объектов, глубина залегания которых приходится уже на структурные уровни кристаллического фундамента [Rybakov, Segev, 2004]. Расчетные значения глубины залегания этих объектов находятся в хорошем согласии с данными бурения скв. Джафр 1, достигшей кристаллического фундамента на глубине 3.2 км, и результатами, полученными в [Comprehensive..., 1980]. Обнажение докембрийского кристаллического фундамента вблизи г. Акаба [Bender, 1974] дало информацию о том, что тело 39 (см. рис. 6) представлено основными интрузивными породами. В направлении на север тело постепенно погружается, и его северная часть уже обнаруживается на глубине около 2 км (см. рис. 12, С). С данными наблюдениями также согласуются оценки различий в плотности и магнитной восприимчивости (0.2 г/см^3 и 0.02 ед. СИ) пород тела.

Форма больших магнитных аномалий в районе V лучше всего отвечает магнитным поясам (см. рис. 6). Самый северный линеамент включает с востока на запад (см. рис. 6) следующие тела: 33 (Файнан) в Западной Иордании, 38 (Тимна), 37 (Нахель), 36 (Тхамата) в центре Синайского полуострова, а также тела 42—44, соответствующие обособленным докембрийским обнажениям в Восточной пустыне Египета. Характер пород этих тел точно не установлен, за исключением тела 38 (Тимна), представляющего собой докембрийский габбровый массив [Segev et al., 1995].

Результаты магнитных исследований впервые были использованы в работе [Hatcher et al., 1981] для подтверждения 105-километрового сдвига вдоль разлома Мертвого моря. С помощью перемены зна-

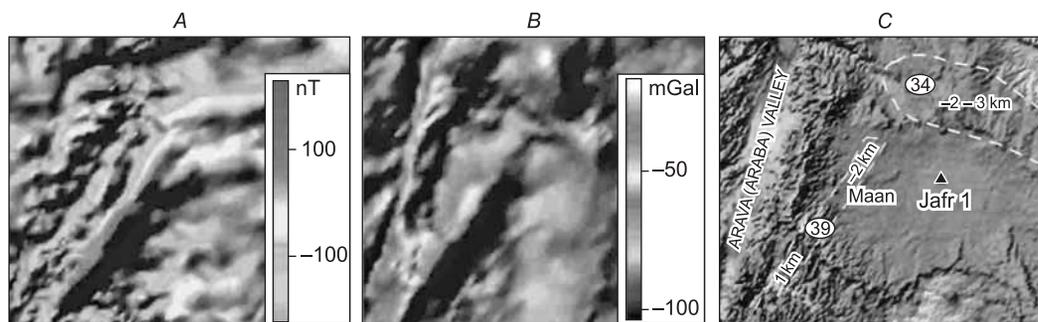


Рис. 12. Магнитная (А), гравитационная (В) и топографическая (С) карты Маанской аномальной области.

Белые штриховые многоугольники обозначают скрытые докембрийские магматические массивы; рассчитанные из MSL значения поднятия фундамента показаны в эллипсах. Рассчитанные значения глубины согласуются с данными, полученными при бурении скв. Джафр 1, которая достигла фундамента на глубине 3.2 км.

ка на противоположный они совместили Тимнанское и Файнанское тела. Авторы настоящей статьи, опираясь на исчерпывающие данные, подтверждают этот результат, показывая, что объекты на противоположных берегах Суэцкого залива можно совместить друг с другом в результате обратного (праволатерального) смещения примерно на 80 км вдоль Суэцкого рифта Синайско-Израильской субплиты относительно Африканской [Rybakov et al., 1996]. Карта магнитных аномалий Египта [Western Atlas..., 1989] дает основание предполагать, что этот магматический пояс продолжается в Западную пустыню Египта. Общая длина этой тектонической структуры около 1000 км.

Тело 41, находящееся в 70 км к северу от западной части вышеупомянутого магматического пояса (тела 35—37), продолжается на запад северной оконечности Суэцкого залива (см. рис. 1, б). По оценкам, глубина залегания тела около 3 км, однако только несколько небольших обнажений основных магматитов миоценового возраста совпадают с магнитными аномалиями.

ВЫВОДЫ

На территориях распространения магматических формаций основного состава и их метаморфических аналогов магматические объекты фиксируются как магнитные тела, находящиеся на разной глубине. 3D обработка магнитных данных позволяет оконтурить магнитные тела в пределах коры. В процессе анализа взаимосвязи между магматизмом, неоднородностями магнитного поля и структурой коры учитывалось следующее: положение магнитных тел и структурные особенности земной коры, основность отдельных блоков коры, петрофизическая интерпретация взаимосвязи между неоднородностями магнитного поля, плотностью пород и скоростью распространения сейсмических волн. В результате такого анализа установлены несколько типов взаимосвязи между проявлением приповерхностного магматизма и глубинными структурами коры.

Карта распределения основного магматизма в континентальном и морском Леванте четко указывает на активную тектоническую деятельность. В пределах докембрийских блоков прослеживается прямая или опосредованная взаимосвязь между магматизмом и толщиной коры. Наиболее типично эта связь выражается в присутствии магматических формаций внутри зон между поперечно-секущими разломами разных возрастов. Это связано с глубинными контактами неоднородностей магнитного поля, плотностью и скоростью распространения сейсмических волн в коре. В результате исследований корреляционных связей между вулканизмом и глубинными структурами на основе данных с помощью комплекса геофизических методов можно выделить следующие взаимосвязи.

1. Прямая вертикальная взаимосвязь — между проявлением основного докембрийского магматизма внутри блоков, имеющих высокомагнитные породы в верхних и в нижних пластах, увеличением толщины всей коры, в целом увеличением скорости сейсмических волн и плотности.

2. Не вполне четкая связь между образованием вблизи поверхности протерозойских магматических формаций основного состава и глубинной структурой коры обусловлена, по всей вероятности, очень низким тепловым потоком в этом регионе и как следствие глубоким залеганием границы Кюри. Здесь может быть три случая: магнитные породы нижней коры имеют «нормальные» плотность и скорости распространения сейсмических волн (признак частично переработанной окружающей коры); глубокое залегание нижней магнитной коры в сочетании с низкой плотностью ее пород (признак максимально переработанной коры в результате кислого магматизма); слабомагнитная, высокоплотная и характеризующаяся высокой скоростью распространения сейсмических волн нижняя кора (признак наличия каналов, подводящих магму основного — ультраосновного состава).

Авторы выражают благодарность профессорам М. Эялу, З. Гарфункелю, Х. Рону, докторам Ю. Бартову, В. Вознесенскому, А. Сегеву, М. Ачмону, А. Ал-Зуби, Л. Флейшеру, М. Гардону и Ю. Фолкману за ценные советы. Мы также признательны рецензентам П.Г. Дядькову и Ю.А. Дашевскому.

ЛИТЕРАТУРА

Зверев С.М., Ильинский Д.А. Глубинная структура и возможная природа подводной горы Эратосфен // Геотектоника, 2000, № 4, с. 67—84.

Логачев А.А., Захаров В.П. Магнитная разведка. Л., Недра, 1979, 348 с.

Маловицкий Я.П., Осипов Г.В. Аномальное магнитное поле Средиземного моря и его вероятная геологическая природа // Геофизический сборник АН УССР, 1975, т. 65, с. 37—49.

Маловицкий Я.П., Чумаков И.С., Шимкус К.М.Ю., Есина Л.А., Москаленко В.Н. Земная кора и история Средиземного моря / Ред. М.В. Муратов. М., Наука, 1982, 208 с.

Поникаров В.П., Казмин В.Г., Михайлов И.А., Разваляев А.В., Крашенинников В.А., Козлов В.В., Сулиди-Кондратьев Е.Д., Михайлов К.Я., Кулаков В.В., Фараджев В.А., Мизяев К.М. Геология Сирии. Объяснительная записка к Геологической карте Сирии. М-б 1:500 000. Ч. I. Стратиграфия, изверженные породы и тектоника. Л., Техноэкспорт СССР, 1967, 230 с.

- Трошков Г.А., Грознова А.А.** Определение некоторых параметров распределения объектов по данным гравитационных и магнитных полей // Прикладная геофизика, 1984, № 106, с. 52—68.
- Al-Saad D., Sawaf T., Gebran A., Barazangi M., Best J.A., Chaimov T.A.** Northern Arabian platform transect across the Palmyride mountain belt, Syrian Arab Republic. Global Geoscience Transect 1, The Inter-Union Commission on the Lithosphere and the American Geophysical Union, Washington, D.C., 1991.
- Al-Saad D., Sawaf T., Gebran A., Barazangi M., Best J.A., Chaimov T.A.** Crustal structure of central Syria: the intracontinental Palmyride mountain belt // Tectonophysics, 1992, v. 207, № 3—4, p. 345—358.
- Alamri A.M., Schult F.R., Bufe C.G.** Seismicity and aeromagnetic features of the Gulf of Aqaba (Elat) region // J. Geophys. Res., 1991, v. 96, № B12, p. 20179—20185.
- Allan T.D., Charnock H., Morelli C.** Magnetic, gravity, and depth surveys in the Mediterranean and Red Sea // Nature, 1964, v. 204, № 4965, p. 1245—1248.
- Al-Zoubi A.S., Ben-Avraham Z.** Structure of the earth's crust in Jordan from potential field data // Tectonophysics, 2002, v. 346, № 1—2, p. 45—59.
- Al-Zoubi A.S., ten-Brink U.S., Rybakov M., Rotstein Y.** Using high-resolution aeromagnetic survey to map tectonic elements of plate boundaries: an example from the Dead Sea Transform. Abstract. EOS // Trans. Amer. Geophys. Union, Fall Meeting Supplement, 2004, v. 85, № 47, abstract G44A-07.
- Andreasen G.E., Petty A.J.** Total-intensity aeromagnetic map of the northern Hijaz quadrangle and part of the Wadi As Sirhan quadrangle, Kingdom of Saudi Arabia: Saudi Arabian Dir. Gen. Mineral Resources Geologic Map GM-9, 1974.
- Ates A., Sevinc A., Kadioglu Y.K., Kearey P.** Geophysical investigations of the deep structure of the Aydin-Milas region, southwest Turkey: evidence for the possible extension of the Hellenic Arc // Isr. J. Earth Sci., 1997, v. 46, № 1, p. 29—40.
- Ates A., Kearey P., Tufan S.** New gravity and magnetic anomaly maps of Turkey // Geophys. J. Int., 1999, v. 136, № 2, p. 499—502.
- Bartov Y.** Geological photomap of Israel and adjacent areas. 1 sheet, scale 1:750 000. Geol. Surv. Isr., Jerusalem, 1994.
- Ben-Avraham Z.** Multiple opening and closing of the eastern Mediterranean and south China basins // Tectonics, 1989, v. 8, p. 351—362.
- Ben-Avraham Z., Hall J.K.** Geophysical survey of Mount Carmel structure and its extension into the eastern Mediterranean // J. Geophys. Res., 1977, v. 82, p. 793—802.
- Ben-Avraham Z., Shoham Y., Ginzburg A.** Magnetic anomalies in the eastern Mediterranean and the tectonic setting of the Eratosthenes Seamount // Geophys. J.R. Astr. Soc., 1976, v. 45, № 1, p. 105—123.
- Ben-Avraham Z., Shoham Y., Klein E., Michelson H., Serruya C.** Magnetic survey of Lake Kinneret — Central Jordan Valley, Israel // Mar. Geophys. Res., 1980, v. 4, № 3, p. 257—276.
- Ben-Avraham Z., Ginzburg A., Makris J., Eppelbaum L.** Crustal structure of the Levant Basin, eastern Mediterranean // Tectonophysics, 2002, v. 346, № 1—2, p. 23—43.
- Bender F.** Geology of Jordan. Berlin, Stuttgart, Gebruder Borntraeger, 1974, 196 p.
- Bilim F., Ates A.** Analytic signal inferred from reduced to the pole data // J. Balkan Geophys. Soc., 2003, v. 6, № 2, p. 66—74.
- Blumenthal M.M.** Geological map of Turkey: 1:500 000 — Konya. Ankara, The Institute of Mineral Research and Exploration, 1963.
- Brew G.E.** Tectonic evolution of Syria. Ph.D. Dissertation. Cornell Univ., Ithaca, N.Y., 2001, <http://atlas.geo.cornell.edu/people/brew/gbthesisintro.html>
- Brew G.E., Litak R.K., Seber D., Barazangi M., Sawaf T., Al-Imam A.** Basement depth and sedimentary velocity structure in the northern Arabian platform, Eastern Syria // Geophys. J. Int., 1997, v. 128, № 3, p. 617—631.
- Brew G.E., Barazangi M., Sawaf T., Al-Maleh K.** Tectonic map and geologic evolution of Syria: the role of GIS // The Leading Edge, 2000, v. 19, № 2, p. 176—182.
- Cohen Z.** Hydrocarbon potential of Israel. Oil Exploration (Investments) Ltd., 1988, 148 p.
- Comprehensive** airborne magnetic/radiation survey of the Hashemite Kingdom of Jordan. Final Report to Natural Resources Authority. Phoenix Corporation. McLean, Virginia, Phoenix Corp., 1980, 110 p.
- Domzalski W.** Aeromagnetic survey of Israel: interpretation, IPRG Report SMA/482/67, 1967, 62 p.
- Domzalski W.** Review and additional interpretation of selected magnetic data in Israel and adjoining areas. Oil Exploration (Investments) Ltd., 1986, 55 p.
- El-Hakim B., Nakhla A.F.** Interpretation of aeromagnetic survey of Egypt // Egypt J. Geol., 1970, v. 14, № 2, p. 119—129.

- Eppelbaum L.V., Pilchin A.N.** Methodology of Curie discontinuity map development for regions with low thermal characteristics: an example from Israel // *Earth Planet. Sci. Lett.*, 2006, v. 243, p. 536—551.
- Eppelbaum L., Ben-Avraham Z., Katz Y., Marco S.** Sea of Galilee: comprehensive analysis of magnetic anomalies // *Isr. J. Earth Sci.*, 2004a, v. 53, № 3—4, p. 151—171
- Eppelbaum L., Bert-Avraham Z., Katz Y.** Integrated analysis of magnetic, paleomagnetic and K-Ar data in a tectonic complex region: an example from the Sea of Galilee // *Geophys. Res. Lett.*, 2004b, v. 31, № 19, p. L19602.1—L19602.4, doi:10.1029/2004GL021298.
- Erentoz C., Ternek Z.** 1:500 000 scaled general geological map of the Adana region. Institute of Mineral Research and Exploration, Ankara. 1962, http://www.mta.gov.tr/mta_web/500.000/image/adana.asp. Accessed 25 June 2009
- Ergün M., Okay S., Sari C., Oral E.Z.** Gravity and magnetic anomalies of the Cyprus arc and tectonic implications. EGS-AGU-EUG Joint Assembly, Nice, 6—11 April, *Geophysical Research Abstracts*, 2003, v. 5, Abstract № 1663.
- Faris M.T., El Bishlawy M.N., El Dashlouty S.A.** Qualitative interpretation of gravity and magnetic anomalies of Abu Zeneima-Abu Rudies area, east coast Gulf of Suez, Egypt // *Bull. Fac. Sci., Ain Shams Univ., Cairo*, 1967, № 11, p. 193—206.
- Folkman J.** Aeromagnetic survey in the areas of the Golan, Shomron, Judea and Gaza offshore, IPRG Report SMA/760/70, 1970, 49 p.
- Folkman Y.** Magnetic and gravity investigation of the crustal structure of Israel. Unpubl. Ph.D. thesis. Tel Aviv, Tel Aviv University (In Hebrew with English abstract), 1976, 205 p.
- Folkman Y.** Structural features in the Dead Sea-Jordan rift zone, interpreted from a combined magnetic-gravity study // *Tectonophysics*, 1981, v. 80, № 1—4, p. 135—146.
- Folkman Y., Yuval Z.** Aeromagnetic map of Israel, Scale 1:250 000 (two sheets). *Inst. Petrol. Res. Geophys.*, 1976.
- Folkman Y., Assael R.** Aeromagnetic map of Sinai. Two sheets at scale 1:500 000 overprinted on the Sinai Geological Map and Photomap (1980) of Y. Bartov, M. Eyal, A.E. Shimron, and Y.K. Bentor. Contour interval 10 gammas, based on four separate surveys. Institute for Petroleum Research and Geophysics, and Ministry of Energy and Infrastructure, Administration for Research in Earth Sciences, 1980.
- Folkman Y., Assael R.** Magnetic map of the southeastern Mediterranean Sea, IPRG Report M/719/80, 1981.
- Folkman Y., Ben-Gai Y.** The 'Jonah' buried seamount: intrusive structure in the southeastern Levant basin offshore Israel. Annual meeting of Israel Geological Society, 2004, p. 29.
- Freund R., Garfunkel Z.** Guidebook to excursion along the Dead Sea Rift. Jerusalem, Unpubl. Rept., Dept. Geology, Hebrew University, 1976, 27 p.
- Freund R., Garfunkel Z., Zak I., Goldberg M., Weissbrod T., Derin B.** The shear along the Dead Sea rift // *Phil. Trans. Royal Soc. London*, 1970, v. A 267, p. 107—130.
- Frieslander U., Ben-Avraham Z.** Magnetic field over the Dead Sea and its vicinity // *Mar. Petrol. Geol.*, 1989, v. 6, № 2, p. 148—160.
- Garfunkel Z.** Internal structure of the Dead Sea leaky transform (rift) in relation to plate kinematics // *Tectonophysics*, 1981, v. 80, № 1—4, p. 81—108.
- Garfunkel Z.** Tectonic setting of Phanerozoic magmatism in Israel // *Isr. J. Earth Sci.*, 1989, v. 38, № 2—4, p. 51—74.
- Garfunkel Z.** Constrains on the origin and history of the Eastern Mediterranean basin // *Tectonophysics*, 1998, v. 298, p. 5—35.
- Garfunkel Z., Derin B.** Permian-Early Mesozoic tectonism and continental margin formation in Israel and its implications for the history of the Eastern Mediterranean // *The geological evolution of the eastern Mediterranean* / Eds. J.E. Dixon, A.H.F. Robertson. *Geol. Soc. Spec. Publ.* 17, London, 1984, p. 187—201.
- Garfunkel Z., Ben-Avraham Z.** The structure of the Dead Sea basin // *Tectonophysics*, 1996, v. 266, p. 155—176.
- Gass I.G., Masson-Smith D.** The geology and gravity anomalies of the Troodos Massif, Cyprus // *Phil. Trans. Roy. Soc. London, Series A, Math. Phys. Sci.*, 1963, v. 255, № 1060, p. 417—467.
- Ghazala H.H.** Structural interpretation of the Bouguer and aeromagnetic anomalies in central Sinai // *J. African Earth Sci.*, 1994, v. 19, № 1/2, p. 35—42.
- Ginzburg A., Ben-Avraham Z.** The structure of the sea of Galilee graben from magnetic measurements // *Tectonophysics*, 1986, v. 126, № 2—4, p. 153—164.
- Ginzburg A., Folkman Y., Rybakov M., Rotstein Y., Assael R., Yuval Z.** Bouguer gravity map of Israel and adjacent areas (1:500 000). Tel Aviv. *Geophys. Inst. Isr., Survey of Israel*, 1993.

- Glossary** of gravity and magnetic terms. Integrated Geophysics Corporation, 2009. http://www.igcworld.com/gm_glos.html
- Godson R.H.** MAGPOLY: a modification of a three-dimensional magnetic modeling program. U.S. Geological Survey, Open-File Report 83-345, 1983, 62 p.
- Gvirtzman G., Klang A., Rotstein Y.** Early Jurassic shield volcano below Mount Carmel: a new interpretation of the magnetic and gravity anomalies and implications for Early Jurassic rifting // *Isr. J. Earth Sci.*, 1990, v. 39, № 2—4, p. 149—159.
- Gvirtzman Z., Weinberger R.** Interpretation of Ramon basalt magnetic anomalies: magnetic modelling and paleomagnetic study // *Isr. J. Earth Sci.*, 1994, v. 43, № 1, p. 47—56.
- Hatcher R.D., Zietz I., Regan R.D., Abu-Ajamieh M.** Sinistral strike-slip motion on the Dead Sea rift: confirmation from new magnetic data // *Geology*, 1981, v. 9, № 10, p. 458—462.
- Ibrahim K.E., Alakhras M.N., Bazuhair A.S.** Combined gravity and aeromagnetic surveys of the Khulais Basin of western Saudi-Arabia // *J. African Earth Sci. and the Middle East*, 1993, v. 17, № 3, p. 373—381.
- IGRF**, 2009, <http://www.ngdc.noaa.gov/IAGA/vmod/igrf.html>
- Interpretation report:** airborne magnetometer survey of the Sinai peninsula. Midbar Ltd., 1969, 65 p., 2 maps.
- Kempler D.** Eratosthenes seamount: the possible spearhead of incipient continental collision in the eastern Mediterranean // *Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific Results* / Eds. A.H.F. Robertson, K.-C. Emeis, C. Richter, A. Camerlenghi. 1998, v. 160, p. 709—721.
- Khatab M.M.** Seismic, gravity and aeromagnetic interpretation of Um Barka and adjacent areas, Western Desert of Egypt // *Egypt J. Geol.*, 1974, v. 18, № 2, p. 127—135.
- Khesin B., Feinstein S.** Phanerozoic rock magnetization in southern and central Israel // *Isr. J. Earth Sci.*, 2005, v. 54, № 2, p. 97—111.
- Khesin B., Feinstein S., Vapnik Ye., Itkis S., Leonhardt R.** Magnetic study of metamorphosed sedimentary rocks of the Hatrurim formation, Israel // *Geophys. J. Int.*, 2005, v. 162, № 1, p. 49—63.
- Li X.** On the use of different methods for estimating magnetic depth // *The Leading Edge*, 2003, v. 22, № 11, p. 1090—1099.
- Makris J., Wang J.** Geophysical study and geodynamics of the eastern Mediterranean Sea. Universitat Hamburg, Institut für Geophysik, Ma 719/48-1, 1995, 135 p.
- Makris J., Ben-Avraham Z., Behle A., Ginzburg A., Giese P., Steinmetz L., Whitmarsh R.B., Eleftheriou S.** Seismic refraction profiles between Cyprus and Israel and their interpretation // *Geophys. J. R. Astron. Soc.*, 1983, v. 75, p. 575—591.
- Makris J., Wang J., Odintsov S., Udintsev G.** The magnetic field of the eastern Mediterranean Sea // *Geological Structure of the Northeastern Mediterranean* / Eds. V.A. Krasheninnikov, J.K. Hall. Jerusalem, Historical Productions-Hall, 1994, Chapter 3, p. 75—87.
- Masclé J., Benkhalil J., Bellaiche G., Zitter T., Woodside J., Loncke L., Prismed II Scientific Party.** Marine geologic evidence for a Levantine-Sinai plate, a new piece of the Mediterranean puzzle // *Geology*, 2000, v. 28, № 9, p. 779—782.
- Meshref W.M.** Tectonic framework // *The Geology of Egypt* / Ed. R. Said. Rotterdam, Netherlands, A.A. Balkema Publishers, 1990, p. 113—156.
- Nur A., Ben-Avraham Z.** The eastern Mediterranean and the Levant: tectonics of continental collision // *Tectonophysics*, 1978, v. 46, p. 297—312.
- Phillips J.D.** Magnetic anomalies in the Red Sea // *Phil. Trans. Roy. Soc. London*, 1970, v. A-267, № 1181, p. 205—217.
- Phillips J.D.** U.S. Geological Survey Potential-Field Software Package, version 2.2 for the PC: United States Geological Survey Open File Report 97-725, 1997, 34 p. <http://pubs.usgs.gov/fs/fs-0076-95/FS076-95.html>
- Processing** and interpretation gravity and magnetic surveys in southern Dead Sea area, Edcon Inc., 1991, 47 p.
- Razvalyaev A.V., Kazmin V.G., Galaktionov A.B.** Volcanism // *Geological Framework of the Levant, V. I: PART II — Syria and the Levantine Basin* / Eds. V.A. Krasheninnikov, J.K. Hall, F. Hirsch, Ch. Benjamini, A. Flexer. Jerusalem, Historical Productions—Hall, 2005, Chapter 7, p. 417—462.
- Report** on the interpretation of a non-exclusive seismic survey in the eastern Mediterranean — offshore Israel. Seismic Geocode Ltd., 1984.
- Rybakov M.** The geological volume modeling (computer system project) // *Abstracts of 29th International Geological Congress. Kyoto, Japan, 1992*, v. 3, p. 957.
- Rybakov M., Segev A.** The top of the crystalline basement in the Levant. *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 2004, v. 5, Q09001, doi:10.1029/2004GC000690.

Rybakov M., Al-Zoubi A.S. Bouguer Gravity Map of the Levant — a new compilation // Geological Framework of the Levant. V. II. The Levantine Basin and Israel / Eds. J.K. Hall, V.A. Krasheninnikov, F. Hirsch, Ch. Benjamini, A. Flexer. Jerusalem, Historical Productions-Hall, 2005, Chapter 19, p. 539—542.

Rybakov M., Goldshmidt V., Folkman Y., Rotstein Y., Ben-Avraham Z., Hall J.K. Magnetic anomaly map of Israel, scale 1:500 000. Tel Aviv. Geophys. Inst. Isr., and Survey of Israel, 1994.

Rybakov M., Fleischer L., Goldshmidt V. A new look at the Hebron magnetic anomaly // Isr. J. Earth Sci., 1995, v. 44, № 1, p. 41—49.

Rybakov M., Goldshmidt V., Shamir G. The use of magnetic patterns for plate reconstruction: an example from the Mediterranean-Red Sea region // Isr. J. Earth Sci., 1995, v. 45, № 3, p. 147—151.

Rybakov M., Goldshmidt V., Rotstein Y. New regional gravity and magnetic maps of the Levant // Geophys. Res. Lett., 1997, v. 24, № 1, p. 33—36.

Rybakov M., Goldshmidt V., Rotstein Y., Fleischer L., Goldberg I. Petrophysical constraints on gravity/magnetic interpretation in Israel // The Leading Edge, 1999a, v. 18, № 2, p. 269—272.

Rybakov M., Goldshmidt V., Fleischer L., Rotstein Y. Crystalline basement in central Israel derived from gravity and magnetic data // Isr. J. Earth Sci., 1999b, v. 48, № 2, p. 101—111.

Rybakov M., Goldshmidt V., Fleischer L., Ben-Gai Y. 3-D gravity and magnetic interpretation for the Haifa Bay area (Israel) // J. Applied Geophys., 2000, v. 44, № 4, p. 353—367.

Rybakov M., Gardosh M., Ben-Avraham Z. New look at the region of Eratosthenes seamount as revealed by gravity and magnetic data // Geological Framework of the Levant. V. II. The Levantine Basin and Israel / Eds. J.K. Hall, V.A. Krasheninnikov, F. Hirsch, Ch. Benjamini, A. Flexer. Jerusalem, Historical Productions-Hall, 2005, Chapter 23, p. 687—699.

Rybakov M., Voznesensky V., Ben-Avraham Z., Lazar M. The Niklas anomaly southwest of Cyprus: new insights from combined gravity and magnetic data // Isr. J. Earth Sci., 2009, v. 57, p. 125—138.

Sabri A.M. Gravimetric and geomagnetic investigations in central Sinai, Egypt // Eur. Assoc. Explor. Geophys., 43rd Meeting, Venice, May 26—19, 1981, Tech. Prog. Abstracts, 1981, p. 37.

Segev A., Rybakov M., Weissbrod T., Beyth M. Lower Cretaceous gabbroic intrusion at shallow depth in the Timna Valley, southern Israel: magnetometric evidence // Isr. J. Earth Sci., 1995, v. 44, № 3, p. 137—148.

Segev A., Goldshmidt V., Itamar A., Rybakov M. Effects of Mesozoic magmatism on composition, structure and metallic mineralization in the Ramon area (southern Israel): magnetometric and gravimetric evidence // Isr. J. Earth Sci., 1996, v. 45, № 2, p. 89—112.

Segev A., Goldshmidt V., Rybakov M. Late Precambrian—Cambrian tectonic setting of the crystalline basement in the northern Arabian-Nubian Shield as derived from gravity and magnetic data: basin-and-range characteristic // Isr. J. Earth Sci., 2000, v. 48, № 3—4, p. 159—178.

Segev A., Rybakov M., Lyakhovsky V., Hofstetter A., Tibor G., Goldshmidt V., Ben Avraham Z. The structure, isostasy and gravity field of the Levant continental margin and the southeast Mediterranean area // Tectonophysics, 2006, v. 425, № 1—4, p. 137—157.

Tarhan N. Evolution and origin of granitoid magmas related to the closure of neo-Tethys in eastern Taurus (Turkey). 1984, http://www.mta.gov.tr/english/dergi/dergi_pdf/107/5.pdf

Tolun N., Erentoz C. Hatay sheet of the Geological Map of Turkey, 1:500 000 scale. Ankara, General Directorate of Mineral Research and Exploration, 1962.

Toulin V. Gravity field of the northeastern part of the Mediterranean Sea (South and West of Cyprus) // Geological framework of the Levant. V. II. The Levantine Basin and Israel / Eds. J.K. Hall, V.A. Krasheninnikov, F. Hirsch, C. Benjamini, A. Flexer. Jerusalem, Historical Productions-Hall, 2005, Chapter 14, p. 127—134.

Western Atlas International. Reduction to pole magnetic anomaly map. Egyptian General Petroleum Corp., Arab Republic of Egypt, Cairo, 1989.

Woodside J.M. Tectonic elements and crust of the Eastern Mediterranean // Mar. Geophys. Res., 1977, v. 3, № 3, p. 317—354.

Woodside J.M. Disruption of the African Plate margin in the eastern Mediterranean // The geology of Libya. V. VI / Ed. M.J. Salem. Elsevier, 1991, p. 2319—2329.

Woodside J.M., Bowin C.O. Gravity anomalies and inferred crustal structure in the eastern Mediterranean Sea // Geol. Soc. Amer. Bull., 1970, v. 81, № 4, p. 1107—1122.

Zverev S.M., Iliinskii D.A. The deep structure of Eratosthenes Seamount from seismic refraction data // Geological framework of the Levant, Volume I. Cyprus and Syria / Eds. V.A. Krasheninnikov, J.K. Hall, F. Hirsch, C. Benjamini, A. Flexer. Jerusalem, Historical Productions-Hall, Israel, 2005, p. 73—112.