

ГИГАНТСКАЯ КВАЗИКОЛЬЦЕВАЯ МАНТИЙНАЯ СТРУКТУРА ПОД ВОСТОЧНЫМ СРЕДИЗЕМНОМОРЬЕМ: АНАЛИЗ НОВЫХ ДАННЫХ СЕЙСМОТОМОГРАФИИ, МАГНИТНОГО ПОЛЯ, ПАЛЕОБИОГЕОГРАФИИ И КОМПЛЕКСНАЯ ИНТЕРПРЕТАЦИЯ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

© 2025 г. Л. В. Эппельбаум^{1, 2, *}, Ю. И. Кац³, Ц. Бен-Аврахам¹

¹Тель-Авивский университет, факультет точных наук, Рамат-Авив, 6997801 Тель-Авив, Израиль

²Азербайджанский государственный университет нефти и промышленности (АГУНП),

д. 20, просп. Азадлыг, AZ1010 Баку, Азербайджан

³Музей естественной истории – Национальный исследовательский центр Штайнхардта, Тель-Авивский университет, факультет естественных наук, Рамат-Авив, 6997801 Тель-Авив, Израиль

*e-mail: levar@tauex.tau.ac.il

Поступила в редакцию 11.02.2025 г.

После доработки 23.03.2025 г.

Принята в печать 28.03.2025

В представленной статье проведена количественная переинтерпретация остаточной гравитационной спутниковой аномалии. Дополнительное важное подтверждение дает распределение аномалий регионального магнитного поля ΔZ , сведенного к высоте 2.5 км над уровнем моря. На основе анализа детальных палеомагнитных исследований оценена средняя скорость вращения поверхностной проекции глубинной структуры за последние 70 млн лет – около 18 мм/год. Авторами построена палеобиогеографическая карта, ясно показывающая смещение типичной эфиопской фауны на северо-запад против движения часовой стрелки. Показано влияние вращающейся глубинной структуры на возникновение напряжения в вышележащих блоках земной коры и литосферы перед катастрофическими землетрясениями с магнитудами $M=7.9$ и $M=7.8$, произошедших 06.02.2023 в Турции. Синтез профилей сейсмической томографии позволил построить сейсмотомографическую схему расположения глубинной структуры. Эта схема хорошо совпадает с результатами анализа спутниковой гравиметрии и морских/наземных гравиметрических исследований, аномалиями геоида, распределениями магнитных аномалий, палеомагнитными данными, региональными направлениями векторов GPS, сейсмологическими и тектоно-структурными и минералого-петрологическими данными. Интегративное сочетание всех этих факторов подтверждает существование аномальной глубинной вращающейся структуры под Восточным Средиземноморьем и прилегающими регионами.

Ключевые слова: геодинамика, сейсмотомография, магнитное поле, кольцевая структура, палеобиогеография, комплексный анализ, Восточное Средиземноморье

DOI: 10.31857/S0016853X25020011, EDN: EGRKDV

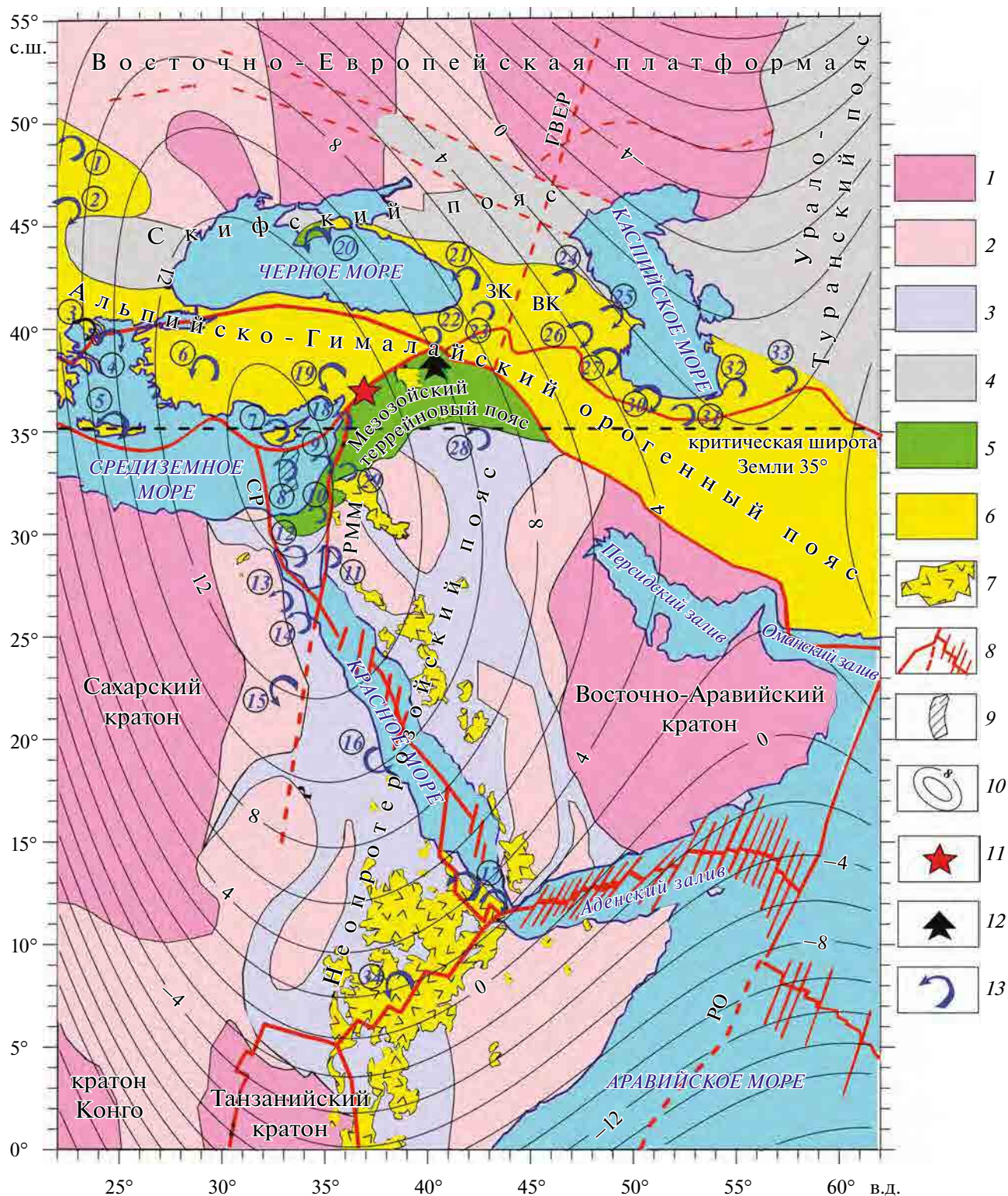
ВВЕДЕНИЕ

Известно, что глубинная геодинамика оказывает существенное влияние на приповерхностные геологические процессы [19, 25, 50, 53, 115]. В представленной статье продолжается комплексный геодинамический анализ региона северной Африки–Западной Азии, занимающего площадь около 20 млн км² (рис. 1).

В структурно-тектоническом плане этот регион включает в себя древние кратоны, более молодые разновозрастные тектонические пояса, глубинные разломы и остаточные мозаичные блоки океанической коры. В геодинамическом плане в регионе происходит взаимодействие гигантских тектонических плит (Евразийской,

Аравийской и Нубийской) и более мелких плитных и террейновых блоков [69, 140] с офиолитовыми и трапповыми поясами [19]. Исследуемый регион расположен в зоне сочленения между Центральной Гондваной и Евразией, геолого-геофизическая нестабильность которого определяется интенсивностью геодинамики – как коллизионного, так и рифтового типов [4, 13, 36, 39, 66, 70, 124, 129, 141, 142]. В центре рассматриваемого региона находится Восточное Средиземноморье, являющееся западным флангом прогрессирующей дуги Афро-Евразийского столкновения.

Сочетание обсуждаемых в статье сложных геолого-геофизических элементов требует



применения комбинированного структурно-геодинамического анализа с использованием современных методологий. Геофизические исследования Восточного Средиземноморья показали обширную зону развития утоненной континентальной коры и идентифицировали цепочку

доальпийских террейнов в этой области [39, 40]. Из этих геологических и геофизических особенностей одним из наименее изученных факторов является кипрская гравитационная аномалия, достигающая более 200 мГал в редукции Буге при сравнительно небольшой ширине [75, 76].

Рис. 1. Тектоно-палеомагнитная схема изучаемого региона, наложенная на остаточную гравитационную аномалию (по данным [19], с исправлениями и дополнениями).

Обозначено: СР – Синайский разлом; ТРММ – трансформный разлом Мертвого моря; ГВЕР – главный Восточно-Европейский разлом; ВСНР – Восточно-Средиземноморско-Нубийский разлом; РО – разлом Оуэн; ЗК – Западный Кавказ; ВК – Восточный Кавказ.

Положение границ Иранской плиты показано на основе анализа [22, 31, 150].

Обозначены элементы геодинамики, полученные из палеомагнитных (основные) и тектонических (дополнительные) данных (курсивные арабские цифры синим в кружках):

1 – пояс Пьеннинских клиппенов (Западные Карпаты) [116]; 2 – Гетический бассейн (Южные Карпаты – Мезия) [102]; 3 – п-ов Афон (Греция) [100]; 4 – о. Самотраки (Греция) [100]; 5 – о. Крит (Греция) [55]; 6 – Мендерес (западная Анатолия, Турция) [145]; 7 – о. Кипр [42, 43]; 8 – палеомагнитная гиперзона Киам Восточного Средиземноморья [20, 59]; 9 – Галилейская (Израиль) магматическая и блоковая системы [41, 132]; 10 – дайки Махтеш Рамона (террейн Негев) (на основе [59, 62]); 11 – блоковые системы залива Акаба (северный Египет) [34] и разломной зоны Мидьян (крайний запад Саудовской Аравии [37]); 12 – дайки Синайского полуострова (Египет) [91]; 13 – блоковая система Синайского залива (Египет) [45]; 14 – донные отложения северной части Красного моря [34]; 15 – кольцевой комплекс Мансури (плато Восточной пустыни, Египет) [108]; 16 – шовная зона Бараке (Красное море) [114]; 17 – северо-восток депрессии Афар [122]; 18 – центральная часть террейна Галилея-северный Ливан [85, 86]; 19 – Восточные Тавриды (Анатолия, Турция) [119]; 20 – сейсмотектоническая сдвиговая зона, Черное море (к югу от полуострова Крым, Россия) [2]; 21 – Рионский бассейн (Грузия) [35, 89]; 22 – Восточные Понтиды [89, 131]; 23 – Аджаро-Триалетский пояс (Грузия) [130]; 24 – Восточный Кавказ (горный Дагестан, Россия) [15]; 25 – Куринская депрессия (Азербайджан) [3, 16]; 26 – Сомхито-Карабахский пояс (Азербайджан) [11, 17, 99]; 27 – Нахичевань и Талыш (Азербайджан) [15, 131]; 28 – Ката-Раш (Ирак) [59, 60]; 29 – гора Хермон (северный Израиль) [153]; 30–33 – Иранская плита (северный Иран) [117]; 34 – центральная часть Эфиопской рифтовой системы [121].

1 – архейские кратоны; 2 – палео-среднепротерозойские пояса; 3 – неопротерозойский пояс; 4 – позднепалеозойские (герцинские) пояса; 5 – меловая часть мезозойского террейнового пояса (МТП); 6 – Альпийско-Гималайский орогенный пояс; 7 – кайнозойские траппы африкано-аравийского рифтового пояса; 8 – системы главных разломов; 9 – палеомагнитная гиперзона Киам обратной полярности (по [20, 59]); 10 – изолинии остаточной спутниковой гравитационной аномалии; 11 – зона высокомагнитудных землетрясений в Восточной Турции (06.02.2023); 12 – дистальный сектор МТП; 13 – элементы геодинамики, полученные из палеомагнитных (основные) и тектонических (дополнительные) данных

В нашей работе [19] было впервые приведено обоснование существования гигантской глубинной мантийной структуры, вращающейся против часовой стрелки в Восточном Средиземноморье. Центр этой структуры находится под островом Кипр, на критической широте Земли 35°.

Целью настоящей статьи является проведение дополнительного комплексного анализа ряда геофизических и геологических факторов, проливающих свет на обнаруженный феномен.

ОБЗОР ПРЕДШЕСТВУЮЩИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Анализ спутниковых гравитационных аномалий

В этом исследовании спутниковые гравитационные данные были получены из общемировой гравитационной базы данных (проектов Geosat и ERS [133]). Для построения исходной гравитационной карты [19] было использовано около 10 миллионов спутниковых гравитационных наблюдений. Eppelbaum and Katz [61] показали, что для исследования глубинной структуры обширных регионов (начиная с нескольких миллионов квадратных км) спутниковые гравитационные данные, пересчитанные

к поверхности Земли, могут быть использованы без каких-либо дополнительных редуций.

Для анализа гравитационных спутниковых данных было применено несколько эффективных методов, включая полиномиальную аппроксимацию. Остаточная аномалия, полученная из полиномиальной аппроксимации массива данных кубической поверхностью, схожа с результатами, полученными путем применения методов дистанционного оценивания и нелинейной фильтрации (см. рис. 1).

На полученных картах остаточных аномалий силы тяжести показана овальная (квазикольцевая) структура, отражающая глубокозалегающий источник этой аномалии. Схожий характер региональных аномалий был отражен на гравитационной карте длинноволновых (800–3500 км) аномалий силы тяжести в свободном воздухе [105].

Анализ гравитационных аномалий, наблюдаемых на суше и море

Зона спрединга рифта Красного моря очерчена интенсивным позитивным трендом гравитационной аномалии в редуции Буге [113], совпадающим с длинной осью остаточной гравитационной

спутниковой аномалии силы тяжести, в центре которой (на Кипре) наблюдается высокоамплитудная гравитационная аномалия в редукции Буге [76]. В нашей работе [19] приведено наглядное совпадение этих трех типов независимо наблюдаемых гравиметрических данных.

Положительные аномалии геоида отражают поднятие глубинной структуры, а понижение — ее периклинальную часть. Геодинамически эта карта хорошо согласуется с картой положения векторов GPS, остаточной гравитационной аномалией. Аномалии изолиний геоида также в значительной степени коррелируют с региональными тектоническими элементами [19].

Анализ данных GPS мониторинга

Анализ данных GPS [54, 129] показывает хорошо выраженное вращение против часовой стрелки. Контур этого вращения совпадает с остаточной гравитационной аномалией, полученной из спутниковых данных, и аномалиями геоида.

Критическая широта Земли

Согласно Véronnet (1912) [151], земной эллипсоид вращения имеет две критические широты $\cong \pm 35^\circ$. Взаимосвязь между средними широтами, факторами вращения и глобальной геодинамикой отмечена, например, в [14, 28]. Левин и др. [6], Levin et al. [106], провели анализ особенностей “критических широт” во вращающемся эллипсоиде, представили связь величины сжатия тела с угловой скоростью вращения и указали на усиление геодинамической активности на критических широтах и вблизи них. Следует подчеркнуть, что центр выявленной глубинной структуры практически совпадает с широтой 35° (см. рис. 1).

Анализ палеомагнитных данных

Центральная часть проекции глубинной квази-кольцевой структуры включает в себя следующие регионы (см. рис. 1):

- Восточные Тавриды (Турция) [122];
- Эгейский регион Греции [104];
- Центральный Ливан [86];
- о. Кипр [42];
- юг и север Израиля [60, 132];
- Восточный Египет [108].

Анализ палеомагнитных данных свидетельствует, что тектонические блоки в пределах этих регионов характеризуются в основном вращением против часовой стрелки. Западный Кавказ связан с периферической частью глубинной кольцевой

структуры и в основном показывает движение против часовой стрелки [35, 89, 131] (см. рис. 1). Восточный Кавказ, расположенный вне контура структуры, большей частью отражает свое вращение по часовой стрелке [15, 16, 99, 131] (см. рис. 1).

Однако палеомагнитные данные, полученные в западной периферической части структуры (в зоне сопряжения различных тектонических плит и блоков), показывают геодинамическую неустойчивость. В частности, это следует из данных по различию новейших движений северной и южной части Эгейского моря. Палеомагнитные исследования по северо-эгейским гранитоидам и вулканитам Афона и Самотраки свидетельствуют о повороте этого региона, относящегося к Родопскому массиву Евразийской плиты, по часовой стрелке, тогда как большая часть данных по району центральной и южной части Эгейского бассейна и, в частности, по о. Крит демонстрируют тенденцию поздне-кайнозойского поворота в направлении против часовой стрелки [55, 100].

Подобная неустойчивость поворота различных тектонических блоков проявляется также в Карпатском регионе, где пояс Пьеннинских клиппенов Западных Карпат движется в направлении против часовой стрелки, а Южно-Карпатский гетический бассейн Мезии поворачивается в направлении по часовой стрелке [102, 116].

Древняя океаническая кора и палеомагнитная гиперзона Киама

В центре проекции глубинной структуры зарегистрированы аномально низкие аномалии теплового потока ($\sim 15\text{--}30 \text{ мВт/м}^2$) [30, 57, 59], которые мы рассматриваем как отображение древнего возраста литосферы в изучаемом регионе. Уникальность этой зоны подчеркивает тот факт, что один из самых древних блоков океанической коры, относящейся к палеомагнитной гиперзоне Киама обратной полярности (поздний карбон — середина поздней перми), верхняя кромка которого залегает примерно на 10–11-километровой глубине, был обнаружен ранее на основе анализа комплекса геолого-геофизических данных [20, 60] в центре проекции глубинной структуры в нескольких десятках км к югу от о. Кипр (рис. 2).

Первоначальное формирование этого блока [59], очевидно, произошло в регионе севернее современного положения Персидского залива. Далее этот тектонический блок под воздействием кругового движения глубинной структуры против часовой стрелки был перемещен по региональным

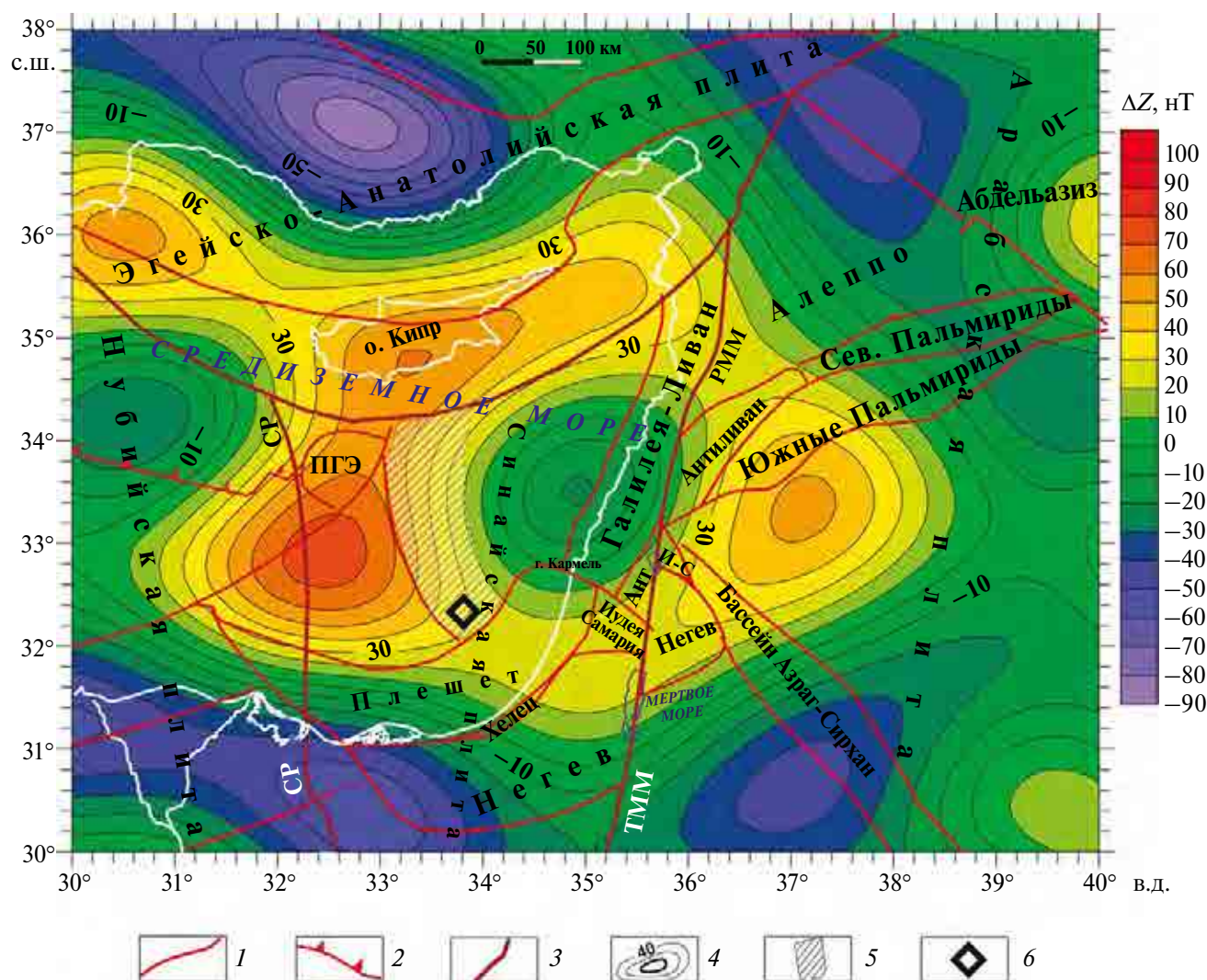


Рис. 2. Карта магнитного поля ΔZ , пересчитанная на 2.5 км над уровнем моря (исходные данные по [157]) для Левантийского бассейна и прилегающих регионов с главными тектоническими элементами.

Показана (линия белым) граница суша–море; данные теплового поля по [95]).

Обозначено: ПГЭ – подводная гора Эратосфен; ТММ – трансформный разлом Мертвого моря; СР – Синайский Разлом; И–С – Иудея–Самария; Ант – Антиливан.

1 – межплитные разломы; 2 – южная граница Средиземноморского аккреционного пояса; 3 – внутриплитные разломы; 4 – изолинии магнитного поля; 5 – контур погребенного блока океанической коры, относящегося к палеомагнитной гиперзоне Киам (по [20, 59]); 6 – отрицательная тепловая аномалия, фиксирующая южное окончание океанического блока Киам

трансформным разломам в его сегодняшнее местоположение. Можно предположить, что именно устойчивость этого ротационного движения предотвратила процесс субдуцирования этого океанического блока и он сохранился до настоящего времени. Последние исследовательские данные показывают, что южное окончание этого блока характеризуется аномально низкими значениями температуры на глубинах 2, 6 и 8 км [95].

Асимметрия осадочных бассейнов

Развитие ряда асимметричных бассейнов вдоль трансформных континентальных разломов

в восточной части проекции глубинной структуры было изучено в [38, 74, 136]. Нами было показано [19], что асимметричная структура зоны регионального спрединга Красного моря и трансформного сдвига Мертвого моря и Галилейского озера являются компонентой воздействия вращающейся глубинной структуры. Например, используя общий полого-дугообразный характер трансформного разлома Мертвого моря, Segev [137] была предложена новая геодинамическая концепция для объяснения асимметрии тектонотипа грабеобразных структур системы глубинного сдвига разлома Мертвого моря [19].

По всей вероятности, она обусловлена развитием здесь не только сдвиговых, но и вращательных перемещений блоков земной коры. В Акаба-Эйлатском заливе с юга на север развиты три системы глубоководных трогов, сдвинутые с востока на запад, образующие серию кулисообразных прогибов [37]. Подобный характер расположения структур также подтверждает наше предположение [19], что здесь развит механизм не только сдвига, но и вращения блоков в направлении против часовой стрелки.

Минералого-петрологический анализ

Выходы различных магматических элементов и глубинных высокобарических минеральных комплексов в Восточной Турции [23, 48, 110], на о. Кипр [48, 77, 143], на западе-севере Сирии [18], в районе Кармель (север Израиля) [52, 79, 80, 109, 111], в районе Махтеш Рамон (юг Израиля) [21, 149] и в центральной зоне Восточной пустыни (Египет) [33] свидетельствуют о высокой тектоно-геодинамической активности в земной коре и верхней мантии над овалом глубинной структуры. Очевидно, что вращение глубинной структуры создает особые геодинамические предпосылки для формирования месторождений полезных ископаемых над ее проекцией.

ПОЛУЧЕННЫЕ ДАННЫЕ ГЕОЛОГО-ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Переинтерпретация остаточной гравитационной спутниковой аномалии

В данном исследовании с использованием способов анализа, описанных в [58], была переинтерпретирована остаточная гравитационная спутниковая аномалия, обусловленная глубинной структурой (см. рис. 1, изолинии аномалии).

Для количественного анализа этой аномалии улучшенными способами касательных и площадей были использованы интерпретационные модели сферы и горизонтального кругового цилиндра. Осредненное значение залегания центра масс аномального объекта составило около 1450 километров.

Анализ магнитного поля ΔZ

Анализ магнитного поля был начат нами в работе [19], где было показано, что пересчитанная к полюсу, т.е. освобожденная от влияния наклонного намагничивания, карта магнитных аномалий Аравийского щита хорошо согласуется

с простиранием проекции глубинной структуры [155]. Это свидетельствует о влиянии глубинного аномального объекта на породы, находящиеся на глубинах не более нескольких десятков километров.

Нами показано сочетание усредненного магнитного поля ΔZ , пересчитанного для 2.5 км над уровнем моря, с остаточной спутниковой гравитационной аномалией и распределением векторов GPS (рис. 3).

Построенная карта магнитного поля ΔZ впервые позволила отобразить реальность вращения апикального центра в осевой зоне глубинной мантийной структуры Восточного Средиземноморья [64] (см. рис. 2, см. рис. 3).

При этом региональные зоны распределения магнитного поля совпадают с изолиниями силы тяжести, обусловленными вращающейся глубинной структурой (см. рис. 3).

Простой визуальный анализ этой карты демонстрирует, что остаточная гравитационная аномалия, распределение векторов GPS и мозаика магнитного поля создают единый ансамбль, отображая влияние одного и того же глубинного объекта.

Магнитная карта ΔZ для Восточного Средиземноморья (рис. 2) хорошо согласуется также с тектоническими данными и прилегающими структурными зонами (см. рис. 1, см. рис. 2).

Здесь мы видим, что структура Левантийского бассейна с доминирующими положительными магнитными значениями, сочетающимися с отрицательными значениями в восточном блоке, в свою очередь, окружена полем с отрицательными значениями ΔZ до -90 нТл. Эта сложная картина магнитного поля вызвана существенным аномальным эффектом от древнего океанического блока Киама с обратной намагниченностью и вращательной геодинамикой изучаемого региона (см. рис. 2).

Средняя скорость вращения структуры, рассчитанная по палеомагнитным реконструкциям

Morris et al. [120] установили, что офиолиты массивов Троδος (о. Кипр) и Баер-Бассит (Сирия) были подвергнуты значительному вращению против часовой стрелки. Палеомагнитные реконструкции, проведенные рядом авторов [42, 43, 120], позволили построить наглядные геодинамические схемы, иллюстрирующие вращение структуры о. Кипр против часовой стрелки от мелового периода до позднего кайнозоя (рис. 4).

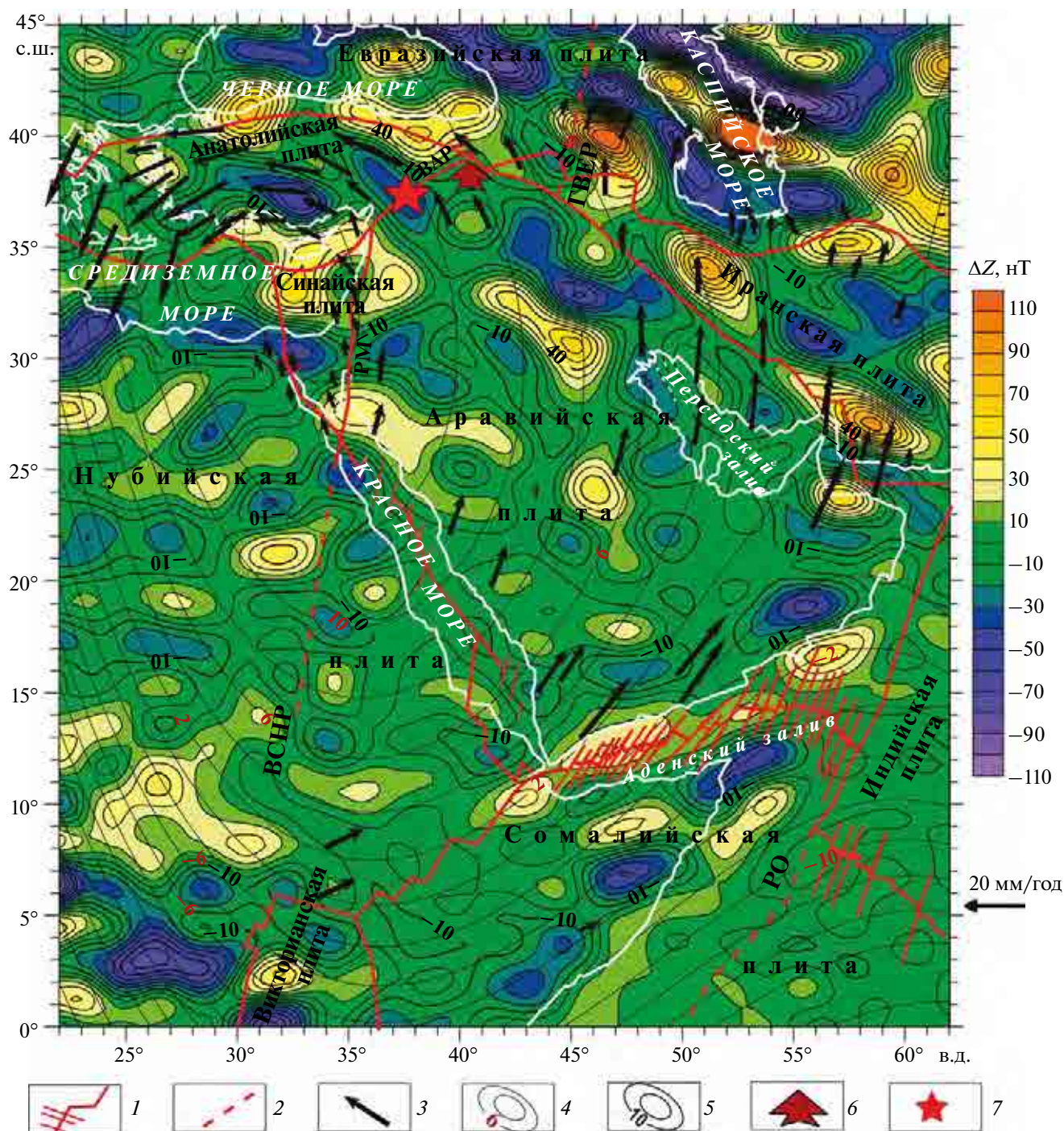


Рис. 3. Усредненная магнитная карта ΔZ , пересчитанная на один общий уровень 2.5 км над уровнем моря (исходные данные по [157]) для Африкано-Аравийского региона с основными тектоническими элементами, положением векторов GPS и остаточной спутниковой гравитационной аномалией.

Показана (линия белым) граница суша–море.

Обозначено: SF – Синайский разлом; ТММ – трансформный разлом Мертвого моря; ВАР – Восточно-Анатолийский разлом; ГВЕР – Главный Восточно-Европейский разлом; ВСНР – Восточно-Средиземноморско–Нубийский разлом; РО – разлом Оуэн; МТП – мезозойский террейновый пояс.

1–2 – разломы: 1 – внутриплитные, 2 – межплитные; 3 – векторы GPS (по [94, 98, 112, 129]); 4 – изолинии остаточного гравитационного поля (по [19]); 5 – изолинии магнитного поля; 6 – дистальная часть МТП; 7 – эпицентры двух основных катастрофических землетрясений, произошедших 06.02.2023 г. на востоке Турции (по [96])

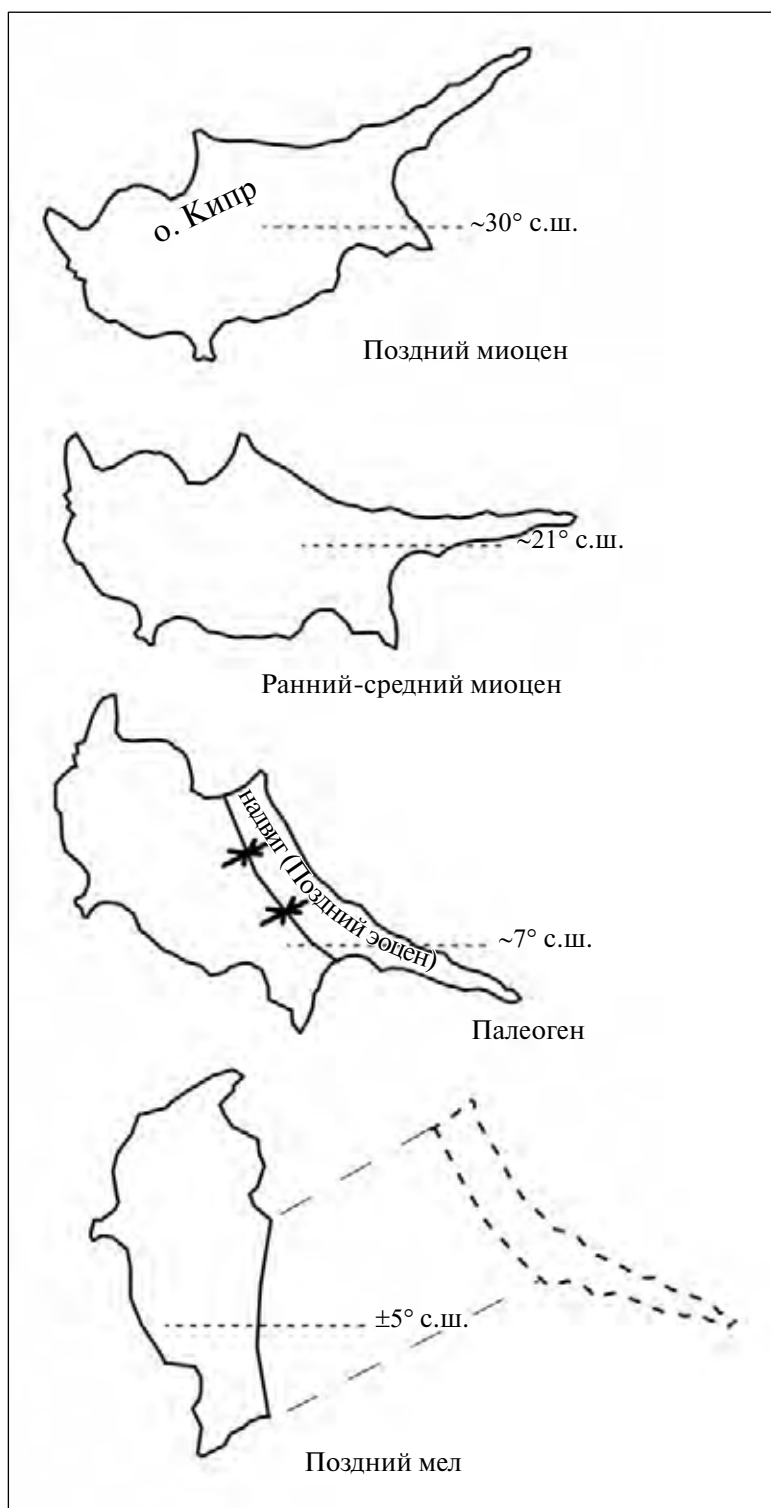


Рис. 4. Геодинамическая схема, иллюстрирующая вращение структуры о. Кипр от мелового периода до позднего кайнозоя по палеомагнитным данным (по данным [42], с изменениями).

Надо отметить, что схемы вращения субтеррейнов Махтеш Рамон (южный Израиль) и Хермон (северный Израиль) против часовой стрелки носят схожий характер [63], хотя здесь и имеется некоторое несогласие.

Средняя скорость вращения структуры может быть определена по детально исследованным палеомагнитным реконструкциям о. Кипр. Остров Кипр находится в центре проекции глубинной структуры и, соответственно, вращается вместе

с ней. Из рисунка ясно видно, что о. Кипр повернулся на 90° (1.5708 радиан) за время от нижне-среднего миоцена до позднего мела.

Для осредненной оценки периода времени ΔT будем использовать середины указанных геологических периодов: $\Delta T \approx 83 - 18 = 65$ млн лет. Средний радиус глубинной вращающейся структуры R может быть оценен как 800 км.

Для вычисления применена простейшая формула из механики, где скорость вращения объекта может быть определена из выражения

$$v = \frac{\Delta\varphi}{\Delta T} R, \quad (1)$$

где $\Delta\varphi - 90^\circ$, переведенные в радианы (1.5708), R — осредненный радиус вращающегося объекта (в мм), ΔT — время вращения (в годах). Подставляя вышеуказанные данные в формулу (1), мы получаем значение ≈ 18 мм в год, что близко к современным значениям вращения, определенным по данным GPS [54, 129].

Более подробно геодинамика различных блоков структур в пределах рассматриваемой территории Гондваны, в том числе и района Кипра, рассмотрена ранее в [19, с. 79–81]. Безусловно, помимо влияния глубинной структуры данный регион подвергнут воздействию других сложных тектоно-геодинамических эффектов на меньших глубинах.

Палеобиогеографическая схема

Изучение палеобиогеографических данных подтверждает глубинное вращение структуры и его связь с приповерхностными структурами. Рассматриваемый регион имеет важное значение для анализа спрединговой стадии развития (в основном мезозойской) океана Неотетис и прилегающих частей Гондваны и Лавразии. Особое внимание уделяется аномальным биогеографическим показателям, в частности остаткам раковин гигантских брахиопод *Septirhynchia*–*Somalirhynchia* [19] и средиземноморских брахиопод *Pygore* [65]. На основе анализа многочисленных источников были выделены три палеобиогеографические провинции (рис. 5):

- Бореальная (Евразийский шельф);
- Средиземноморская (Средиземноморский бассейн);
- Эфиопская (Нубийско-Аравийский бассейн).

Построенная палеобиогеографическая карта демонстрирует явление (см. красную стрелку) геодинамического перемещения тектонических блоков с остатками эфиопской фауны от современного

положения Персидского залива в Левант вплоть до Восточной пустыни Египта (см. рис. 5).

Этот факт доказывает движение против часовой стрелки восточных и центральных частей приповерхностных проекций аномальной глубинной структуры в юре и раннем мелу.

Таким образом, районы суши и форланда Западной Аравии и Восточной Нубии тектонически несогласно связаны с аллохтонным мезозойским террейновым поясом (МТП), передвигавшимся против часовой стрелки вдоль северной зоны центральной Гондваны. Эта геодинамическая особенность позволяет объяснить уникальность биогеографически аномальной зоны приращения террейновых блоков к палеоконтиненту Гондвана в левантийскую фазу тектонической активности [59]. Севернее этого пояса в пределах окраинно-океанической зоны (вдоль трансформных дуговых разломов) аллохтонный блок с палеомагнитной гиперзоной Киамы сместился на запад в современный Левантийский бассейн (см. рис. 3; см. рис. 5).

Наиболее важным выводом является существенная палеобиогеографическая дифференциация юрских и меловых экосистем северного и южного бортов океана Неотетис [65]. Это позволяет сделать заключение о времени начала воздействия вращающейся глубинной структуры на приповерхностные блоки земной коры. По нашим оценкам, это время может составлять 160–180 млн лет.

Об этом свидетельствует также возраст дайковых роев, развитых в субтеррейне Махтеш Рамон (южный Израиль). По радиометрическим данным, возраст наиболее древних даек составляет 165.7 млн лет [103]. Геодинамика вращения дайковых роев против часовой стрелки вблизи магматически активной зоны океана Неотетис в течение юрского и мелового периодов объяснена в работе [63].

Блок древней океанической коры, отвечающий палеомагнитной гиперзоне Киамы

Выявленный блок океанической коры с палеомагнитной гиперзоной Киамы был сформирован на расстоянии более 1000 км к северо-востоку, вблизи современного положения Персидского залива [20, 59, 84].

Рассмотрим эту структуру более подробно, чтобы показать связь между современными и палеокоординатами. Хорошо известно, что океан Неотетис начал формироваться в ранней перми вблизи восточной Аравии на границе с мезозойским террейновым поясом [19, 60, 84].

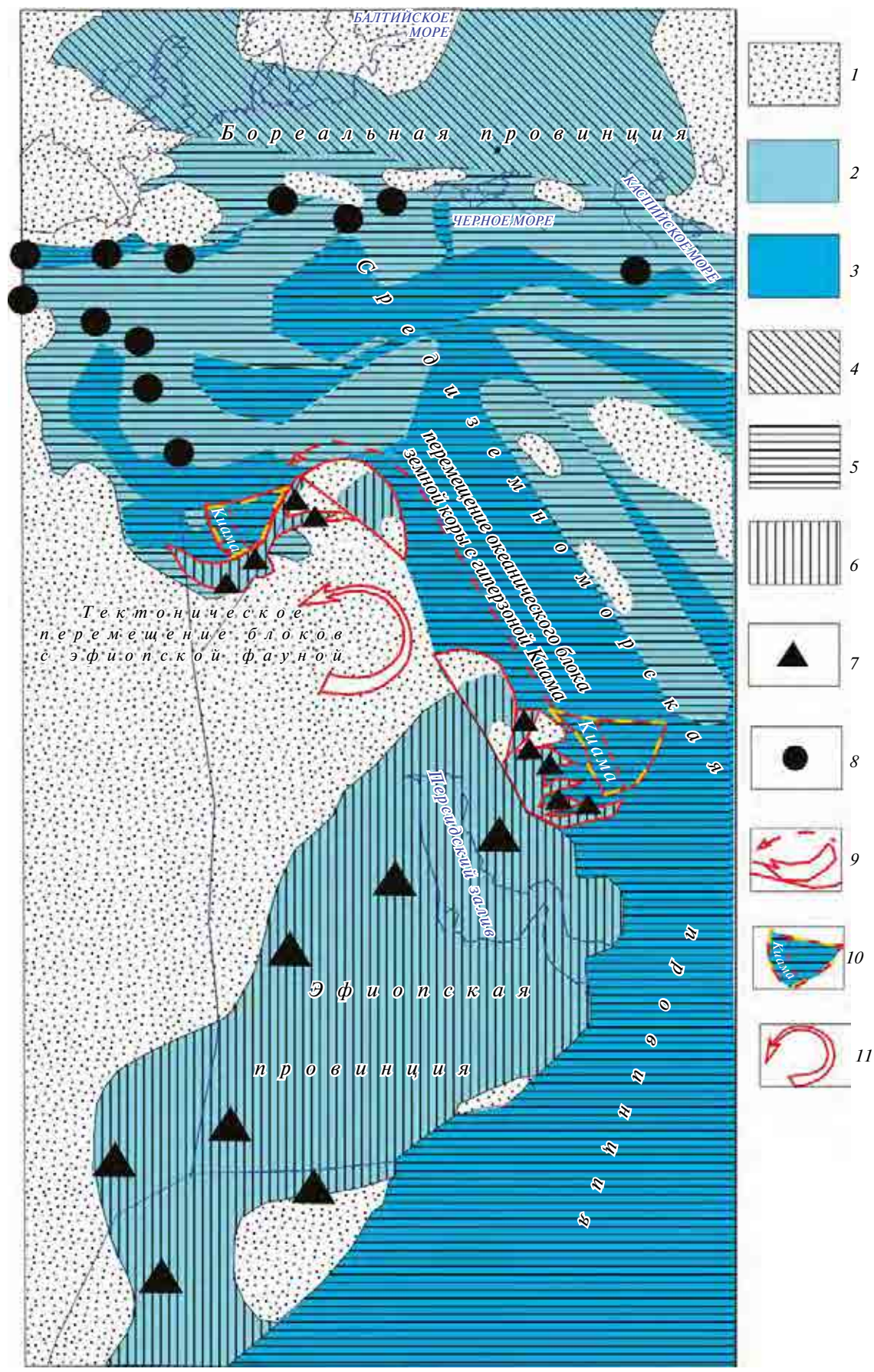


Рис. 5. Схематическая позднеюрская палеобиогеографическая карта переходной области Евразии и Гондваны с элементами последующей раннемеловой геодинамики мезозойского террейнового пояса.

При составлении карты использовались данные палеобиогеографические (по [7, 24, 29, 51, 65, 71, 87, 88, 92, 154]) и тектоно-геодинамические (по [19, 84, 134, 141]).

Показаны (линии синим) границы между морями и сушей.

1 – суша; 2 – континентальные щиты и дуги; 3 – океанические плато и рифты; 4–6 – палеобиогеографическая провинция: 4 – Бореальная, 5 – Средиземноморская, 6 – Эфиопская; 7–8 – точки нахождения брахиопод: 7 – эфиопских *Septirhynchia-Somalirhynchia*; 8 – средиземноморских *Pugore*; 9 – тектонические линии дискордантных палеобиогеографических замещений; 10 – блок океанической коры с палеомагнитной гиперзоной Киама; 11 – тектонические блоки, повернутые против часовой стрелки

Этот пояс развивался здесь в геологическом времени вплоть до границы юры и мела. После этого он начал двигаться против часовой стрелки вдоль дуговых трансформных разломов до середины раннего мела (133 млн лет назад), до консолидации с северным выступом аравийской части Гондваны. Аналогичное движение этого консолидированного блока (Киама), сложенного первичной, в основном пермско–триасовой океанической корой, началось вдоль дуговых трансформных разломов. В результате этот блок причленился в зоне к северу от аллохтонного мезозойского террейнового пояса.

Изначально этот блок Киама находился в 150–200 км севернее северо-западного края Персидского залива, на 32° северной широты, т.е. почти на тех же широтах, что и в современном аллохтонном положении. Учитывая дугообразное движение в пределах Аравийского выступа, этот блок спускался в Восточно-Средиземноморский прогиб с северо-востока, от 38–39° до 32° с.ш. в современных координатах.

Океанический блок Леванта с аномально древней корой – до позднего палеозоя (палеомагнитная гиперзона Киама) – изучен на основе комплексирования геофизических методов и корреляцией с обширным полем офиолитов Кармель–Нижняя Галилея [20, 40, 59, 62] (см. рис. 1, см. рис. 2, см. рис. 5, рис. 6А).

Геологически для изучения этой территории комплексно применялись радиометрические, фациальные и петрологические методы (см. рис. 6Б).

Здесь развита серия из четырех офиолитовых покровов общей мощностью до 4000 м и протяженностью до 40 км (рис. 7).

При этом в основании толщи развит наиболее молодой покров, содержащий офиолитовый меланж и кератофиры (возрастом до 164.3 млн лет). Наиболее древний покров оливин-базальтового меланжа (возрастом до 222.4 млн лет) занимает верхнюю часть разреза [62].

Это явление свидетельствует о том, что присоединение краевой части офиолитового пояса вблизи Галилейско-Ливанского террейна осуществлялось не линейными смещениями, а вращением океанической плиты против часовой стрелки. Более того, его древнейшая часть (относящаяся к палеомагнитной гиперзоне Киама) образует краевую западную границу Левантийского океанического террейна (рис. 6А) и, согласно сейсмическим данным [40], надвинута на более молодую автохтонную левантийскую кору.

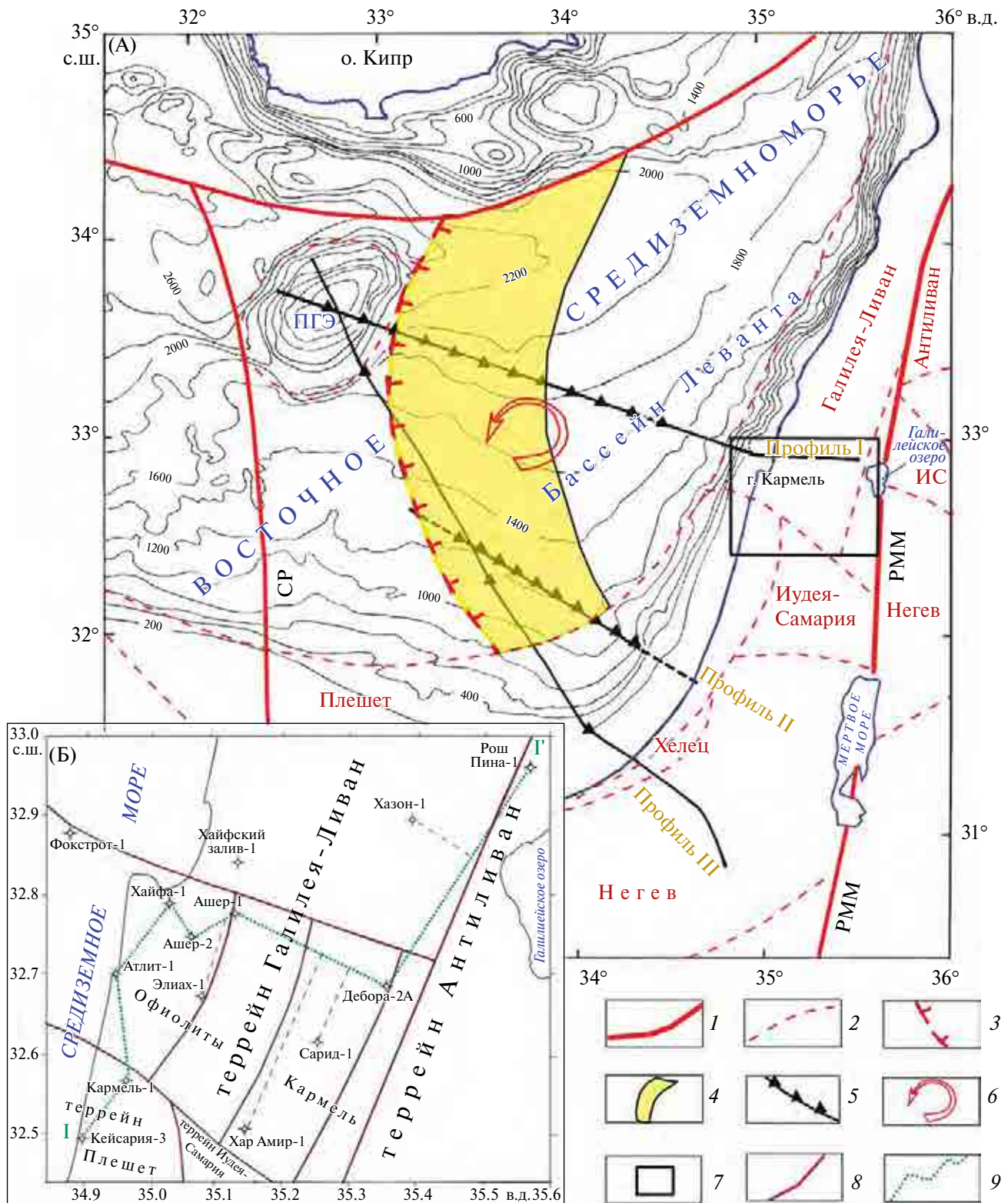
Палеомагнитный профиль Кармель-Галилея (север Израиля)

Приведена тектоническая схема северного Израиля с положением палеомагнитного профиля Кармель–Галилея (см. рис. 6Б).

Тектоно-палеомагнитный профиль построен не по отметкам современного рельефа, а по кровле аккумулятивной поверхности выравнивания, сформированной неокон–аптской толщей эффузивных траппов и отчасти обломочных осадков, заполняющих эрозионную поверхность, обусловленную подвижками Левантийской тектонической фазы (рис. 7, линия профиля I–I').

Этот профиль протягивается от юго-запада к северо-востоку – от побережья Средиземного моря до плато к северу от Галилейского озера (см. рис. 6Б). Линия разреза проходит через серию глубоких скважин от Кейсария-3 и Кармель-1 в террейне Плешет и далее к северу – через скважины Атлит-1, Хайфа-1, Ашер-2, Ашер-1 и Дебора-2А в террейне Галилея–Ливан и в пластинах офиолитов Кармель, переходя далее на север к разрезу скважины Рош Пина-1 в западной окраине террейна Антиливан.

Глубокие скважины, не проходящие через линию профиля, также использовались для построения как палеогеологического разреза, так и палеотектонической схемы поверхности левантийского несогласия в районе Кармель–Верхняя Галилея (см. рис. 7).



Террейны Плешет и Антиливан тектонически несколько приподняты по сравнению с террейном Галилея–Ливан. Этот профиль построен по кровле аккумулятивной выравнивающей поверхности нижнемеловых траппов, относящихся

к палеомагнитной зоне Халал-1 (105–131 млн лет) (здесь использована классификация палеомагнитных суперзон, предложенная Молостовским и др. [9]). Нижележащие триасово-юрские толщи, слогающие чехол карбонатной платформы МТП,

Рис. 6. (А) — положение комплексных сейсмо-грави-магнитных профилей в Восточном Средиземноморье и контур обратно намагниченного океанического блока земной коры (отвечающего палеомагнитной зоне Киамы) с данными батиметрии и элементами тектоники ([40, 63], с исправлениями и дополнениями); (Б) — упрощенная тектоническая схема центральной части северного Израиля с расположением скважин и палеомагнитного профиля I—I' (при построении карты были использованы данные из [59, 72]).

Показана (линия синим) граница между сушей и водными бассейнами.

Обозначено: ПГЭ — подводная гора Эратосфен; ИС — Иудея—Самария; РММ — разлом Мертвого моря; СР — Синайский разлом; Ан — Антиливан.

1 — границы литосферных плит; 2 — границы внутриплитных структур; 3 — граница фронтального надвига аллохтонного блока древней океанической коры Неотетис на автохтонную меловую кору бассейна западного Леванта; 4 — пространственное положение верхней кромки блока Киамы на глубинах от 10 до 11 км; 5 — расположение комплексных геофизических профилей (черные треугольники указывают на положение океанских донных сейсмометров); 6 — направление геодинамического перемещения Левантийского террейна с зоной Киамы из бассейна Неотетис в бассейн Леванта; 7 — контур положения (Б) с палеомагнитным профилем на карте (А); 8 — дизъюнктивные границы террейнов и офиолитовых пластин района Кармель—Галилея; 9 — положение палеомагнитного профиля I—I'

содержат дайки и силлы титон-неокомских базальтоидов (132–153 млн лет) и относятся к Гиссарской палеомагнитной зоне. Что касается самих террейнов, то карбонатная платформа представляет собой автохтонный комплекс, однако и карбонаты юры, и юрско-меловые интрузивные траппы были сформированы на доколлизийной стадии, когда террейны граничили с южной частью океана Неотетис на границе с Гондванским форландом.

Палеомагнитно-геодинамический профиль свидетельствует о развитии в Галилео-Ливанском террейне аллохтонного комплекса офиолитов, залегающего над карбонатной платформой (см. рис. 7).

Он образует четыре пластины разного возраста. Нижняя из них, самая молодая, сложена кератофировым меланжем с возрастом 162–164 млн лет (Омолонская палеомагнитная зона) и покрыта относительно глубоководными верхнеюрскими карбонатами, пронизанными интрузивными траппами Гиссарской зоны.

Две средние офиолитовые пластины сложены спилитовым и оливин-базальтовым меланжем (188–206 млн лет) и глубоководными юрскими карбонатами и, в целом, относятся к Омолонской палеомагнитной зоне.

Верхняя офиолитовая пластина, самая древняя, с возрастом 197.4–222.4 млн лет, сложена базальтовым меланжем и покрыта юрскими карбонатами (174 млн лет). Этот возраст соответствует палеомагнитным зонам Иллаварра-Омолон (см. рис. 7).

Динамика последовательного прикрепления офиолитовых пластин при коллизийных и сдвиговых перемещениях океанических плит и Галилео-Ливанского террейна в левантийскую фазу тектогенеза на рубеже раннего и позднего го-терива рассматривалась ранее [60]. Было показано,

что амплитуда горизонтальных смещений офиолитовых пластин могла достигать 120 км [60].

Анализ региональных геодинамических данных

Зона спрединга Красного моря содержит также признаки глубинной геодинамической активности [19] — эпицентры землетрясений на больших глубинах [148, 156]. Зона красно-морского спрединга совпадает с длинной осью вращающейся глубинной квазиэллипсоидной структуры. Хорошо известно, что длинная ось вращающейся структуры является наиболее геодинамически ослабленной зоной [1].

С.А. Ковачев и А.А. Крылов [5] напрямую связывают микросейсмичность в этом регионе (глубиной до 180 км) с вращающейся структурой мантии (впервые выявленной в работе [19]). Этот факт является дополнительным аргументом влияния глубинной вращающейся структуры на вышележащие геологические образования.

Подчеркнем, что вулкан Санторин, расположенный вблизи критической широты 35° с.ш. и несколько к западу от апикальной зоны проекции мантийной структуры, стал причиной одного из самых катастрофических событий в мировой истории (17 век до н. э.) [67]. В настоящее время (на 11 февраля 2025 г.) здесь была зарегистрирована повышенная геодинамическая активность.

Геодинамический анализ катастрофических землетрясений в Восточной Турции 06.02.2023

Ряд авторов указывают на значительное накопленное напряжение в этой области [26, 27, 90, 125, 127, 128, 136, 144]. Последние катастрофические землетрясения в Восточной Турции требуют их геодинамического осмысления. Два наиболее сильных события с магнитудой $M=7.95$ и $M=7.86$,

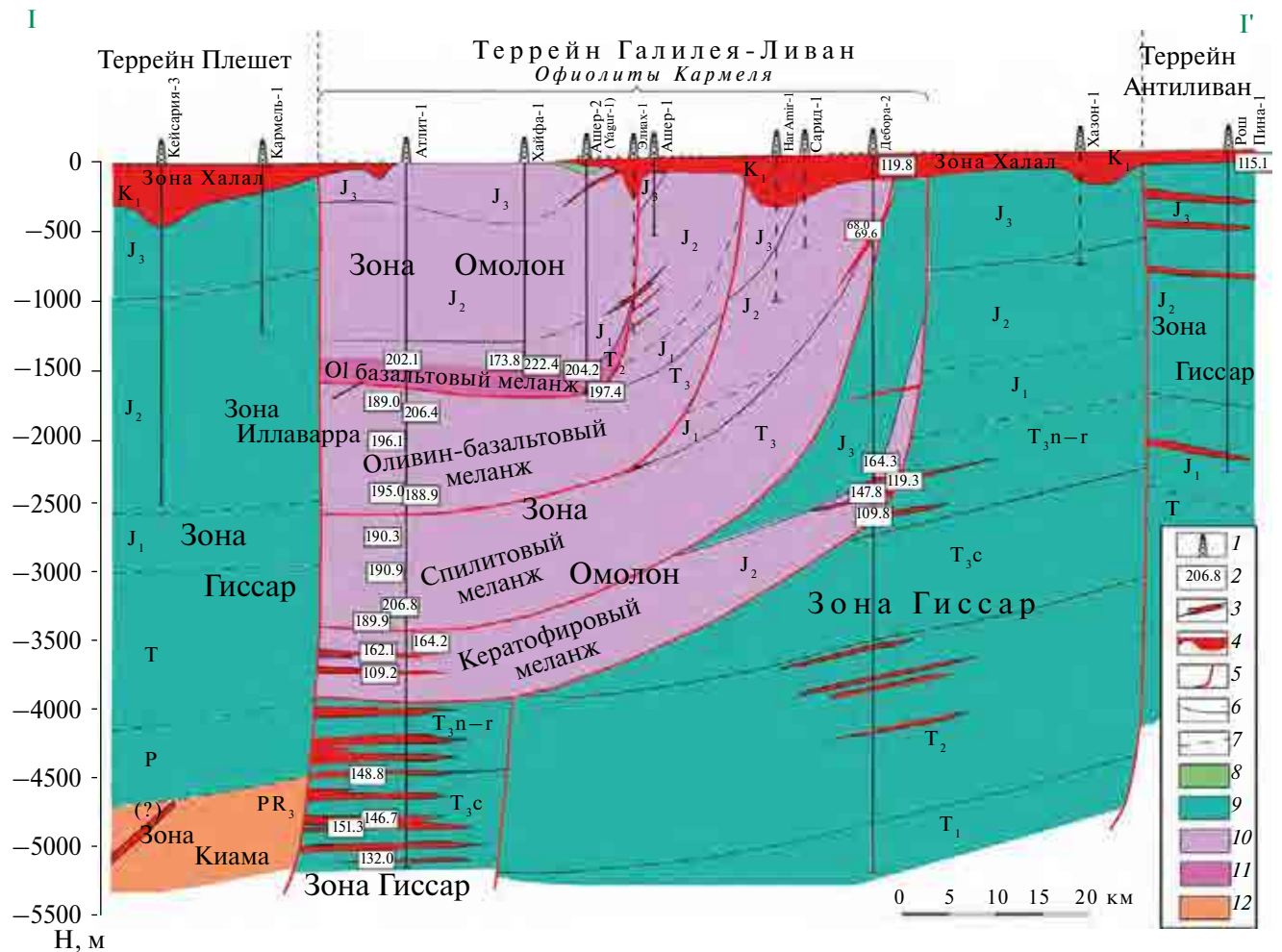


Рис. 7. Палеомагнитный профиль I—I' региона Кармель—Галилея по кровле аккумулятивной поверхности нижнемеловых траппов (с использованием данных [56, 60, 62, 72, 73, 78, 81, 84, 135]).

Положение профиля I—I' — см. рис. 6Б.

1 — скважины; 2 — радиометрический возраст; 3 — дайки и силлы; 4 — траппы; 5 — разломы; 6 — установленные стратиграфические границы; 7 — предполагаемое положение стратиграфических границ; 8—12 — палеомагнитные зоны: 8 — Халал, 9 — Гиссар, 10 — Омолон, 11 — Иллаварра, 12 — Киама

согласно оценкам USGS [93], наблюдались с интервалом в 9 часов 06 февраля 2023 года, за ними последовала серия афтершоков:

- 4 афтершока с магнитудой $M \geq 6$;
- около 40 афтершоков с магнитудой $M \geq 5$;
- более 200 афтершоков с магнитудой $M \geq 4$.

Значения ускорения грунта, зарегистрированные в некоторых районах вблизи разрыва разлома, превышали $1g$ [35] и даже $2g$ [47], т.е. амплитуда этих катастрофических землетрясений, возможно, была еще выше. Эти геодинамические события были самыми мощными землетрясениями в Турции за последние 2000 лет [97]. По данным Karabulut et al. [96], этим катастрофическим землетрясениям предшествовало многолетнее сейсмическое “молчание”.

Этот факт свидетельствует о длительном накоплении сейсмического напряжения.

Приведенные нами значения указывают на колоссальное напряжение, созданное в земной коре [64]. Регион, где произошли эти сильнейшие землетрясения, представляет собой тектонически сложную зону, состоящую из четырех тектонических плит — Евразийской, Аравийской, Африканской и Эгейско-Анатолийской. Совместное перемещение этих плит, состоящих из тектонических элементов разного возраста, происходит со средней скоростью 8–20 мм в год [54, 129].

Однако после двух отмеченных мощных толчков Эгейско-Анатолийская плита сместилась на юго-запад (т.е. против часовой стрелки)

на три метра; далее это смещение продолжалось еще несколько раз (всего плита сместилась более чем на 12 метров) [8]. Таким образом, указанное смещение произошло по ходу вращения гигантской мантийной структуры.

Обобщенные данные глубинного сейсмотомографического анализа

Присутствие аномальной структуры в нижней мантии под Восточным Средиземноморьем и окружающими регионами подтверждается результатами глубинной сейсмической томографии [12, 107, 138, 146, 147, 152], которые указывают на аномальные скорости прохождения продольных и поперечных волн на глубинах 1200–1900 км.

Нами приведены профили, построенные на основе [107], где белыми кружками нами обозначены центры распределения аномальных масс в нижней мантии [12] (рис. 8, рис. 9).

На основе анализа этих и других профилей нами была построена сейсмотомографическая схема, совмещенная с остаточной гравитационной аномалией, выделенной из спутниковых данных [12, 83, 107, 147] (рис. 10).

По сейсмотомографическим данным нами было построено распределение центра масс аномальной структуры в нижней мантии. При этом наименьшие глубины от 1400 до 1500 км совпадают с изолиниями апикальной части глубинной мантийной структуры, а наибольшие (от 1800 до 1900 км) приурочены к периклинальным зонам этого поднятия. На этой схеме хорошо видно согласное расположение этих независимых геофизических данных (см. рис. 10).

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В данной работе осуществлен комплексный анализ региона Северная Африка – Западная Азия, где представлены многочисленные активные разломы и взаимодействующие тектонические пояса, сложный контур континентальной и океанической коры разного возраста и высокая геодинамическая активность. Кроме того, этот регион характеризуется существенными аномалиями сейсмических скоростей, зарегистрированными в верхней и нижней мантии, что свидетельствует о сложности строения на этих глубинах. Мы предполагаем, что тектоническая нестабильность этого региона, расположенного в зоне сочленения Центральной Гондваны и Евразии, определяется геодинамической

интенсивностью глубинных процессов в нижней мантии [19]. По мнению Оровецкого и Кобалева [10], один из двух геодинамических палеоэкваториальных узлов Земли находится практически в геометрическом центре проекции выявленной глубинной структуры.

Приведенные в данной работе новые доказательства существования вращающейся против часовой стрелки гигантской мантийной структуры и ее воздействия на вышележащие геологические образования и тектонические блоки практически не вызывают сомнения.

Мы задаемся вопросом: что может представлять собой выявленная мантийная вращающаяся структура? Многие ученые полагают, что наши знания о нижней мантии Земли еще крайне малы.

Garnero and Richardson [46] недавно опубликовали статью о существовании целых “материков” в нижней мантии Земли, характеризующихся повышенным содержанием железа, и, соответственно, более высокими скоростями прохождения сейсмических волн. Мы полагаем, что одного геофизического или геологического метода как для выявления подобных глубинных структур, так и для распознавания их влияния на поверхностные (в сравнении с глубиной залегания структуры) геологические образования совершенно недостаточно. Поэтому мы и используем возможно широкий комплекс геолого-геофизических методов.

Ранее выявленные доказательства включали следующие факторы [19]:

i – остаточная эллиптическая гравитационная аномалия, полученная полиномиальной обработкой спутниковых наблюдений;

ii – совпадение гравитационных аномалий, наблюдаемых на земной (водной) поверхности, со спутниковой остаточной аномалией;

iii – наличие эллиптического распределения аномалий GPS, показывающих движение против часовой стрелки, и совпадающее с остаточной гравитационной аномалией;

iv – аномалия изолиний геоида, отвечающая пунктам (1) и (3);

v – преобладающее направление палеомагнитных векторов, показывающее движение тектонических блоков против часовой стрелки;

vi – критическая широта Земли 35° идеально совпадает с центром проекции выявленной структуры;

vii – левосторонняя асимметрия осадочных бассейнов (Красное и Мертвое моря и Галилейское

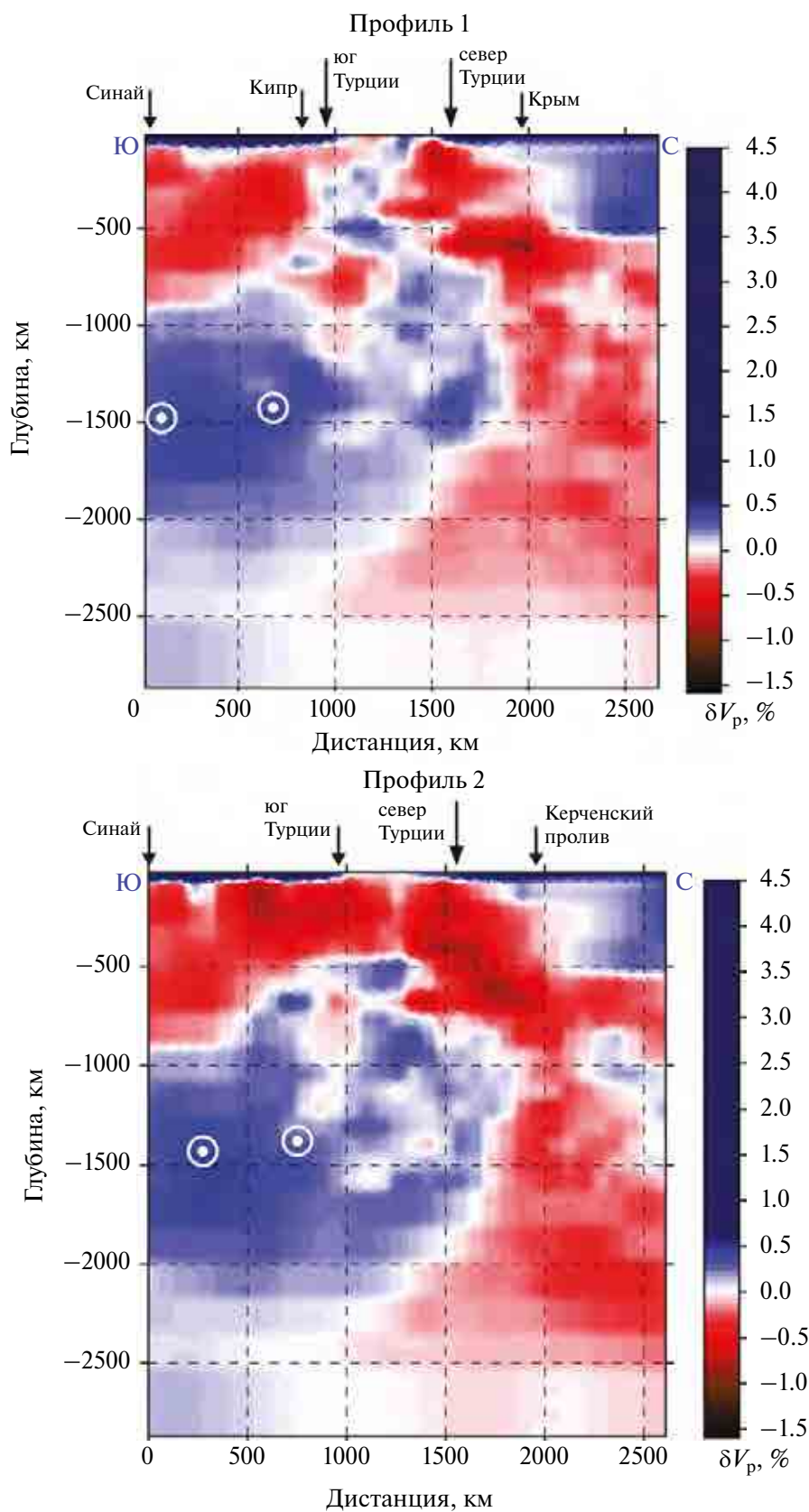


Рис. 8. Сейсмотомографические профили 1 и 2 (по данным [12, 107]).

Показано (кружки белым с точкой в центре) положение центра масс аномальной мантийной структуры.

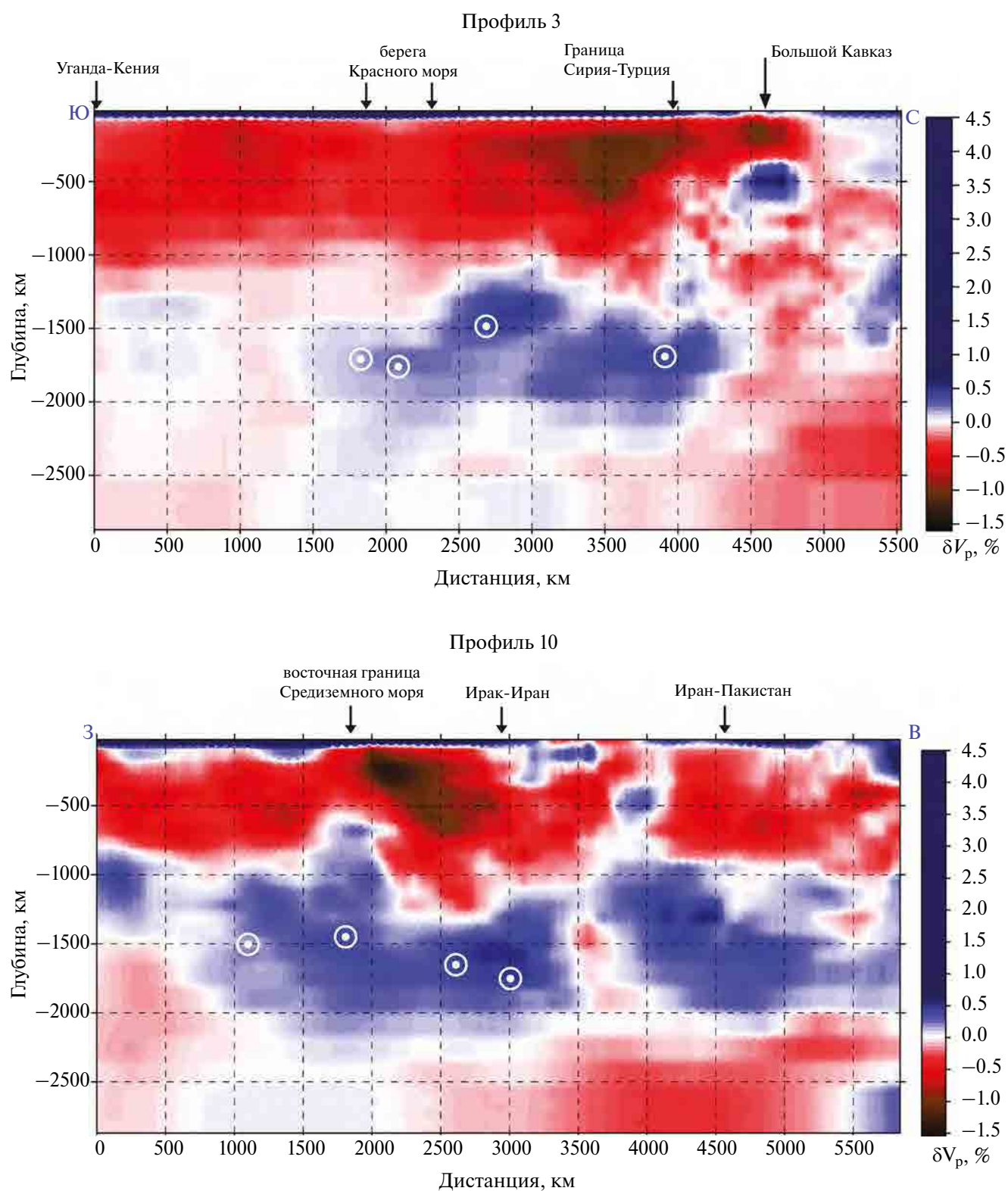


Рис. 9. Сейсмотомографические профили 3 и 10 (по данным [12, 107]).

Показано (кружки белым с точкой в центре) положение центра масс аномальной мантийной структуры.

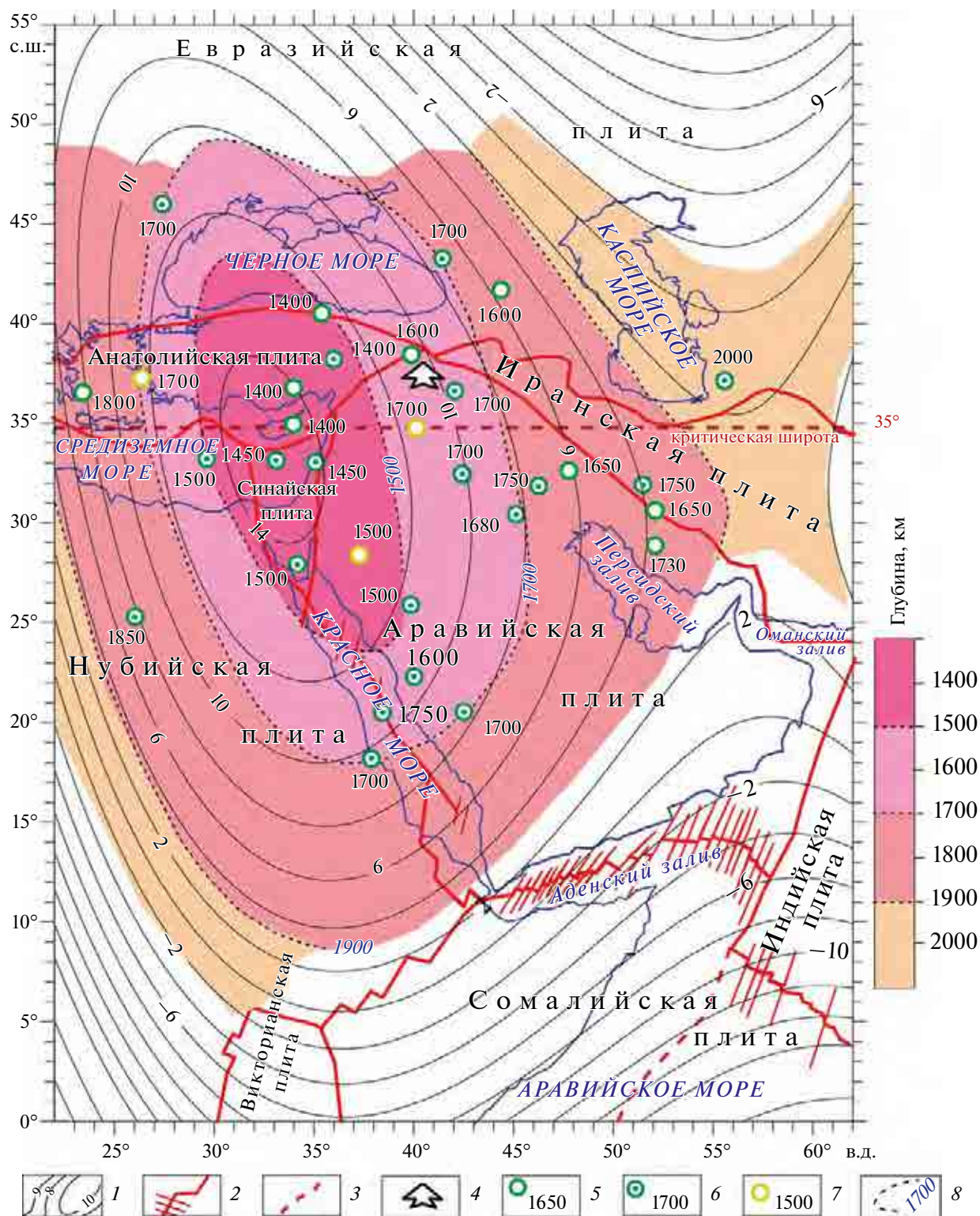


Рис. 10. Сравнение комбинированных данных сейсмической томографии с изолиниями остаточной спутниковой гравитационной аномалии.

1 – изолинии остаточной спутниковой гравитационной аномалии; 2 – основные межплитные разломы (по [19], с дополнениями); 3 – основные внутриплитные разломы; 4 – дистальная часть мезозойского террейнового пояса (МТП); 5 – глубины, соответствующие значениям, полученным из профилей работы [146]; 6 – глубины, соответствующие значениям, полученным по профилям из работы [12], на основе [107]; 7 – глубины, соответствующие значениям, полученным по профилям из работы [83]; 8 – изолинии глубин залегания аномальной структуры в нижней мантии, полученным по комплексному анализу томографических профилей (по [12, 83, 107, 146])

озеро) указывают на вращения региона против часовой стрелки;

viii — многочисленные изученные мантийные породы и минералы, найденные в исследуемом регионе, свидетельствуют о геодинамической активности, обусловленной длительным вращением мантийной структуры;

ix — первичный анализ палеобиогеографических данных, показывающий появление типичной эфиопской фауны в Восточном Средиземноморье;

x — первичный анализ сейсмотомографических разрезов;

xi — ряд тектоно-структурных построений.

К числу новейших доказательств относятся:

— карта магнитного поля ΔZ (для высоты 2.5 км над уровнем моря) для изучаемого региона, хорошо передающая круговое вращение;

— сейсмотомографическая схема, построенная на основе анализа девяти глубинных сейсмических профилей и демонстрирующая безусловное согласие с результатами других геофизических методов;

— палеобиогеографическая схема, показывающая перенос эфиопской фауны в область Восточного Средиземноморья и возможную траекторию смещения древнего блока океанической коры с палеомагнитной гиперзоной Киама;

— расчет времени вращения проекции глубинной структуры по палеобиогеографическим и палеомагнитно-геодинамическим данным;

— интерпретацию особенностей тектоно-палеомагнитного разреза Мезозойского пояса района горы Кармель и плато Верхней Галилеи, связанных с вращательным движением блока океанической коры Киама;

— сейсмологические факторы: длительное влияние вращения глубинной структуры на верхние оболочки Земли, приведшее к созданию напряжений в земной коре, что наряду с другими сейсмологическими факторами обусловило, по всей видимости, разрушительные землетрясения 06.02.2023 в Восточной Турции.

Показана упрощенная тектоно-палеомагнитная схема региона, наложенная на изолинии остаточной спутниковой гравитационной аномалии (см. рис. 1). Элементы ротационной динамики, полученные из палеомагнитного анализа данных, в основном совпадают с вращением против часовой стрелки проекции глубинной структуры, что хорошо согласуется с имеющимися данными GPS и магнитного поля ΔZ (см. рис. 1, см. рис. 3).

Немаловажно отметить, что четыре независимых геофизических метода — положение векторов

GPS, аномалий магнитного поля, палеомагнитные данные и изолинии остаточной гравитационной аномалии — фиксируют контур одной и той же структуры, вращающейся против часовой стрелки (см. рис. 1, см. рис. 3)

Геодинамическая схема, составленная Borradaile et al. [42] на основе анализа палеомагнитных данных, указывает на то, что вращение о. Кипр против часовой стрелки происходит не менее 70 миллионов лет (на самом деле, вращение квазиэллипсоидной мантийной структуры и, соответственно, о. Кипр, находящегося в центре проекции этой структуры, более чем в два раза превосходит этот период). На основе факта нахождения указанного острова в центре проекции глубинной структуры и многочисленных палеомагнитных данных в окружающих областях, относящихся к этой проекции, это дает нам минимальное время, от которого мы можем начинать расчет времени вращения.

Проведенный нами комплексный анализ палеобиогеографических данных и геодинамических построений позволил оценить начало времени вращения в 160–180 млн лет назад [65]. В этом контексте следует отметить работу [123], в которой на основании исследования палеомагнитных данных пород триаса в ряде регионов было сделано предположение, что в этот период ось спрединга древнего океана Неотетис, находившегося ранее на месте изучаемого региона, была повернута против часовой стрелки. Приведенные геодинамические особенности хорошо согласуются с наиболее древним (165.7 млн лет) радиометрическим возрастом вращающегося дайкового комплекса Махтеш Рамона [64].

Данные палеомагнитных исследований и геодинамическая палеомагнитная схема однозначно показывают вращение центральной части проекции глубинной структуры против часовой стрелки (см. рис. 1, см. рис. 4). Геодинамическая нестабильность, возникающая в периферических областях проекции глубинной структуры, обуславливает появление вращений как по часовой стрелке, так и против нее. За пределами проекции преобладают повороты по часовой стрелке.

Критическая широта Земли 35°, с которой связывают глобальные геодинамические возмущения, практически пересекает центр проекции глубинной структуры (см. рис. 1, см. рис. 10). Сочетание всех этих факторов указывает на наличие в центрально-западной части региона геодинамической вихревой структуры, в центре

Таблица 1. Многофакторный анализ геолого-геофизических явлений, отражающих существование глубинной структуры, вращающейся против часовой стрелки

№	Данные	Интерпретация
1	Спутниковые гравиметрические данные	Расчет остаточной гравитационной аномалии показывает контур эллипсоидальной структуры. Результаты количественной интерпретации остаточной гравитационной аномалии указывают на ее глубину над апикальной зоной ~ 1450 км [19] (см. рис. 1).
2	Гравитационные данные “море/суша”	Аномалии силы тяжести на суше (море) совпадают с остаточной спутниковой аномалией силы тяжести [22].
3	Анализ палеомагнитных данных	Палеомагнитные данные указывают на преобладающее вращение блоков земной коры против часовой стрелки [63] (см. рис. 1, см. рис. 2, см. рис. 4).
4	Распределение векторов GPS	Анализ распределения векторов GPS указывает на их эллипсоидальное распределение и поворот против часовой стрелки [54, 94, 98, 112, 129] (см. рис. 3).
5	Анализ магнитных данных	Распределение магнитного поля ΔZ на высоте 2.5 км над уровнем моря в основном совпадает с остаточной аномалией силы тяжести и расположением векторов GPS (см. рис. 2, см. рис. 3).
6	Аномалии изолиний геоида	Аномальный рисунок геоида, совпадающий с №№ 1, 4 и частично №5 данной таблицы [19].
7	Критическая широта Земли	Критическая широта Земли $+35^\circ$ совпадает с центром глубинной структуры (см. рис. 1, см. рис. 10).
8	Палеобиогеографические данные	Изучение палеобиогеографических данных указывает на вращение поверхностных (приповерхностных) слоев против часовой стрелки (см. рис. 5).
9	Асимметрия осадочных бассейнов	Геоморфологическая асимметрия в рифтовой зоне Красного моря, в бассейне Мертвого моря и в Галилейском озере в основном геодинамически обусловлена вращением против часовой стрелки [19], основываясь на [38, 44, 137].
10	Многочисленные петрологические и минералогические данные	Петрологические и минералогические данные характеризуют тектоническую и геодинамическую активность в пределах проекции глубинной структуры на приповерхностную часть геологического разреза [18, 21, 23, 24, 33, 52, 68, 79, 80, 109–111, 143, 149].
11	Региональные сейсмотомографические исследования	Сейсмотомографические данные отображают аномальные параметры среды в нижней мантии (~1400–1900 км) исследуемого региона [12, 107, 138, 146, 147, 152].
12	Интенсивная глубинная микросейсмичность Персидского залива и массива Загрос	С.А. Ковачев и А.А. Крылов [5] напрямую связывают микросейсмичность в этом регионе (до 180 км в глубину) с вращающейся структурой мантии (впервые выявленной в работе [19]). В этом же регионе были обнаружены глубоко залегающие аномальные зоны [46].
13	Блок океанической коры, относящийся к палеомагнитной зоне Киама	Воздействие вращения глубинной структуры предотвратило субдукцию древнего океанического блока Киама и сохранило его до настоящего времени [20, 59, 63] (см. рис. 1, см. рис. 2, см. рис. 3, см. рис. 4).
14	Тектоно-палеомагнитный разрез офиолитовых пластин и континентальных террейнов Мезозойского пояса района горы Кармель и плато Верхней Галилеи	Особенности блокового строения, состав офиолитовых комплексов и радиометрический возраст интрузивных, эффузивных траппов и офиолитов свидетельствуют о сложности аккреционных движений блока Киама и его поворотов по отношению к континентальным террейнам Мезозойского пояса (см. рис. 7).
15	Многочисленные тектоно-геодинамические данные	Прежде всего, это результаты катастрофических землетрясений в Восточной Турции 06.02.2023, обусловленные движением тектонических блоков против часовой стрелки. В результате большие участки суши сместились в этом направлении более чем на 12 м [8, 42, 96, 125, 126] (см. рис. 1, см. рис. 2, см. рис. 3, см. рис. 4).
16	Приподнятая поверхность с контрастной плотностью в литосфере, рассчитанная с использованием 3D трансформаций	Приподнятая часть литосферных блоков совпадает с длинной осью проекции глубинной мантийной структуры [19, 66].
17	Направление горизонтального мантийного потока	Направление горизонтального мантийного потока против часовой стрелки [49] хорошо коррелирует с данными GPS и изолиниями остаточной аномалии Δg . Кроме того, поток имеет особую точку вращения непосредственно в районе турецких землетрясений 06.02.2023 г. [64].

которой находится кипрская высокоамплитудная гравитационная аномалия [19, 75].

Выходы на поверхность многочисленных глубинных мантийных элементов в пределах контура глубинной структуры приведено в [19, 21, 33, 48, 52, 59, 60, 68, 77, 79, 143]. Этот факт указывает на высокий уровень тектоно-геодинамической активности в исследуемом регионе.

Проведенный анализ сейсмотомографических данных однозначно свидетельствует о наличии глобальной аномалии в нижней мантии на рассматриваемых глубинах (см. рис. 8, см. рис. 9, см. рис. 10).

Построенная схема, основанная на компиляции сейсмотомографических данных, показывает надежную корреляцию с гравиметрическими и другими геофизическими данными (см. рис. 10).

В тектоно-магматическом плане отмеченная региональная асимметрия бассейна Красного моря является еще более отчетливой [19]. Большинство дайковых комплексов олигоценово-раннемиоценовых интрузивных траппов, маркирующих заложение протяженного рифта Красного моря, развито на его Аравийском побережье и в Синае — к востоку от Суэцкого грабена. Более молодые, обширные по площади пятна эффузивных траппов среднего миоцена—плейстоцена развиты восточнее дайковой полосы, продолжаясь и как бы поворачивая далее к северу по направлению против часовой стрелки к Паннонскому массиву Закарпатья и далее по дуге на юг — в область такого важного в магматическом отношении узла, как вулкан взрывного типа Санторин. Указанный вулкан (расположенный вблизи критической широты 35° и проекции центра глубинной структуры на поверхность) явился в 17-м веке до н. э. основой одной из самых значимых геокатастроф в истории человечества.

Тектоно-структурный анализ составленной карты (рис. 1) описывает наиболее существенные черты региональной деформации земной коры с субширотным Альпийским поясом и субмеридиональным Неопротерозойским поясом с дугообразным выступом МТП в зоне их сочленения. Совокупность тектонических и палеомагнитных данных показывает, что примерно в этой зоне развиты глубинные диагональные разломы, вблизи которых на западе преобладает вращение тектонических блоков против часовой стрелки, а на востоке — по часовой стрелке (см. рис. 1).

Рассматриваемая зона катастрофических землетрясений в Восточной Турции, произошедших

06 февраля 2023, развита западнее дугообразного выступа. Отметим работу [49], где была построена модель горизонтального распределения мантийного потока для изучаемого региона. Направление этого мантийного потока хорошо коррелирует как с поведением векторов GPS, так и с остаточной спутниковой аномалией силы тяжести. Кроме того, мантийный поток создает особую сингулярную точку именно в зоне высокомагнитудных землетрясений.

Карта мощности литосферы, полученная из анализа спутниковых гравитационных данных, показывает не только геодинамическую асимметрию восточного и западного побережий Красного моря, но и подчеркивает некоторые элементы вращения против часовой стрелки [19].

Центральная — апикальная — часть глубинной мантийной структуры образует Синайскую литосферную плиту, ограниченную меридионально двумя описанными выше разломами, а на севере — разломом юга Эгейско-Анатолийской плиты.

Южной своей частью остров Кипр с развитием мелового мантийного диапира, выходящего на поверхность, причленяется к зоне океанического террейна Восточного Средиземноморья с древнейшей в мире океанической корой зоны Киамы. Мы полагаем, что именно вращение глубинной структуры предотвратило субдукцию этого блока океанической коры и позволило сохранить его до нашего времени.

Наиболее активные геодинамические процессы развиты в апикальной части глубинного целевого контура (см. рис. 1, см. рис. 2, см. рис. 3).

В зоне контакта активных разломов в зоне трансформного разлома Мертвого моря и Восточно-Анатолийского разлома происходит разрядка глубинных напряжений в дистальной части движущейся на север Аравийской литосферной плиты с отклонением очаговых зон высокомагнитудных землетрясений на юго-запад, в направлении движения блоков против часовой стрелки (см. рис. 1, см. рис. 3). Это стало причиной смещения Анатолийской плиты в этом направлении в сторону Средиземного моря.

Особое внимание мы уделим мантийному происхождению выявленного комплексного регионально-геолого-геофизического явления, учитывая следующие факторы:

- количественная переинтерпретация остаточной спутниковой гравитационной аномалии дала глубину 1450 км (центр распределения масс);

- сейсмотомографические исследования показывают наличие в исследуемом регионе аномальных зон на глубине 1200–1900 км;

— карта изолиний геоида, как и карта остаточной гравитации, несомненно, указывает на глубинное происхождение целевого проявления;

— критическая широта Земли (35°) является глобальным геодинамическим фактором и никак не может быть связана с приповерхностными (в данном случае — десятки километров) структурами;

— многочисленные минералого-петрологические данные свидетельствуют о наличии аномального объема минералов и пород мантийного происхождения.

Такое широкое развитие в исследуемом регионе мезозойских и кайнозойских трапповых бассейнов и интрузивных проявлений, образующих протяженные линейно вытянутые структуры, требует теоретического обоснования.

Отметим, что ряд авторов [13, 139] утверждают, что внутриплитный (платформенный) магматизм (траппы, платобазальты, кимберлиты) и металлогения не могут быть объяснены или спрогнозированы моделью тектоники плит.

Выделенная вращающаяся глубинная структура хорошо объясняет происхождение линейных структур континентального магматизма, не нашедших ранее достаточно мотивированного тектоно-геофизического обоснования. Зоны развития неогеновых эффузивных траппов и дайковых комплексов, а также места обнаружения алмазов в Египте, Израиле и Сирии хорошо согласуются с длинной осью выявленной структуры (ослабленной зоной) [19].

Небезынтересно отметить, что выявленный аномальный объект [19] уже используют, например, в качестве обоснования проведения региональных магнитотеллурических исследований на Аравийско-Нубийском щите [118] и объяснения микросейсмичности Персидского залива [5].

Мы предполагаем, что вращающаяся мантийная структура способствует переносу энергии в вышележащие блоки и геологические образования с помощью тепловой конвекции. Существование гигантской мантийной кольцевой структуры доказывается совокупностью следующих независимых геофизических—геологических факторов (хорошо укладывающихся в единую физико-геологическую модель), главные компоненты которой (17 пунктов) представлены в таблице 1.

Случайное совпадение этих семнадцати независимых положительных факторов (мы рассматриваем только основные показатели) [101] крайне маловероятно.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Мантийное (глубинное) происхождение рассматриваемого геодинамического явления следует из нескольких представленных доказательств. Комплексное исследование подчеркивает связь между выявленной вращающейся против часовой стрелки мантийной структурой и различными геолого-геофизическими особенностями тектонических блоков.

Вероятностная оценка случайного совпадения всех этих факторов (остаточная спутниковая гравитационная аномалия, аномалии силы тяжести на суше (море), распределение векторов GPS, карта магнитного поля ΔZ , ориентация палеомагнитных векторов, схема изолиний геоида, критическая широта Земли, палеобиогеографические построения, асимметрия осадочных бассейнов, сейсмотомографические данные, минералого-петрологический анализ, блок океанической коры, относящийся к палеомагнитной гиперзоне Киама, и многочисленные тектонико-структурные данные) крайне мала.

Мы полагаем, что эта структура повлияла на происхождение Кипрской высокоамплитудной гравитационной аномалии, конфигурацию Синайской плиты, вращение Мезозойского террейнового пояса против часовой стрелки, геометрию асимметричных бассейнов вдоль трансформы Мертвого моря, предотвращение субдукции блока океанической коры, соответствующего палеомагнитной гиперзоне Киама в Восточном Средиземноморье, а также на существенные тектоно-палеомагнитные особенности разреза Кармель—Галилея (северный Израиль).

Открытие глубинной аномальной структуры объясняет существование внутриплатформенных магматических поясов, которые ранее не находили объяснений в рамках существующих теорий. Вращающаяся структура мантийного кольца, влияющая на многие тектоно-геодинамические процессы, может быть глобальным геодинамическим фактором, способствующим расширению Красного моря.

Мы предполагаем, что гигантское накопленное напряжение, вызванное вращением глубинной мантийной структуры против часовой стрелки, было существенной причиной (вместе с известным тектонически опасным сейсмологическим разломом в этой области), вызвавшей катастрофические землетрясения в Турции 6 февраля 2023 года. Дальнейшее изучение этого явления должно включать комплексные геофизико-геологические исследования для выявления зон с наибольшим накоплением напряжений и высокой сейсмической активностью.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы признательны анонимному рецензенту и рецензенту Ю. Л. Ребечкому (ИФЗ АН, г. Москва, Россия) за полезные комментарии. Авторы благодарят редактора М.Н. Шуплецову (ГИН РАН, г. Москва, Россия) за тщательное редактирование.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Исследование проводилось без привлечения финансирования.

СЛЕДОВАНИЕ НОРМАМ
НАУЧНОЙ ЭТИКИ

Авторы заявляют, что не имеют конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алейников А.Л., Беликов В.Т., Эпельбаум Л.В. Некоторые физические основы геодинамики. — Тель-Авив: Кедем, 2001. 167 с.
2. Бурмин В.Ю., Шумлянская Л.А. Современная сейсмичность Крыма // Вопросы инженерной сейсмологии. 2009. Т. 42. № 2. С. 5–17.
3. Исмаил-заде Т.А. Палеомагнитные исследования мезо-кайнозой Азербайджана. — Автореф. дис. ... д. ф.-м. н. — М.: ИФЗ РАН, 1983. 47 с.
4. Казьмин В.Г. Рифтовые структуры Восточной Африки — раскол континента и зарождение океана. — М.: Наука. 1987. 205 с.
5. Ковачев С.А., Крылов А.А. Микросейсмичность Персидского залива и горного массива Загрос согласно донным сейсмологическим наблюдениям // Вулканология и сейсмология. 2023. № 6. С. 41–59. Doi: <https://doi.org/10.31857/S0203030623700335>
6. Левин Б.В., Сазорова Е.В., Доманский А.В. Свойства “критических широт” вариации вращения и сейсмичность Земли // Вестн. ДВО РАН. 2013. № 3. С. 3–8.
7. Макридин В.П., Кац Ю.И., Кузмичева Е.И. Принципы, методология и особенности фауны коралловых построек для зоогеографического районирования юрских и меловых морей Европы, Средней Азии и сопредельных стран. — В сб.: *Ископаемые органические постройки и методы их изучения*. — Ред. Г.А. Смирнов, М.Л. Клужина. — Свердловск: УрО АН СССР. 1968. С. 184–195.
8. Михайлов В.О., Бабаянц И.П., Волкова М.С., Тимошкина Е.П., Смирнов В.Б., Тихоцкий С.А. Землетрясения в Турции 06.02.2023: Модель поверхности разрыва по данным спутниковой радарной интерферометрии // ДАН, Науки о Земле. 2023. Т. 511. № 1. С. 71–77. Doi: <https://doi.org/10.31857/S2686739723600625>
9. Молостовский Э.А., Печерский Д.М., Фролов И.Ю. Магнито-хроностратиграфическая шкала фанерозоя и ее описание с помощью кумулятивной функции распределения // Физика Земли. 2007. № 10. С. 15–23.
10. Оровецкий Ю.П., Коболев В.П. Связь геоструктур главных поверхностей Земли. — В сб.: *Связь поверхностной и глубинной структур земной коры*. — Мат-лы 12-й Междунар. конф. 2008. Петрозаводск. С. 99–102.
11. Печерский Д.М., Нгуен Т.К. Палеомагнитные направления и положения палеомагнитных полюсов. — Сводный каталог Всемирного центра данных. — Данные по СССР. — М.: Геофиз. комис. АН СССР. Сер. В. 1979. Вып. 4.
12. Трифонов В.Г., Соколов С.Ю. Строение мантии и тектоническая зональность центральной части Альпийско-Гималайского пояса // Геодинамика и тектонофизика. 2018. Т. 9. № 4. С. 1127–1145. Doi: <https://doi.org/10.5800/GT-2018-9-4-0386>
13. Хаин В.Е. Тектоника континентов и океанов. — М.: Научный Мир, 2001. 606 с.
14. Хаин В.Е., Короновский Н.В. Планета Земля от ядра до ионосферы. — М.: КДУ, 2007. 244 с.
15. Халафлы А.А. Палеомагнетизм Малого Кавказа. — Баку: Тахсил, 2006. 189 с.
16. Халафов А.А. Магнитные исследования коньяк-сантонских отложений Казахской депрессии // Изв. АН Азерб. ССР. Сер. Науки о Земле. 1986. № 4. С. 123–126.
17. Храмов А.Н. Палеомагнитные направления и положения палеомагнитных полюсов. — Сводный каталог Всемирного центра данных. — Данные по СССР. — М.: Геофиз. комис. АН СССР. 1984. Сер. В. Вып. 1.
18. Шарков Е.В., Ханна С. Эволюция вещества верхней мантии в регионах внутриплитного магматизма (на примере западной Сирии) // Докл. АН СССР. 1987. Т. 297. № 3. С. 684–686.
19. Эпельбаум Л.В., Бен-Аврахам З., Кац Ю.И., Клозинг С., Кабан М. Гигантская квази-кольцевая мантийная структура в зоне Африкано-Аравийского сочленения: данные комплекса геологических и геофизических исследований // Геотектоника. 2021. Т. 55. № 1. С. 67–93. Doi: <https://doi.org/10.31857/S0016853X21010057>
20. Эпельбаум Л.В., Николаев А.В., Кац Ю.И. Пространственное положение зоны обратной намагниченности Киама в океанической коре Восточного Средиземноморья // ДАН. 2014. Т. 457. № 6. 710–714. Doi: <https://doi.org/10.7868/S0869565214240189>
21. Эпельбаум Л., Ваксман В., Кузнецов С., Сазонова Л., Смирнов С., Сурков А., Безлепкин Б., Кац Ю., Коротаева Н., Беловицкая Г. Обнаружение микроалмазов и минералов-спутников в каньоне Махтеш Рамон (пустыня Негев, Израиль) // ДАН. 2006. Т. 407. № 1. С. 1–3.

22. *Alavi M.* Tectonics of the Zagros orogenic belt of Iran: new data and interpretation // *Tectonophysics*. 1994. Vol. 229. P. 211–238. Doi: [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(94\)90030-2](https://doi.org/10.1016/0040-1951(94)90030-2)
23. *Aldanmaz E., van Hinsbergen D.J.J., Yıldız-Yükseköl Ö., Schmidt M.W., McPhee P.J., Meisel T., Güçtekin A., Mason P.R.D.* Effects of reactive dissolution of orthopyroxene in producing incompatible element depleted melts and refractory mantle residues during early fore-arc spreading: constraints from ophiolites in Eastern Mediterranean // *Lithos*, 2020. Vol. 360–361, 105438. P. 1–14. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2020.105438>
24. *Alizadeh A.A., Guliyev I.S., Kadirov F.A., Eppelbaum L.V.* Geosciences in Azerbaijan. – Vol. I. – Geology. – (Springer: Heidelberg, Germany, 2016), 239 p.
25. *Allen P.A.* Surface impact of mantle processes // *Nature Geosci.* 2011. P. 498–499. Doi: <https://doi.org/10.1038/ngeo1216>
26. *Alpyürür M., Lav M.A.* An assessment of probabilistic seismic hazard for the cities in Southwest Turkey using historical and instrumental earthquake catalogs // *Natural Hazards*. 2022. Vol. 114. P. 335–365. Doi: <https://doi.org/10.1007/s11069-022-05392-x>
27. *Ambraseys N.N., Finkel C.F.* Seismicity of Turkey and Adjacent Areas: A Historical Review, 1500–1800. (Istanbul, Eren Yayinlari Publ., 1995). 240 p.
28. *Andersson D.L.* New theory of the Earth. 2nd Ed. (Cambridge, Cambridge Univ. Press, 2007). 400 p.
29. *Arkell W.J.* Jurassic Geology of the World. – (London, Olivier and Boyd, 1956), 808 p.
30. *Artemieva I., Thybo H., Kaban M.K.* Deep Europe today: Geophysical synthesis of the upper mantle structure and lithospheric processes over 3.5 Ga,” In: *European Lithosphere Dynamics*. – Ed. by D. Gee, R. Stephenson, (Geol. Soc. London. 2006. Vol. 32). P. 11–41. Doi: <https://doi.org/10.1144/GSL.MEM.2006.032.01.02>
31. *Bagheri S., Gol S.D.* The eastern Iranian orocline // *Earth-Sci. Rev.* 2020. Vol. 210 (361), 103322. P. 1–43. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2020.103322>
32. *Baptie B., Segou M.* The Kahmaran Maras Earthquake Sequence, Turkey/Syria. – *British Geol. Surv.* (Febr. 14, 2023). Retrieved November 17, 2024.
33. *Barakat A.A., Kandil S.M.R.* Diamond in the newly discovered kimberlite and related rocks, Central Eastern Desert, Egypt. – In: *Magmatism of the Earth and Related Strategic Metal Deposits*. – Proc. XXXVI Int. Conf. St Petersburg Univ., Russia, May 23–26, 2019. P. 36–42.
34. *Bayer H.J., Hotzl H., Jado A.R., Ruscher B., Voggenreiter W.* Sedimentary and structural evolution of the northwest Arabian Red Sea margin // *Tectonophysics*. 1988. Vol. 153. P. 137–151. Doi: [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(88\)90011-X](https://doi.org/10.1016/0040-1951(88)90011-X)
35. *Bazhenov M.L., Burtman V.S.* Eocene paleomagnetism of the Caucasus (southwest Georgia): Oroclinal bending in the Arabian syntaxis // *Tectonophysics*. 2002. Vol. 344. P. 247–259. Doi: [https://doi.org/10.1016/S0040-1951\(01\)00189-5](https://doi.org/10.1016/S0040-1951(01)00189-5)
36. *Ben-Avraham Z.* The structure and tectonic setting of the Levant continental margin, Eastern Mediterranean // *Tectonophysics*. 1978. Vol. 46. P. 313–331. Doi: [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(78\)90210-X](https://doi.org/10.1016/0040-1951(78)90210-X)
37. *Ben-Avraham Z.* Structural framework of the Gulf of Elat (Aqaba), northern Red Sea // *J. Geophys. Res.: Solid Earth Planets*. 1985. Vol. 90. P. 703–726. Doi: [https://doi.org/10.1016/0037-0738\(79\)90016-2](https://doi.org/10.1016/0037-0738(79)90016-2)
38. *Ben-Avraham Z.* Development of asymmetric basins along continental transform faults // *Tectonophysics*. 1992. Vol. 215. P. 209–220. Doi: [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(92\)90082-H](https://doi.org/10.1016/0040-1951(92)90082-H)
39. *Ben-Avraham Z., Ginzburg A.* Displaced terranes and crustal evolution of the Levant and the eastern Mediterranean // *Tectonics*. 1990. Vol. 9. P. 613–622. Doi: <https://doi.org/10.1029/TC009i004p00613>
40. *Ben-Avraham Z., Ginzburg A., Makris J., Eppelbaum L.* Crustal structure of the Levant basin, eastern Mediterranean // *Tectonophysics*. 2002. Vol. 346. P. 23–43. Doi: [https://doi.org/10.1016/S0040-1951\(01\)00226-8](https://doi.org/10.1016/S0040-1951(01)00226-8)
41. *Ben-Avraham Z., ten-Brink U., Bell R., Reznikov M.* Gravity field over the Sea of Galilee: Evidence for a composite basin along a transform fault // *J. Geophys. Res.: Solid Earth*. 1996. Vol. 101. P. 533–544. Doi: <https://doi.org/10.1029/95JB03043>
42. *Borradaile G.J., Lagroix F., Hamilton T.D., Trebilcock D.A.* Ophiolite tectonics, rock magnetism and paleomagnetism, Cyprus // *Survey of Geophysics*. 2010. Vol. 31. P. 285–359. Doi: <https://doi.org/10.1007/s10712-009-9090-2>
43. *Borradaile G.J., Lucas K.* Tectonics of the Akamas and Mamonia ophiolites, Western Cyprus: Magnetic petrofabrics and paleomagnetism // *J. Struct. Geol.* 2003. Vol. 25. P. 2053–2076. Doi: [https://doi.org/10.1016/S0191-8141\(03\)00046-4](https://doi.org/10.1016/S0191-8141(03)00046-4)
44. *Bosworth W.* Continental rift asymmetry and segmentation – contributions from the African plate // *J. Afr. Earth Sci.* 2024. Vol. 210 (105128). P. 1–15. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2023.105128>
45. *Bosworth W., Huchon P., McClay K.* The Red Sea and Gulf of Aden Basins // *J. Afr. Earth Sci.* 2005. Vol. 43. P. 334–378. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2005.07.020>
46. *Garnero E., Richardson C.* The mysterious, massive structures in Earth’s deep mantle // *Physics Today*. 2024. Vol. 77 (12). P. 36–43. Doi: <https://doi.org/10.1063/pt.mzrx.ddag>
47. *Çen K.Ö., Bray J.D., Frost J.D., Hortacsu A., Miranda E., Moss R.E.S., Stewart J.P.* February 6, 2023 Türkiye Earthquakes: Report on Geoscience and Engineering Impacts. (GEER Assoc. Rep. 082 ed. May 6, 2023). Earthquake Engin. Res. Inst. 2023. Doi: <https://doi.org/doi:10.18118/G6PM34>
48. *Chan G.H.-N., Malpas J., Xenopontos C., Lo C.-H.* Magmatism associated with Gondwanaland rifting and Neo-Tethyan oceanic basin development: evidence from the Mamonia Complex, SW Cyprus // *J. Geol. Soc. London*. 2008. Vol. 165. P. 699–709. Doi: <https://doi.org/10.1144/0016-76492007-050>

49. *Civiero C., Celli N.K., Tesauro M.* Revisiting the geodynamics of the Middle East region from an integrated geophysical perspective // *J. Geodynam.* 2023. Vol. 158. P. 1–21. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.jog.2023.102005>
50. *Cloetingh S., Willet S.D.* Linking deep Earth and surface processes // *EOS*. 2013. Vol. 94(5). P. 53–54. Doi: <https://doi.org/10.1002/2013EO050002>
51. *Cooper G.A.* Jurassic Brachiopods of Saudi Arabia. Smithsonian Contributions to Paleobiology. – (Washington, Smithsonian Institution Press, 1989. Vol. 65). 213 p.
52. *Dobrzhinetskaya L., Mukhin P., Wang Q., Wirth R., O'Bannon E., Zhao W., Eppelbaum L., Sokhonchuk T.* Moissanite (SiC) with metal-silicide and silicon inclusions from tuff of Israel: Raman spectroscopy and electron microscope studies // *Lithos*. 2018. Vol. 310–311. P. 355–368. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2017.04.001>
53. *Domeier M., Doubrovine P.V., Torsvik T.H., Spakman W., Bull A.L.* Global correlation of lower mantle structure and past subduction // *Geophys. Res. Lett.* 2016. Vol. 43. P. 4945–4953. Doi: <https://doi.org/10.1002/2016GL068827>
54. *Dobre C., Déprez A., Masson A., Socquet A., Lewi E., Grandin R., Nercessian A., Ulrich P., De Chaballier J.-B., Saad I., Abayazid A., Peltzer G., Delorme A., Calais E., Wright T.* Current deformation in Central Afar and triple junction kinematics deduced from GPS and InSAR measurements // *Geophys. J. Int.* 2017. Vol. 208. P. 936–953. Doi: <https://doi.org/10.1093/gji/ggw434>
55. *Duermeijer C.E., Krijgsman W., Langereis C.G., Ten Veen J.H.* Post-early Messinian counterclockwise rotations on Crete: Implications for Late Miocene to recent kinematics of the southern Hellenic arc // *Tectonophysics*. 1998. Vol. 298. P. 177–189. Doi: [https://doi.org/10.1016/S0040-1951\(98\)00183-8](https://doi.org/10.1016/S0040-1951(98)00183-8)
56. *Dvorkin A., Kohn B.P.* The Asher volcanics, northern Israel: Petrography, mineralogy, and alteration // *Israel J. Earth Sci.* 1989. Vol. 38. P. 105–123.
57. *Elgabry M.N., Panza G.F., Badawy A.A., Ibrahim M.K.* Imaging a relic of complex tectonics: the lithosphere-aesthenosphere structure in the Eastern Mediterranean // *Terra Nova*. 2013. Vol. 25. P. 102–109. Doi: <https://doi.org/10.1111/ter.12011>
58. *Eppelbaum L.V.* Geophysical Potential Fields: Geological and Environmental Applications. – (Amsterdam – N.Y., Elsevier, 2019). 467 p.
59. *Eppelbaum L.V., Katz Yu.I.* Eastern Mediterranean: Combined geological-geophysical zonation and paleogeodynamics of the Mesozoic and Cenozoic structural-sedimentation stages // *Marine and Petroleum Geology*. 2015. Vol. 65. P. 198–216. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2015.04.008>
60. *Eppelbaum L.V., Katz Yu.I.* Newly developed paleomagnetic map of the Easternmost Mediterranean unmasks geodynamic history of this region // *Central Europ. J. Geosci. (Open Geosciences)*. 2015. Vol. 7. No. 1. P. 95–117. Doi: <https://doi.org/10.1515/geo-2015-0008>
61. *Eppelbaum L.V., Katz Yu.I.* A new regard on the tectonic map of the Arabian-African region inferred from the satellite gravity analysis // *Acta Geophysica*. 2017. Vol. 65. P. 607–626. Doi: <https://doi.org/10.1007/s11600-017-0057-2>
62. *Eppelbaum L.V., Katz Y.I.* Paleomagnetic-geodynamic mapping of the transition zone from ocean to continent: A review // *Applied Sciences*. 2022. Vol. 12. P. 1–20. Doi: <https://doi.org/10.3390/app12115419>
63. *Eppelbaum L.V., Katz Y.I., Ben-Avraham Z.* Geodynamic aspects of magnetic data analysis and tectonic-paleomagnetic mapping in the Easternmost Mediterranean: A review // *Applied Sciences. Spec. Is. (Ground-Based Geomagnetic Observations: Techniques, Instruments and Scientific Outcomes)*. 2023. Vol. 13 (18). P. 1–44. Doi: <https://doi.org/10.3390/app131810541>
64. *Eppelbaum L.V., Katz Y.I., Ben-Avraham Z.* The reasons for enormous accumulation of the geodynamic tension in Eastern Turkey: A multidisciplinary study // *Geol., Geophys. and Earth Sci.* 2024. Vol. 2. No. 2. P. 1–28. Doi: <https://doi.org/10.58396/gges020202>
65. *Eppelbaum L.V., Katz Y.I., Kadirov F.A.* The relationship between the paleobiogeography of the northern and southern sides of the Neotethys and the deep geodynamic processes // *ANAS Transact. Earth Sci.* 2024. No. 1. P. 57–76. Doi: <https://doi.org/10.33677/ggiasnas20240100109>
66. *Eppelbaum L., Katz Yu., Klokochnik J., Kosteletsky J., Zheludev V., Ben-Avraham Z.* Tectonic insights into the Arabian-African region inferred from a comprehensive examination of satellite gravity big data // *Global and Planetary Change*. 2018. Vol. 171. P. 65–87. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2017.10.011>
67. *Eppelbaum L.V., Pilchin A.N.* Quick subsidence of a crustal block in the SW Aegean Sea as a possible cause of the end of ancient civilization in the 17th century BC. – (Trans. Int. Conf. “Atlantis Hypothesis: Searching for a Lost Land”. 2005. July 11–13, 2005, Milos Island, Greece).
68. *Esperanza S., Garfunkel Z.* Ultramafic xenoliths from the Mt Carmel area (Karem Maharal Volcano), Israel // *Lithos*. 1986. Vol. 19. P. 43–49. Doi: [https://doi.org/10.1016/0024-4937\(86\)90014-9](https://doi.org/10.1016/0024-4937(86)90014-9)
69. *Faccenna C., Becker T.W., Auer L., Billi A., Boschi L., Brun J.P., Capitanio F.A., Funicello F., Horvath F., Jolivet L., Piromallo C., Royden L., Rossetti F., Serpelloni E.* Mantle dynamics in the Mediterranean // *Rev. Geophys.* 2014. Vol. 52. P. 283–332. Doi: <https://doi.org/10.1002/2013RG000444>
70. *Faccenna C., Jolivet L., Piromallo C., Morelli A.* Subduction and depth of convection in the Mediterranean mantle // *J. Geophys. Res.: Solid Earth*. 2003. Vol. 108. P. 1–13. Doi: <https://doi.org/10.1029/2001JB001690>
71. *Feldman H.R.* A new species of the Jurassic (Callovian) Brachiopod *Septirhynchia* from the Northern Sinai // *J. Paleontol.* 1987. Vol. 61. No. 6. P. 1156–1172. Doi: <https://doi.org/10.1017/S002233600002953X>
72. *Fleischer L., Varshavsky A.* A Lithostratigraphic Data Base of Oil and Gas Wells Drilled in Israel. – (Ministry of National Infrastructures of Israel. 2012. Jerusalem, Israel. Rep. OG/9/02).

73. *Garfunkel Z.* Tectonic setting of Phanerozoic magmatism in Israel // *Israel J. Earth Sci.* 1989. Vol. 38. P. 51–74.
74. *Garfunkel Z., Ben-Avraham Z.* The structure of the Dead Sea basin // *Tectonophysics*. 1996. Vol. 266. P. 155–176. Doi: [https://doi.org/10.1016/S0040-1951\(96\)00188-6](https://doi.org/10.1016/S0040-1951(96)00188-6)
75. *Gass I.G.* Is the Troodos Massif of Cyprus a fragment of Mesozoic ocean floor? // *Nature*. 1968. Vol. 220 (5162). P. 39–42. Doi: <https://doi.org/10.1038/220039a0>
76. *Gass I.G., Masson-Smith D.* The geology and gravity anomalies of the Troodos Massif, Cyprus // *Philos. Transact. Ser. A*. 1963. Vol. 255. P. 417–467. Doi: <https://doi.org/10.1098/rsta.1963.0009>
77. *George R.P. (Jr.)*. Structural petrology of the Olympus ultramafic complex in the Troodos ophiolite, Cyprus // *GSA Bull.* 1978. Vol. 89. P. 845–865. Doi: [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1978\)89<845:SPOTOU>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1978)89<845:SPOTOU>2.0.CO;2)
78. *Ginzburg A., Eppelbaum L.* A Combined 3D Interpretation of the Carmel Gravity and Magnetic Anomalies. – (Oilfields Ltd. 1993. Tel Aviv, Israel). P. 1–42.
79. *Griffin W.L., Gain S.E.M., Adams D.T., Huang J.-X., Saunders M., Toledo V., Pearson N.J., O'Reilly S.Y.* First terrestrial occurrence of tistarite (Ti₂O₃): Ultra-low oxygen fugacity in the upper mantle beneath Mount Carmel, Israel // *Geology*. 2016. Vol. 44. No. 10. P. 815–818. Doi: <https://doi.org/10.1130/G37910.1>
80. *Griffin W.L., Gain S.E.M., Huang J.-X., Belousova E.A., Toledo V., O'Reilly S.Y.* Permian to quaternary magmatism beneath the Mt Carmel area, Israel: Zircons from volcanic rocks and associated alluvial deposits // *Lithos*, 2018. Vol. 314–315. P. 307–322. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2018.06.007>
81. *Gvirtzman G., Klang A., Rotstein Y.* Early Jurassic shield volcano below Mount Carmel: New interpretation of the magnetic and gravity anomalies and implication for Early Jurassic rifting // *Israel J. Earth Sci.* 1990. Vol. 39. 149–159.
82. *Gvirtzman G., Steinitz G.* The Asher Volcanics—An Early Jurassic Event in the Northern Israel. – (Current Res., Geol. Survey of Israel. 1982. Jerusalem, Israel). P. 28–33.
83. *Hafkenscheid E., Wortel M.J.R., Spakman W.* Subduction history of the Tethyan region derived from seismic tomography and tectonic reconstructions // *J. Geophys. Res.* 2006. Vol. 111, B08401. P. 1–26. Doi: <https://doi.org/10.1029/2005JB003791>
84. *Hall J.K., Krashenninnikov V.A., Hirsch F., Benjamini C., Flexer A.* (Eds.). Geological Framework of the Levant. – The Levantine Basin and Israel. – (Jerusalem, Historical Productions-Hall, Israel, 2005. Vol.II). 826 p.
85. *Hässig M., Rolland Y., Sossion M.* From seafloor spreading to obduction: Jurassic–Cretaceous evolution of the northern branch of the Neotethys in the Northeastern Anatolian and Lesser Caucasus regions. – In: *Tectonic Evolution of the Eastern Black Sea and the Caucasus*. – Ed. by M. Sossion, R. A. Stephenson, S. A. Adamia, (Geol. Soc. London, Spec. Publ. 2015. Vol. 428. No. 1). P. 1–20. Doi: <https://doi.org/10.1144/SP428.10>
86. *Henry B., Homberg C., Mroueh M., Hamdan W., Higazi W.* Rotations in Lebanon inferred from new palaeomagnetic data and implications for the evolution of the Dead Sea Transform system. – In: *Evolution of the Levant Margin and Western Arabia Platform since the Mesozoic*. – Ed. by C. Homberg, M. Bachman, (Geol. Soc. London, Spec. Publ., London. 2010. Vol. 341). P. 269–285. Doi: <https://doi.org/10.1144/SP341.13>
87. *Hirsch F.* Jurassic biofacies versus sea level changes in the Middle eastern Levant (Ethiopian province). – (Trans. 2nd Intern. Symp. of Jurassic Stratigraphy, Lisbon. 1988). P. 963–981.
88. *Hirsch F., Picard L.* The Jurassic facies in the Levant // *J. Petrol. Geol.* 1988. Vol. 11. No. 3. P. 277–308. Doi: <https://doi.org/10.1111/j.1747-5457.1988.tb00819.x>
89. *Hisarli Z.M.* New paleomagnetic constraints on the Late Cretaceous and Early Cenozoic tectonic history of the Eastern Pontides // *J. Geodynam.* 2011. Vol. 52. P. 114–128. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.jog.2010.12.004>
90. *Hubert-Ferrari A., Armijo R., King G., Meyer B., Barka A.* Morphology, displacement, and slip rates along the North Anatolian Fault, Turkey // *J. Geophys. Res.* 2002. Vol. 107. P. 1–33. Doi: <https://doi.org/10.1029/2001JB000393>
91. *Ibrahim E.H., Odah H.H., El Agami H.L., Abu El Enen M.* Paleomagnetic and geological investigation into southern Sinai volcanic rocks and the rifting of the Gulf of Suez // *Tectonophysics*. 2000. Vol. 321. P. 343–358. Doi: [https://doi.org/10.1016/S0040-1951\(00\)00066-4](https://doi.org/10.1016/S0040-1951(00)00066-4)
92. *James G.A., Wynd J.G.* Stratigraphic nomenclature of Iranian oil consortium agreement area // *AAPG Bull.* 1965. Vol. 49. No.12. P. 2182–2245. Doi: <https://doi.org/10.1306/A663388A-16C0-11D7-8645000102C1865D>
93. *Jiang X., Song X., Li T., Wu K.* Special focus/Rapid Communication Moment magnitudes of two large Turkish earthquakes on February 6, 2023, from long-period coda // *Earthquake Sci.* 2023. Vol. 36. No.2. P. 169–174. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.eqs.2023.02.008>
94. *Kadirov F., Yetirmishli G., Safarov R., Mammadov S., Kazimov I., Floyd M., Reilinger R., King R.* Results from 25 years (1998–2022) of crustal deformation monitoring in Azerbaijan and adjacent territory using GPS // *ANAS Transact. Earth Sci.* 2024. No. 1. P. 28–43. Doi: <https://doi.org/10.33677/ggias20240100107>
95. *Kahn A.* A Geothermal Evaluation of Deep Boreholes throughout Israel. – (MSc. Thesis. 2025. Haifa Univ., Israel). 133 p.
96. *Karabulut H., Güvercin S.E., Hollingsworth J., Konca I.A.Ö.* Long silence on the East Anatolian Fault Zone (Southern Turkey) ends with devastating double earthquakes (February 6, 2023) over a seismic gap: implications for the seismic potential in the Eastern Mediterranean region // *J. Geol. Soc. London*. 2023. Vol. 180. P. 1–10. Doi: <https://doi.org/10.1144/jgs2023-021>
97. *Ke A.* The magnitude of the 2023 Turkish earthquake matches the largest in the country's history, according to new study (11 April 2023). – (Phys.Org. 2023. Retrieved December 14, 2024).
98. *Khaffou M., Raji M., El-Ayachi M.* East African Rift Dynamics. – (E3S Web of Conferences. 2023.

- Vol. 412, 01030). P. 1–10. Doi: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202341201030>
99. *Khranov A.N.* Paleomagnetology. – (Springer, Berlin, Germany, 1987). 308 p.
 100. *Kondopoulou D., Zananiri I., Michard A., Feinberg H., Atzemoglou A., Pozzi J.-P., Voidomatis Ph.* Neogene tectonic rotations in the vicinity of the north Aegean trough: New paleomagnetic evidence from Athos and Samothraki (Greece) // *Bull. Geol. Soc. Greece*. 2007. Vol. 40. P. 343–359. Doi: <https://doi.org/10.12681/bgsg.16590>
 101. *Koralov L., Sinai Y.G.* Theory of probability and random processes. – (Springer, Berlin-Heidelberg, Springer, Germany. 2007 2nd edn.). 358 p.
 102. *Krezsek C., Lăpădat A., Mațenco L., Arnberger K., Barbu V., Olaru R.* Strain partitioning at orogenic contacts during rotation, strike-slip and oblique convergence: Paleogene–Early Miocene evolution of the contact between the South Carpathians and Moesia // *Global Planet. Change*. 2013. Vol. 103. P. 63–81. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2012.11.009>
 103. *Lang B., Steinitz G.* K-Ar dating of Mesozoic magmatic rocks in Israel: A review // *Israel J. Earth Sci.* 1989, Vol. 38. P. 89–103.
 104. *Lazos I., Sboras S., Chousianitis K., Kondopoulou D., Pikridas C., Bitharis S., Pavlides S.* Temporal evolution of crustal rotation in the Aegean region based on primary geodetically-derived results and palaeomagnetism // *Acta Geodaetica et Geophysica*, 2022. Vol. 57. P. 317–334. Doi: <https://doi.org/10.1007/s40328-022-00379-3>
 105. *Lemoine F.G. et al.* The NASA and DMA joint geopotential model // *EOS Trans. AGU*. 1996 Fall Meet. Suppl. F136.
 106. *Levin B.W., Sasorova E.V., Steblov G.M., Domanski G.M., Prytkov A.S., Tsyba E.N.* Variations of the Earth's rotation rate and cyclic processes in geodynamics // *Geodes. Geodynam.* 2017. Vol. 8. P. 206–212. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.geog.2017.03.007>
 107. *Li C., van der Hilst R.D., Engdahl E.R., Burdick S.* A new global model for P wave speed variations in Earth's mantle // *Geochem., Geophys., Geosyst. (G³)*. 2008. Vol. 9. No.5. Q05018. P. 1–21. Doi: <https://doi.org/10.1029/2007GC001806>
 108. *Lotfi H.I.* Early Cretaceous counterclockwise rotation of Northeast Africa within the equatorial zone: Paleomagnetic study on Mansouri ring complex, Southeastern Desert, Egypt // *NRIAG J. Astron. Geophys.* 2015. Vol. 4. No.1. P. 1–15. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.nrjag.2015.01.001>
 109. *Lu J.-G., Griffin W.L., Huang J.-X., Dai H.-K., Castillo-Oliver M., O'Reilly S.Y.* Structure and composition of the lithosphere beneath Mount Carmel, North Israel // *Contrib. to Mineralogy and Petrology*. 2022. Vol. 177. No. 2. P. 1–16. Doi: <https://doi.org/10.1007/s00410-022-01897-7>
 110. *Lusk A.D., Chatzaras V., Aldanmaz, E., Tikoff B.* Hydration State and Rheologic Stratification of the Lithospheric Mantle Beneath the North Anatolian Fault, Turkey // *Geochem., Geophys., Geosyst. (G³)*. 2023. Vol. 24, e2023GC011096. P. 1–26. Doi: <https://doi.org/10.1029/2023GC011096>
 111. *Ma C., Cámara F., Bindi L., Griffin W.L.* Toledoite, TiFeSi, a New Mineral from Inclusions in Corundum Xenocrysts from Mount Carmel, Israel // *Crystals*. 2024. Vol. 14 (96). P. 1–11. Doi: <https://doi.org/10.3390/cryst14010096>
 112. *Mahmoud S.M.* Seismicity and GPS-derived crustal deformation in Egypt // *Geodynamics*. 2003. Vol. 35. P. 333–352. Doi: [https://doi.org/10.1016/S0264-3707\(02\)00135-7](https://doi.org/10.1016/S0264-3707(02)00135-7)
 113. *Makris J., Henke C.H., Egloff F., Akamaluk T.* The gravity field of the Red Sea and East Africa // *Tectonophysics*. 1991. Vol. 198 (2–4). P. 369–381. Doi: [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(91\)90161-K](https://doi.org/10.1016/0040-1951(91)90161-K)
 114. *Makris J., Rihm R.* Shear-controlled evolution of the Red Sea: Pull apart model // *Tectonophysics*. 1991. Vol. 198. P. 441–466. Doi: [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(91\)90166-P](https://doi.org/10.1016/0040-1951(91)90166-P)
 115. *Marquardt H., Ballmer M., Cottaar S., Konter J.* (Eds.). *Mantle Convection and Surface Expressions*. – (Wiley. AGU Geophys. Monograph Ser., New Jersey, USA, 2021), 512 p.
 116. *Marton E., Grabowski J., Plašienka D., Tunyi I., Krobicki M., Haas J., Pethe M.* New paleomagnetic results from the Upper Cretaceous red marls of the Pieniny Klippen Belt, Western Carpathians: Evidence for general CCW rotation and implications for the origin of the structural arc formation // *Tectonophysics*. 2013. Vol. 592. P. 1–13. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2013.01.027>
 117. *Mattei M., Leonardo A., Cifelli V.F., Nozaem R., Winkler A., Sagnotti L.* Clockwise paleomagnetic rotations in northeastern Iran: Major implications on recent geodynamic evolution of outer sectors of the Arabia-Eurasia collision zone // *Gondwana Research*. 2019. Vol. 71. P. 194–209. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.gr.2019.01.018>
 118. *Meqbel N., Aldeep M., El-Qady G., Shaban H., Khashaba A., Abdel Zaher M.* Arabian Nubian Shield and the Saharan meta-craton boundary, East Egypt; Inference from a Long-Period Magnetotelluric Survey. – (7th Int. Conf. on Engineering Geophys. 2023. Al Ain, UAE, Oct. 16–19, 2023). P. 298–300.
 119. *Menant A., Jolivet L., Vrielynck B.* Kinematic reconstructions and magmatic evolution illuminating crustal and mantle dynamics of the eastern Mediterranean region since the late Cretaceous // *Tectonophysics*. 2016. Vol. 675. P. 103–140. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2016.03.007>
 120. *Morris A., Erson M.W., Robertson A.H., Al-Riyami K.* Extreme tectonic rotations within an eastern Mediterranean ophiolite (Baër–Bassit, Syria) // *Earth Planet. Sci. Lett.* 2002. Vol. 202. P. 247–261. Doi: [https://doi.org/10.1016/S0012-821X\(02\)00782-3](https://doi.org/10.1016/S0012-821X(02)00782-3)
 121. *Mulugeta N., Kidane T., Nugsse K., Fufa G., Tadessa D., Muluneh A.A.* Paleomagnetic evidence of early Pleistocene counterclockwise rotation in the Butajira volcanic zone, central Main Ethiopian rift // *J. Afr. Earth*

- Sci. 2024. Vol. 216. 105326. P. 1–10. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2024.105326>
122. *Muluneh A.A., Cuffaro M., Doglioni C.* Left-lateral transtension along the Ethiopian Rift and mantle-reference plate motions // *Tectonophysics*. 2014. Vol. 632. P. 21–31. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2014.05.036>
 123. *Muttoni G., Erba E., Kent D.V., Bachtadse V.* Mesozoic Alpine facies deposition as a result of past latitudinal plate motion // *Letters to Nature*. 2005. Vol. 434. P. 59–63. Doi: <https://doi.org/10.1038/nature03378>
 124. *Muttoni G., Kent D.V., Garzanti E., Brack P., Abrahamsen N., Gaetani M.* Early Permian Pangea 'B' to Late Permian Pangea 'A' // *Earth and Planet. Sci. Lett.* 2003. Vol. 215. P. 379–394. Doi: [https://doi.org/10.1016/S0012-821X\(03\)00452-7](https://doi.org/10.1016/S0012-821X(03)00452-7)
 125. *Nalbant S., McCloskey J., Steacy S., Barka A.A.* Stress accumulation and increased seismic risk in eastern Turkey // *Earth and Planet. Sci. Lett.* 2002. Vol. 195. P. 291–298. Doi: [https://doi.org/10.1016/S0012-821X\(01\)00592-1](https://doi.org/10.1016/S0012-821X(01)00592-1)
 126. *National Earthquake Information Center* (February 6, 2023). M7.8 – Kahramanmaraş Earthquake Sequence I. – (U.S. Geol. Surv. Archived from the original on February 6, 2023. Retrieved November 12, 2024).
 127. *Neev D., Emery K.O.* The Destruction of Sodom, Gomorrah, and Jericho: Geological, Climatological, and Archaeological Background. – (Oxford Univ. Press, New York, 1995). 175 p.
 128. *Piper J.D.A., Tatar O., Gürsoy H., Koçbulut F., Mesci B.L.* Paleomagnetic analysis of neotectonic deformation in the Anatolian accretionary collage, Turkey. In: *Postcollisional Tectonics and Magmatism in the Mediterranean Region and Asia*. – Ed. by Y. Dilek, S. Pavlides, (GSA Spec. Paper No.409. 2006). P. 417–439. Doi: [https://doi.org/10.1130/2006.2409\(20\)](https://doi.org/10.1130/2006.2409(20))
 129. *Reilinger R.E., McClusky S., Vernant P., Lawrence S., Ergintav S., Cakmak R., Ozener H., Kadirov F., Guliyev I. et al.* GPS constraints on continental deformation in the Africa-Arabia-Eurasia continental collision zone and implications for the dynamics of plate interactions // *J. Geophys. Res.* 2006. Vol. B05411. P. 1–26. Doi: <https://doi.org/10.1029/2005JB004051>
 130. *Rolland Y.* Caucasus collisional history: Review of data from East Anatolia to West Iran // *Gondwana Research*. 2017. Vol. 49. P. 130–146. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.gr.2017.05.005>
 131. *Rolland Y., Hässig M., Bosch D., Bruguier D., Melis R., Galoyan G., Topuz G., Sahakyan L., Avagyan A., Sosson M.* The East Anatolia-Lesser Caucasus ophiolite: An exceptional case of large-scale obduction, synthesis of data and numerical modelling // *Geosci. Frontiers*. 2019. Vol. 11(1). P. 1–26. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2018.12.009>
 132. *Ron H., Freund R., Garfunkel Z., Nur A.* Block rotation by strike-slip faulting: structural and paleomagnetic evidence // *J. Geophys. Res.* 1984. Vol. 89P. P. 6256–6270. Doi: <https://doi.org/10.1029/JB089IB07P06256>
 133. *Sandwell D.T., Smith W.H.F.* Global marine gravity from retracked Geosat and ERS-1 altimetry: ridge segmentation versus spreading rate // *J. Geophys. Res.* 2009. Vol. 114 (B01411). P. 1–18. Doi: <https://doi.org/10.1029/2008JB006008>
 134. *Scotese C.R.* Jurassic and Cretaceous plate tectonic reconstructions // *Paleogeogr., Palaeoclimatol., Palaeoecol.* (G³). 1991. Vol. 87. P. 493–501. Doi: [https://doi.org/10.1016/0031-0182\(91\)90145-H](https://doi.org/10.1016/0031-0182(91)90145-H)
 135. *Segev A.* Synchronous magmatic cycles during the fragmentation of Gondwana: Radiometric ages from the Levant and other provinces // *Tectonophysics*. 2000. Vol. 325. P. 257–277. Doi: [https://doi.org/10.1016/S0040-1951\(00\)00122-0](https://doi.org/10.1016/S0040-1951(00)00122-0)
 136. *Şengör A.M.C., Tüysüz O., İmren C., Sakıncı M., Eyidoğan H., Görür N., Le Pichon X., Rangin C.* The North Anatolian Fault: A New Look // *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.* 2005. Vol. 33. P. 37–112. Doi: <https://doi.org/10.1146/annurev.earth.32.101802.120415>
 137. *Smit J., Brun J.-P., Cloetingh S., Ben-Avraham Z.* The rift-like structure and asymmetry of the Dead Sea Fault // *Earth and Planet. Sci. Lett.* 2010. Vol. 290. P. 74–82. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2009.11.060>
 138. *Schmid C., van der Lee S., VanDecar J.C., Engdahl E.R., Giardin D.* Three-dimensional S velocity of the mantle in the Africa-Eurasia plate boundary region from phase arrival times and regional waveforms // *J. Geophys. Res.* 2008. Vol. 113. B03306. P. 1–16. Doi: <https://doi.org/10.1029/2005JB004193>
 139. *Skobelin E.A., Sharapov I.P., Bugayov A.F.* Deliberations of state and ways of perestroika in geology (Has the plate tectonics resulted in a revolution in geology?). – In: *Critical Aspects of the Plate Tectonics Theory*. –Vol. 1. – Athens (Greece). – (Theophrastus Publ. 1990). P. 17–37.
 140. *Stampfli G.M., Hochard C., Vèrard C., Wilhem C., von Raumer J.* The formation of Pangea // *Tectonophysics*. 2013. Vol. 593. P. 1–19. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2013.02.037>
 141. *Stampfli G.M., Kozur H.W.* Europe from the Variscan to the Alpine cycles // *Geol. Soc. London. Mem.* 2006. Vol. 32. P. 57–82. Doi: <https://doi.org/10.1144/GSL.MEM.2006.032.01.04>
 142. *Stern R.J., Johnson P.* Continental lithosphere of the Arabian Plate: A geologic, petrologic, and geophysical synthesis // *Earth-Sci. Rev.* 2010. Vol. 101. P. 29–67. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2010.01.002>
 143. *Taylor R.N., Nesbitt R.W.* Light rare-earth enrichment of supra subduction-zone mantle: evidence from the Troodos ophiolite, Cyprus // *Geology*. 1988. Vol. 16(5). P. 448–451. Doi: [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1988\)016<0448:LREEOS>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1988)016<0448:LREEOS>2.3.CO;2)
 144. *Tselentis G.-A., Drakopoulos J.* Stress Transfer and Nonlinear Stress Accumulation at the North Anatolian Fault, Turkey // *PAGEOPH.* 1990. Vol. 132. No. 4. P. 699–710. Doi: <https://doi.org/10.1007/BF00876814>
 145. *Uzel B., Langereis C.G., Kaymakci N., Sozibilir H., Ozkaymak C., Ozkaptan M.* Paleomagnetic Evidence for an Inverse Rotation History of Western Anatolia during the Exhumation of Menderes Core Complex // *Earth*

- and Planet. Sci. Lett. 2015. Vol. 414. P. 108–125. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2015.01.008>
146. Van der Meer D.G., van Hinsbergen D.J.J., Spakman W. Atlas of the underworld: Slab remnants in the mantle, their sinking history, and a new outlook on lower mantle viscosity // *Tectonophysics*. 2018. Vol. 723. P. 309–448. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2017.10.004>
 147. Van der Meer D.G., Spakman W., van Hinsbergen D.J.J., Amaru M.L., Torsvik T.H. Towards absolute plate motions constrained by lower-mantle slab remnants // *Nature Geoscience*. 2009. Vol. 3. P. 36–46. Doi: <https://doi.org/10.1038/ngeo708>
 148. Vannucci G., Pondrelli S., Argnani S., Morelli A., Gasperini P., Boschi E. An Atlas of Mediterranean seismicity // *Ann. Geophys.* 2004. Suppl. to Vol. 47(1). P. 247–306. Doi: <https://doi.org/10.4401/ag-3276>
 149. Vapnik Y., Sharygin V., Samoilov V., Yudalevich Z. The petrogenesis of basic and ultrabasic alkaline rocks of Western Makhtesh Ramon, Israel: melt and fluid inclusion study // *Int. J. Earth Sci. (Geol. Rundsh.)*, 2007. Vol. 96. P. 663–684. Doi: <https://doi.org/10.1007/s00531-006-0131-5>
 150. Verges J., Saura E., Casciello E., Fernandez M., Villasenor A., Jimenez-Munt I., Garcia-Castellanos D. Crustal-scale cross-sections across the NW Zagros belt: implications for the Arabian margin reconstruction // *Geol. Magazine*. 2011. Vol. 148. No. 5–6. P. 1–23. Doi: <https://doi.org/10.1017/S0016756811000331>
 151. Véronnet A. Rotation de l'Ellipsoïde Hétérogène et Figure Exacte de la Terre // *J. Math. Pures et Appl.* 1912. Vol. 8. Ser. 6. P. 331–463.
 152. Wen L., Helmberger D.V. Ultra-low velocity zones near the core-mantle boundary from broadband PKP precursors // *Science*. 1998. Vol. 279. P. 1701–1703. Doi: <https://doi.org/10.1126/science.279.5357.17>
 153. Wilson M., Shimron A.E., Rosenbaum J.M., Preston J. Early Cretaceous magmatism of Mount Hermon, Northern Israel // *Contrib. Mineral. Petrol.* 2000. Vol. 139. P. 54–67. Doi: <https://doi.org/10.1007/s004100050573>
 154. Yancey T.E., Wilson M.A., Mione A.C.S. The Ramonalinids: a new family of mound-building bivalves of the Early Middle Triassic // *Paleontology*. 2009. Vol. 52. P. 1349–1361. Doi: <https://doi.org/10.1111/j.1475-4983.2009.00908.x>
 155. Zahran H.M., Stewart I.C.F., Johnson P.R., Basahel M.H. Aeromagnetic anomaly maps of central and western Saudi Arabia. – (Saudi Geol. Surv. Scale 1:2 million. Saudi Geol. Surv. Open-File Rep. SGS-OF-2002-8. 2003), 6 p., 4 sh.
 156. Zare M., Amini H., Yazdi P., Sesetyan K., Demircioglu M.B., Kalafat D., Erdik M., Giardini D., Khan M.A., Tsereteli N. Recent developments of the Middle East catalog // *J. Seismol.* 2014. Vol. 18. P. 749–772. Doi: <https://doi.org/10.1007/s10950-014-9444-1>
 157. GEOMAG. URL: <https://geomag.colorado.edu/magnetic-field-model-mf7.html>. Accessed February, 2025.

A Giant Quasi-Ring Mantle Structure Beneath the Eastern Mediterranean: Interpretation of New Seismic-Tomography, Magnetic Field, and Paleobiogeographic Data

L. V. Eppelbaum^{a, b, *}, Yu. I. Katz^c, Z. Ben-Avraham^a

^aTel Aviv University, Faculty of Exact Sciences, Ramat Aviv, 6997801 Tel Aviv, Israel

^bAzerbaijan State Oil and Industry University (ASOIU), bld. 20, Azadlyg Ave., AZ1010 Baku, Azerbaijan

^cSteinhardt Museum of Natural History – National Research Center, Faculty of Life Sciences, Tel Aviv University, Ramat Aviv, 6997801 Tel Aviv, Israel

*e-mail: levap@tauex.tau.ac.il

In the presented article, a quantitative reinterpretation of the residual satellite gravity anomaly is carried out. Additional necessary confirmation is provided by the distribution of anomalies in the regional magnetic field ΔZ , reduced to a height of 2.5 km above sea level. Based on the analysis of detailed paleomagnetic studies, the average rotation rate of the surface projection of the deep structure over the past 70 million years is estimated at about 18 mm/year. The authors constructed a paleobiogeographic map showing the counterclockwise displacement of the typical Ethiopian fauna to the northwest. The influence of the rotating deep structure on stress in the overlying blocks of the Earth's crust and lithosphere before the catastrophic earthquakes with magnitudes $M=7.9$ and $M=7.8$ that occurred on 06.02.2023 in Turkey is shown. The synthesis of seismic tomography profiles made it possible to construct a seismotomographic scheme of the location of the deep structure. This scheme agrees with the analysis of satellite gravity and marine/terrestrial gravity studies, geoid anomalies, magnetic anomaly distributions, paleomagnetic data, regional GPS vector directions, seismological and tectonic-structural, and mineralogical-petrological data. The integrative combination of all these factors is indisputable to confirm the existence of an anomalous deep rotating structure beneath the Eastern Mediterranean and adjacent regions.

Keywords: geodynamics, seismotomography, magnetic field, satellite gravity, deep rotating structure, biopaleogeography, integrated analysis, Eastern Mediterranean