

ВОЗРАСТ И МОЩНОСТЬ ЛИТОСФЕРЫ РЕГИОНА ЧЕРНОГО МОРЯ© 2003 г. **Е. В. Вержбицкий, И. П. Кузин, Л. И. Лобковский***Институт океанологии им. П.П. Шишова. 117851, Москва, Нахимовский просп., д. 36*

Поступила в редакцию 02.04.2001 г.

По данным теплового потока выполнена оценка возраста Западной и Восточной котловин Черного моря (70–60 млн лет), которая хорошо согласуется с установленным по сейсмическим и магнитным данным временем образования Черного моря вследствие раскрытия задугового бассейна в тылу Понтийской островной дуги. Предположение о существовании этой дуги подтверждается мантийной сейсмичностью, наиболее ярко выраженной в Восточных Понтидах. Близкое время образования Западной и Восточной котловины поддерживает концепцию их одновременного генезиса в результате вращения по часовой стрелке вала Андрусова. Также по геотермическим данным определена мощность литосферы котловины Черного моря (60–65 км), соответствующая мощности океанической литосферы раннекайнозойского возраста. Эта оценка подтверждена результатами изучения дисперсии скоростей поверхностных волн на трассах от землетрясений Средиземноморского региона к сейсмостанциям Крыма и Западного Кавказа. Наряду с этим, анализ комплекса сейсмических и геотермических данных позволяет сделать вывод, что дно Западной котловины подстилается корой океанического типа, в то время как дно Восточной котловины характеризуется утоненной континентальной корой. По результатам выполненного геотермического моделирования мощность гранитного слоя коры Восточной котловины составляет примерно 4 км, а базальтового слоя около 6 км. Полученные мощности слоев коры котловины подтверждаются данными сейсмических исследований.

Существует множество гипотез о механизме образования Черного моря, где время возникновения этого бассейна охватывает всю шкалу геохронологии от протерозоя, рифея и палеозоя до мезозоя и кайнозоя, включая неоген и антропоген [9, 24]. Наибольшее распространение получили, главным образом, три гипотезы, основанные на различных идеях: океанизации (базификации), реликтового бассейна, задугового рифтогенеза и спрединга.

В первой гипотезе рассматривается, по существу, механизм базификации континентального основания вследствие экологитизации пород гранитного состава, причем возраст образования впадины относят к концу миоцена–плиоцену [15, 27, 29].

Согласно второй гипотезе, литосфера, подстилающая дно Черного моря, является останцом лова раннемезозойского океана Тетис [23].

Наконец, согласно третьей, на наш взгляд, наиболее приемлемой гипотезе, Черное море является задуговым бассейном, образованным в тылу Понтийской островной дуги в процессе рифтогенеза континентальной коры и спрединга [1]. Начало рифтогенеза датируется барремом–аптом [42] или альбом (120–110 млн лет) [28, 38]. Существует также вариант, в котором спрединг заменен прогибанием дна Черного моря вследствие термического охлаждения литосферы и осадко-накопления [7].

Таким образом, в целом вопрос образования и развития Черноморской впадины является дискуссионным. Особенно неясным остается возраст литосферы Западной и Восточной котловин Черного моря. Существующие модели предполагают либо разновременное образование котловин (Западной – в альбе–сеномане, Восточной – в поздне мелу или палеоцене–эоцене [40, 42]), либо одновременное – в поздне мелу [17], либо двухстадийное в апте–альбе и палеоцене–эоцене [11]. Причем, согласно первой и третьей моделям, главной стадией раскрытия Восточной котловины является палеоцен–эоцен. Отсутствие репрезентативных данных о строении нижней части осадочного заполнения котловин сильно затрудняло решение этого спорного вопроса.

В прошлом делались попытки определить возраст литосферы Западной и Восточной котловин по величине теплового потока, исходя из представления об их спрединговом происхождении [6, 35]. Согласно этим оценкам, возраст Западной котловины составляет 130–95 млн лет, возраст Восточной котловины – 110 млн лет, а мощность литосферы в котловинах 80–90 км. По данным работы [8] возраст коры в Западной и Восточной котловине одинаков – 55 млн лет. Оценка возраста по кривой погружения дна в соответствии с геотермической моделью образования литосферы дала величину для всего Черноморского бассейна около 80 млн лет [9].

Учитывая первостепенную важность определения возраста литосферы Западной и Восточной котловин для понимания эволюции Черного моря и в то же время большой разброс оценок, мы выполнили анализ геолого-геофизических данных для рассматриваемого региона, полученных в последнее время. При этом прежде всего использовались данные репрезентативной сейсмической съемки дна Черного моря, осуществленной итальянскими исследователями [34]. Были также использованы новые результаты геолого-геофизической интерпретации сейсмических материалов российско-итальянских групп ученых [11, 21]. На основании этих материалов в работе [11] сделан вывод, что главная фаза раскрытия Западной и Восточной котловин относится либо к концу мела, либо к началу палеоцена. Такой вывод не согласуется с приведенной выше оценкой возраста котловин (130–95, 110. 55 млн. лет), сделанной по геотермическим данным. Для получения информации о мощности литосферы Черного моря и ее генезисе использовались сейсмологические данные о распределении мантийных землетрясений, главным образом, в пределах Понтийских структур, примыкающих с юга к Восточно-Черноморской котловине. Кроме того, учтены особенности строения литосферы акватории Черного моря по данным о дисперсии поверхностных волн на станциях Крыма и Кавказа при землетрясениях Средиземноморского региона [25]. Наконец, проведено сопоставление оценок мощности литосферы на основе геотермических данных для акватории Черного моря и его континентального обрамления с севера и северо-запада по данным наблюдений на длинных профилях ГСЗ, геотермии, магнитотеллурического зондирования и сейсмологии [26].

Особенностью подхода к интерпретации геотермических данных по акватории Черного моря в настоящей статье является более точный учет влияния осадочной толщи на тепловой поток согласно работе [34] и выделение его глубинной составляющей. Это позволяет более обоснованно подойти как к оценке возраста, так и мощности литосферы Черноморской впадины. В качестве контроля определений возраста использованы данные магнитной съемки из работы [28].

ГЕОТЕРМИЧЕСКИЙ РЕЖИМ И ВРЕМЯ ОБРАЗОВАНИЯ ЗАПАДНОЙ И ВОСТОЧНОЙ КОТЛОВИН ЧЕРНОГО МОРЯ

На рис. 1 представлена карта основных структур, теплового потока и мантийной сейсмичности региона Черного моря, построенная по данным, опубликованным в работах [2, 5, 18, 32–34].

Для Западной котловины имеется 18 определений теплового потока, а для Восточной – 17. Средние измеренные (фоновые) значения в кот-

ловинах составляют, соответственно, 32 ± 14 и 34 ± 12 мВт/м², что примерно в 2 раза ниже среднепланетарного геотермического фона (60 мВт/м² и в 1.25 раза меньше, чем в глубоководных котловинах Мирового океана (40 мВт/м²). Учитывая большую мощность осадков в Западной и Восточной котловинах (в среднем 12 км [34]), следует ввести в фоновый тепловой поток поправку на скорость осадконакопления и контраст тепло- и температуропроводности осадочных пород.

Величина поправки может быть определена на основе учета мощности осадочной толщи котловины без уплотнения осадков под действием литостатического давления по уравнению (1) [6].

$$Z_l = \tilde{Z}_l - \frac{n_m}{\hat{K}} [e^{-\hat{K}(\tilde{Z}_n - \tilde{Z}_l)} - e^{-\hat{K}\tilde{Z}_n}] + \frac{n_m}{\hat{K}} (1 - e^{-\hat{K}Z_l}), \quad (1)$$

где Z_l – мощность нижнего слоя осадков без эффекта давления вышележащего слоя; \tilde{Z}_l – мощность нижнего слоя осадков; \tilde{Z}_n – мощность всей осадочной толщи; n_m – пористость осадков на дне; \hat{K} – параметр уплотнения осадков. Уравнение (1) решается методом итераций.

При расчете была использована хронологическая шкала мощностей осадочных горизонтов Западной и Восточной котловин, составленная по данным глубинного сейсмического зондирования (ГСЗ) [34]. Согласно этим данным, для палеоцено-олигоценовой толщи осадков котловин $\tilde{Z}_l = 8$ км и для всего осадочного чехла $\tilde{Z}_n = 12$ км при известных параметрах $n_m = 0.6$ и $\hat{K} = 0.45$ км⁻¹ [6] получим $Z_l = 11$ км.

Для введения коррекции на осадконакопление в фоновый тепловой поток котловины нами применялась методика, изложенная в работе [4]. С этой целью определялись параметры

$$P = \frac{H}{2\sqrt{a_2 t}}; \quad S = \frac{\lambda_2 \sqrt{a_1}}{\lambda_1 \sqrt{a_2}},$$

где H – мощность осадочного слоя; λ_1 и a_1 – коэффициенты теплопроводности и температуропроводности осадочных пород подстилающего основания; λ_2 и a_2 – коэффициенты теплопроводности и температуропроводности пород верхнего слоя осадков; t – возраст осадков.

Мощности осадочных горизонтов Западной и Восточной котловин при расчетах были взяты из работы [34], коэффициенты теплопроводности λ , температуропроводности a и радиоактивной теплогенерации σ – из работ [24, 36, 37]. По найденным параметрам P и S определялся тепловой поток q_0 , скорректированный на осадконакопление. Результаты расчетов приведены в таблицах 1 и 2.

Таблица 1. Тепловой поток Западной котловины Черного моря

Горизонт	H	q_n	λ	a	P	S	K	σ	q_0
Четвертичный	1	32	1.1	2	0.14	1.12	1.27	0.85	40
Плиоценовый	1	40	1.2	3	0.10	1.15	1.17	1.0	46
Миоценовый	2	46	1.3	4.5	0.06	1.0	1.05	1.15	46
Олигоценпалеоценовый	8	46	1.6	6.5	0.19	0.67	1.55	1.55	60

Примечание. H – мощность осадков, км; q_n – измеренный тепловой поток, мВт/м²; λ – теплопроводность, Вт/м К; a – температуропроводность, 10⁻⁷ м²/с; P , S – параметры коррекции теплового потока на осадконакопление; K – коэффициент коррекции; σ – радиоактивная теплогенерация, 10⁻⁶ Вт/м³; q_0 – исправленный тепловой поток, мВт/м². При расчетах использовались: для базальта $\lambda = 2.9$ Вт/м К; $a = 7 \times 10^{-7}$ м²/с; для гранита $\lambda = 2.5$ Вт/м К; $a = 5 \times 10^{-7}$ м²/с.

Таблица 2. Тепловой поток Восточной котловины Черного моря

Горизонт	H	q_n	λ	a	P	S	K	σ	q_0
Четвертичный	0.5	34	1.1	2	0.07	1.12	1.11	0.85	38
Плиоценовый	0.7	38	1.2	3	0.07	1.12	1.11	1.0	41
Миоценовый	3	41	1.3	4.5	0.09	1.0	1.19	1.15	46
Олигоценпалеоценовый	8	46	1.6	6.5	0.17	0.6	1.7	1.55	67

Примечание. См. примечания к таблице 1.

Тепловой поток Западной котловины, скорректированный на осадконакопление [4], составляет 60 мВт/м² и соответствует глубинному (из мантии и фундамента) тепловому потоку.

По результатам сейсмических исследований литосфера Западной котловины образовалась вследствие спрединга и ее возраст оценивается концом мела–началом палеоцена [16, 34, 39]. Поэтому, используя полученное выше значение теплового потока, можно выполнить оценку возраста литосферы котловины, применив выражение, которое является решением уравнения теплопроводности для геотермической модели образования в процессе спрединга океанического дна [30, 31].

$$t = \frac{\lambda^2 T_a^2}{\pi a q^2} = 23.2 \times 10^4 / q^2, \quad (2)$$

где t – возраст литосферы, млн. лет; $\lambda = 3.2$ Вт/м К – коэффициент теплопроводности вещества литосферы; $T_a = 1350^\circ\text{C}$ – температура ликвидуса вещества астеносферы; $a = 7.8 \times 10^{-7}$ м²/с – коэффициент температуропроводности вещества мантии; q – мВт/м² – глубинный тепловой поток.

Из уравнения (2) следует, что для глубинного теплового потока 60 мВт/м² возраст литосферы Западной котловины Черного моря составит около 64 млн. лет. Принимая во внимание погрешность определения возраста океанического дна по геотермическим данным ($\pm 10\%$), временем образования этой котловины следует считать при-

мерно 70–60 млн. лет (конец мела–начало палеоцена).

Таким образом, определенный по данным теплового потока возраст литосферы Западной котловины согласуется с возрастом, определенным по сейсмическим данным, что указывает на спрединговый характер образования дна. В целом, палеоцен-эоценовый осадочный комплекс в котловине залегает на базальтовом основании [34]. Это позволяет выполнить оценку мощности литосферы Западной котловины по соотношению, устанавливающему связь между мощностью океанической литосферы и временем ее остывания [41].

$$H_l = (T_s/T_a) \sqrt{\pi a t} = 1.6 \times 10^{-3} \sqrt{a t} = 7.8 \sqrt{t}, \quad (3)$$

где H_l – мощность литосферы, км; $T_s/T_a = 1200/1350^\circ\text{C}$ – отношение температур солидуса и ликвидуса базальтов мантии; $a = 7.8 \times 10^{-7}$ м²/с – температуропроводность вещества литосферы; t – млн. лет – возраст литосферы.

Подставляя в уравнение (3) возраст котловины, определенный по данным теплового потока (64 млн. лет), получим мощность литосферы, равную 62 км, а с учетом интервала времени образования дна она составляет 60–65 км. Это значение согласуется с известными представлениями о мощности океанической литосферы раннекайнозойского возраста [43].

Существует мнение, что раскрытие Восточной котловины Черного моря произошло вследствие вращения вала Шатского против часовой стрелки [40]. Вращение вала Шатского против часовой стрелки в палеоцене маловероятно, поскольку

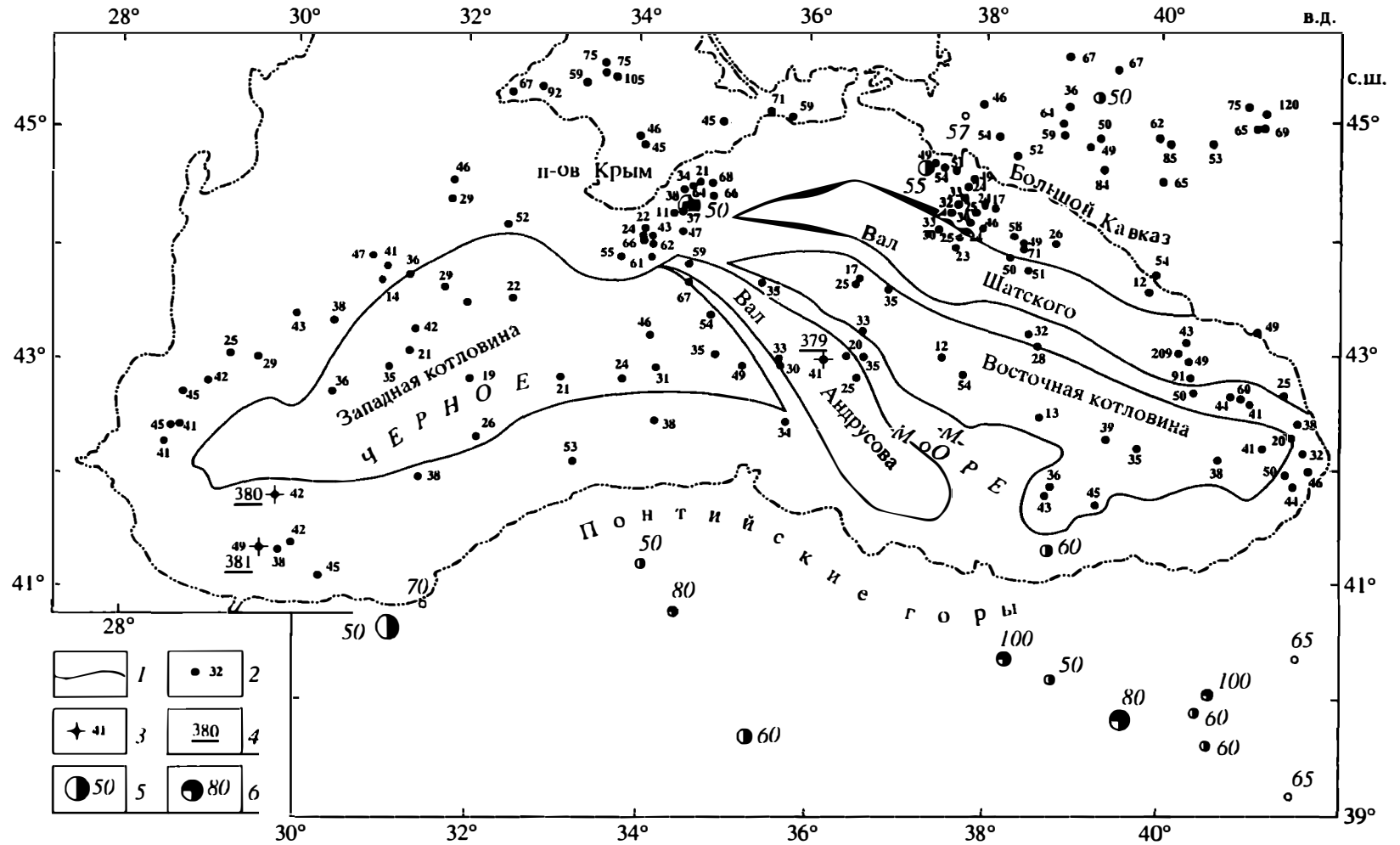


Рис. 1. Карта основных структур, теплового потока и мантийной сейсмичности региона Черного моря.

1 – границы геологических структур; 2 – точки измерения плотности теплового потока (в мВт/м²); 3 – то же в скважинах глубоководного бурения; 4 – номера скважин глубоководного бурения; 5, 6 – глубины очагов мантийных землетрясений: 5 – 50–75 км, 6 – 75–100 км.

признаков субдукции или сокращения (складчатости) на Кавказе в это время не было [12].

Восточная котловина заметно сужается к северо-западу, а Западная – к юго-востоку. Поэтому предполагают, что более вероятной является так называемая “афарская” кинематическая схема, в соответствии с которой раскрытие Восточной котловины связано с вращением по часовой стрелке узкого блока континентальной коры – вала Андрусова [10, 28]. Это движение было возможно только при южном дрейфе Понтийской островной дуги с одновременным раскрытием и Западной котловины [38].

Сейсмическими исследованиями в Восточной и Западной котловинах установлена одинаковая мощность палеоцен-эоценовых отложений (2–3 км) [34], что поддерживает концепцию синхронного генезиса этих котловин.

На близкий возраст образования Восточной и Западной котловин указывают также близкие значения их глубинного теплового потока (67 и 60 мВт/м², соответственно, см. таблицы 1 и 2).

По данным сейсмических исследований, дно Восточной котловины подстилается утоненной ($\beta \cong 3$)¹ континентальной корой [24, 34]. Учитывая наличие гранитного слоя коры, мы выполнили моделирование строения литосферы котловины. При этом использовано следующее выражение (4) для стационарного теплового поля континентального генезиса [19, 22]:

$$q = \lambda \Delta T / \Delta Z + A \Delta Z, \quad (4)$$

где q – глубинный тепловой поток, мВт/м²; $\lambda = 3.2$ Вт/м К, теплопроводность вещества литосферы; $\Delta T = 1200^\circ\text{C}$ – температура на подошве литосферы; ΔZ – толщина слоя литосферы, м; $A = 1.5 \times 10^{-6}$, 0.46×10^{-6} и 0.008×10^{-6} Вт/м³ – генерация радиогенного тепла соответственно для гранитного, базальтового и мантийного слоев.

Как показывает моделирование, литосфера Восточной котловины общей мощностью 66 км, с базальтовым слоем 6 км и гранитным слоем 4 км создает суммарный тепловой поток 68 мВт/м². Это хорошо согласуется с глубинным тепловым потоком 67 мВт/м², определенным выше по сейсмическим и геотермическим данным, что указывает на реальность данной модели строения литосферы. Полученные в результате моделирования мощности базальтового и гранитного слоев коры котловины близки к усредненным мощностям этих слоев, определенным по результатам сейсмических исследований [24, 34].

По сейсмическим данным палеоцен-эоценовый комплекс в Восточной котловине залегает на рифтогенных структурах – системе наклонных сбросовых блоков и, таким образом, является пострифто-

вым (рис. 2) [34]. Рифтогенез не мог быть существенно оторван во времени от начала накопления данного комплекса. Это указывает на то, что главная фаза образования котловины относится к концу мела или началу палеоцена [11, 34, 42].

Вычитая из суммарного теплового потока вклад радиогенного тепла всей литосферы с учетом гранитного слоя коры, ~ 8 мВт/м², по формуле (2) можно рассчитать возраст Восточной котловины [3], который практически равен полученному выше возрасту Западной котловины (ранний палеоцен). Этот возраст подтверждается независимыми магнитными данными для северо-восточной части Восточной котловины (граница с валом Шатского). В этом районе выделены линейные магнитные аномалии 26–23, возраст которых в соответствии со шкалой геомагнитной хронологии составляет 64–62 млн. лет [28].

Таким образом, определенный по данным теплового потока одинаковый возраст Западной и Восточной котловин Черного моря хорошо согласуется с сейсмическими данными. Это позволяет сделать заключение о синхронности образования их литосферы в позднем мелу–раннем палеоцене (рис. 3) [11]. При этом выполненный выше анализ данных теплового потока указывает, что генезис литосферы Западной котловины обусловлен процессами спрединга в соответствии с геотермической моделью образования океанического дна. Результаты геотермического моделирования позволяют сделать заключение, что раскрытие Восточной котловины связано с процессами рифтогенеза [13]. Эти выводы подтверждаются данными сейсмических исследований.

СОПОСТАВЛЕНИЕ ОЦЕНОК МОЩНОСТИ ЛИТОСФЕРЫ ГЕОТЕРМИЧЕСКИМ СПОСОБОМ С ОЦЕНКАМИ ПО ДРУГИМ ГЕОФИЗИЧЕСКИМ ДАННЫМ

Черноморский бассейн отделен от Большекавказского бассейна валом Шатского – коровым блоком (микроконтинентом), отколовшимся от Понтийской дуги, скорее всего, в палеоцене. Большекавказский бассейн образовался в ранней юре и существовал вплоть до конца палеоцена [38].

Для континентального обрамления впадины Черного моря с севера и северо-запада имеются оценки мощности литосферы по данным наблюдений на длинных профилях ГСЗ, геотермии, магнитотеллурического зондирования и сейсмологии [26]. Согласно этим данным, под большей частью Крымского п-ова и прилегающей акватории Черного моря мощность литосферы составляет 100–150 км (меньшая мощность соответствует северо-западной части Крыма). Под юго-западным флангом Восточно-Европейской платформы мощность литосферы возрастает до 250 км.

¹ β – коэффициент утонения коры.

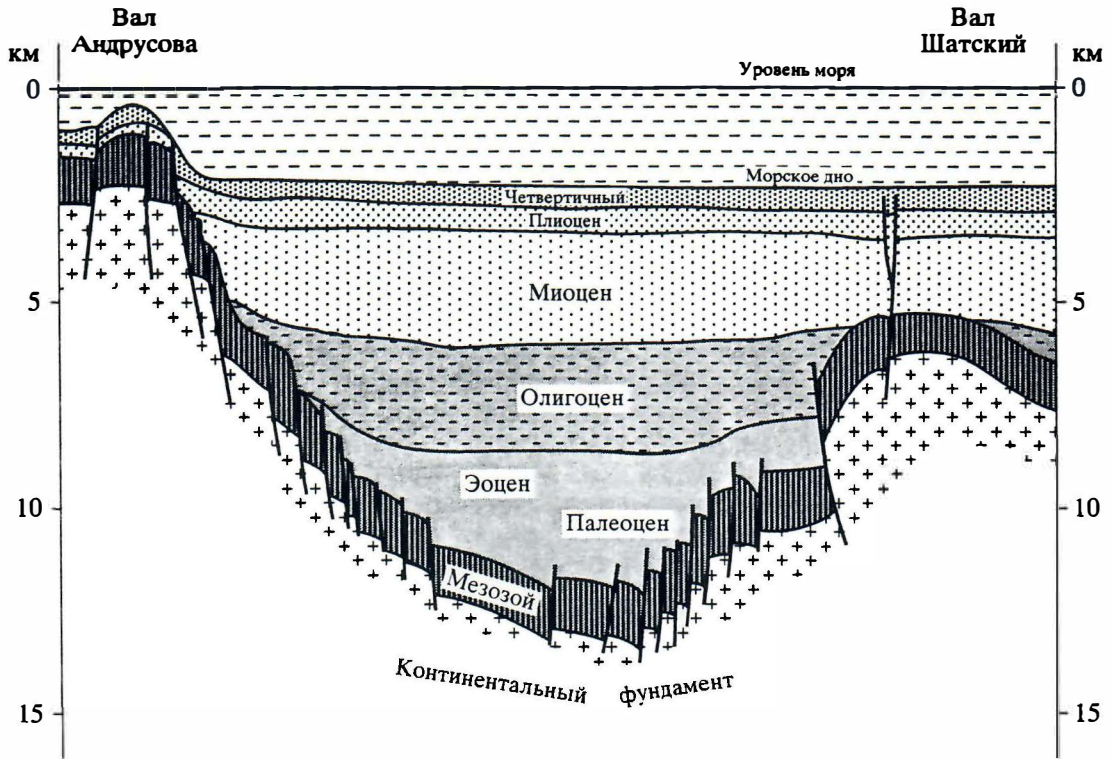


Рис. 2. Сейсмический профиль, пересекающий в северо-восточном направлении южную часть вала Андрусова, Восточную котловину и вал Шатского. Палеоцен-эоценовый осадочный комплекс залегает несогласно на мезозойских породах.

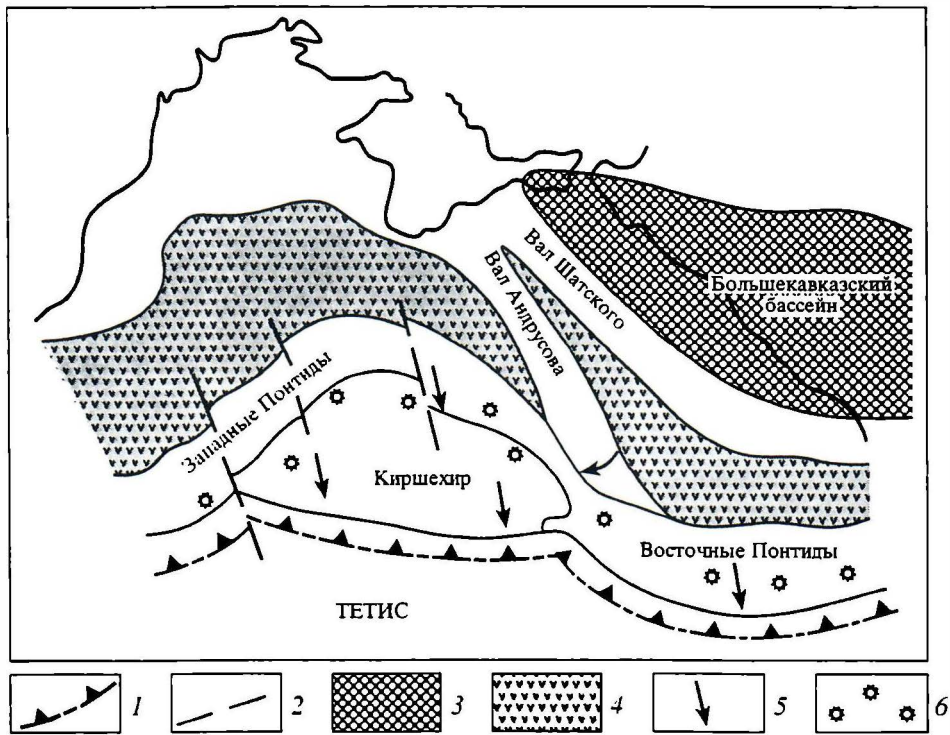


Рис. 3. Палеогеодинамическая реконструкция палеоценового возраста. 1 – зона субдукции; 2 – поперечные разломы; 3 – раннемезозойский и 4 – палеоценовый задуговые бассейны; 5 – направление движения блоков относительно Евразии; 6 – вулканическая дуга.

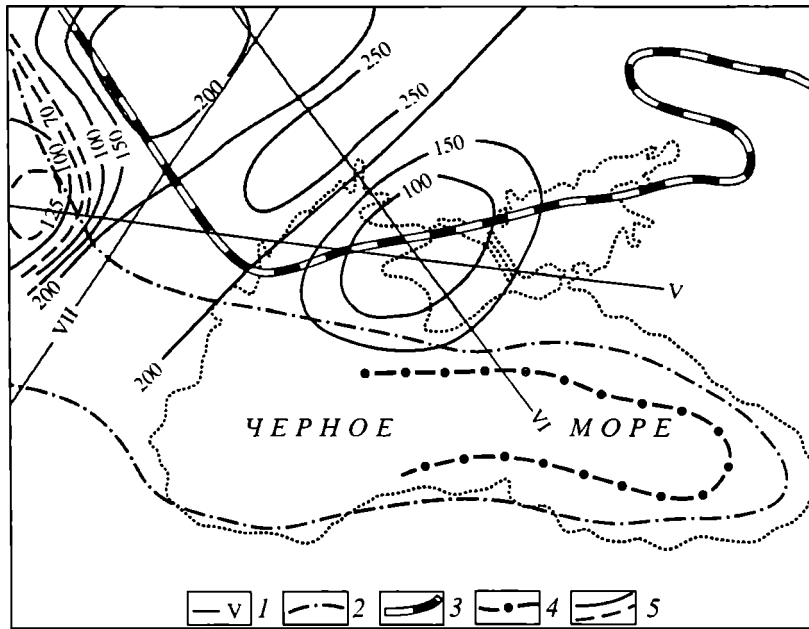


Рис. 4. Схема мощности литосферы региона Черного моря.

1 – региональные профили ГСЗ; 2 – граница области пониженной мощности земной коры под акваторией Черного моря; 3 – граница Восточно-Европейской платформы; 4, 5 – мощность литосферы: 4 – (60–70 км), по [25], 5 – по [26], км.

уменьшаясь в районе Вранча до 70–100 или 70–120 км. В то же время мощность земной коры под акваторией Черного моря понижена, см. рис. 4.

В нашем случае имеется возможность произвести оценки мощности литосферы по геотермическим данным для пунктов акватории Черного моря у южного побережья Крыма и у Анапы, а также для Кубани (район Краснодар), соответствующих эпицентрам мантийных землетрясений Северо-Западного Кавказа (Кубанское 1926 г., $M = 5.4$; $H = 50$ км, Анапское 1966 г., $M = 5.8$; $H = 55$ км) и Южного Крыма (афтершок Крымского землетрясения 1927 г. с $M = 5.8$ и $H = 50$ км [18]). За основу расчета приняты величины теплового потока, приведенные на рис. 1 и данные о структуре земной коры из работ [14, 25]. В принципе

выбор расчетных точек для оценки мощности литосферы произвольный, однако представляло интерес определение этой мощности именно в пунктах возникновения мантийных землетрясений, чтобы выяснить положение их очагов в литосфере. Исходные данные и вычисленная мощность литосферы приведены в табл. 3.

Мощность литосферы в таблице 3 рассчитывалась по соотношению (4). При расчете использовались региональные фоновые значения теплового потока ~ 50 мВт/м² для Анапского и Крымского землетрясений и ~ 60 мВт/м² для Кубанского землетрясения; генерация радиогенного тепла осадков 1.4×10^{-6} Вт/м³.

Из табл. 3 следует, что оценки мощности литосферы по геотермическим данным для Северо-

Таблица 3. Оценки мощности литосферы по геотермическим данным

Район	Структура земной коры			Мощность литосферы, км, по данным		Параметры землетрясения				Название землетрясения и дата
	Осадки h , км	Гранит h , км	Базальт h , км	Геотермии	ГСЗ	γ° , С с.ш.	λ° , В в.д.	H , км	M	
СЗ-ый Кавказ	6	13	20	175	>150	45.3	39.3	50	5.4	Кубанское, 19.04.1926 г.
СЗ-ый Кавказ	3	9	19	148	150	44.3	34.3	55	5.8	Анапское, 12.07.1966 г.
Крым	8	10	19	153	>150	44.7	37.3	50	5.8	Афтершок Крымского, 11.09.1927 г.

Примечание. положения эпицентров мантийных землетрясений приведены на рис. 1. γ° – широта географическая; λ° – долгота; H – глубина очага; M – магнитуда; h – мощность.

Западного Кавказа весьма близки к таковым, а для южного побережья Крыма и совпадают с независимыми оценками по ГСЗ из работы [26]. Принимая во внимание погрешность оценки мощности литосферы по геотермическому методу ($\pm 10\%$), согласованность результатов можно считать хорошей. Судя по приведенным выше глубинам очагов землетрясений, они должны располагаться в верхних слоях литосферы.

На рис. 1 показаны также эпицентры мантийных землетрясений в Понтийских структурах Северной Турции по данным каталога Международного сейсмологического центра. Из рис. 1 следует, что большинство мантийных землетрясений с глубинами очагов 50–100 км сосредоточено в пределах Восточных Понтидов. Отчасти такую ситуацию можно объяснить фактором близости этого региона к региональным сейсмостанциям Кавказа. Известно, что изучение сейсмичности Турции началось только после катастрофического Эрзинджанского землетрясения 1939 г. ($M = 8$; $I_0^2 = 10$ –11 баллов), а развитие сети – примерно с 1960 г. В середине 60-х гг. XX в. на территории Турции работали всего 3 сейсмостанции: к северо-востоку от Анкары, в районе Измита и на северо-западе страны [20]. По имеющимся данным, в период после 1939 г. в пределах Западных Понтидов возникло единственное мантийное землетрясение (1957 г., $M = 5.8$; $H = 50$ км) [20].

Ввиду отсутствия данных по тепловому потоку и структуре земной коры для Северной Турции оценка мощности литосферы геотермическим способом для Понтийских структур невозможна. По сейсмологическим данным можно только приблизительно судить о возможной мощности литосферы. Так, для Восточных Понтидов, основываясь на максимальной глубине очагов мантийных землетрясений, литосфера не должна быть тоньше 100 км. Вместе с тем, тенденцию к уменьшению глубин очагов мантийных землетрясений в сторону южного побережья Черного моря можно рассматривать как указание на уменьшение мощности литосферы под котловиной Черного моря.

Более определенную информацию о пониженной мощности литосферы под акваторией Черного моря дают результаты анализа записей прямых и отраженных поверхностных волн от глубинной границы при землетрясениях Средиземноморского региона на станциях сейсмостанциях Крыма, а также станциях Анапа и Сочи. В работе [25], на основе определений максимальной длины прямых и отраженных поверхностных волн и изучения дисперсии их скоростей под восточной частью Черного моря, показано, что отражающая граница залегает на глубине 60–70 км. С учетом определений мощности литосферы по геотермическим данным (60–65 км, как показано выше),

положение границы совпадает с подошвой литосферы по геотермии. Контуры этой отражающей границы согласно работе [25] субпараллельны границе, разделяющей области с пониженной и повышенной мощностью земной коры [26], и смещены в глубь акватории на величину от 30–40 до 70 км (см. рис. 4). Принимая во внимание эти данные, следует ожидать резкого отрицательного градиента мощности литосферы к югу от Крыма (примерно 1.0–1.6 км/км).

В заключение раздела необходимо подчеркнуть, что информация по мантийной сейсмичности в обрамлении Черного моря, используемая в настоящей работе, имеет фундаментальное значение и играет двоякую роль. Во-первых, принимая во внимание большую инерционность тектонических процессов, можно считать, что “дуговая” предыстория Понтических структур должна оказывать влияние и на развитие современных процессов (наиболее существенный аспект). Одним из видов проявления этих процессов должна быть реликтовая мантийная сейсмичность. Этот фактор более сильно выражен в области Восточных Понтидов, в то время как единичные мантийные землетрясения в Западных Понтидах, Южном Крыму и на Северо-Западном Кавказе в значительно меньшей степени отражают тектоническую предысторию этих регионов. Во-вторых, наибольшие глубины очагов мантийных землетрясений дают представление о возможной мощности литосферы, поскольку в пределах астеносферы отсутствуют условия для возникновения хрупких деформаций вследствие преимущественно пластической релаксации накапливаемых тектонических напряжений. Это заключение в какой-то мере применимо к Восточным Понтидам и мало существенно для других регионов в обрамлении Черного моря.

Таким образом, использование сейсмологической информации (мантийная сейсмичность) позволило подтвердить, с одной стороны, геологические предположения о “дуговой” предыстории Понтидов (в меньшей степени для других регионов, активных в древней тектонической истории). С другой стороны, сейсмологические данные (отражение и дисперсия скоростей поверхностных волн) явились независимым подтверждением заключения о пониженной мощности литосферы под акваторией Черного моря (до 70 км), полученного на основе геотермических расчетов.

ВЫВОДЫ

1. По данным теплового потока выполнена оценка возраста литосферы Западной и Восточной котловин Черного моря (70–60 млн. лет). Эта оценка хорошо согласуется с установленным по сейсмическим данным временем (конец мела – начало палеоцена) генезиса котловин в результа-

² I_0 – интенсивность сотрясений в эпицентре.

те раскрытия задугового бассейна в тылу Понтийской островной дуги. Дуговая предыстория Понтида подтверждается существованием мантийной сейсмичности, наиболее активной в пределах Восточных Понтидов.

2. Близкий возраст литосферы котловин, установленный по геотермическим данным, поддерживает концепцию одновременности их образования вследствие вращения по часовой стрелке вала Андрусова.

3. Рассчитанная по данным теплового потока мощность литосферы Западной и Восточной котловин (60–65 км) соответствует мощности океанической литосферы раннекайнозойского времени. Этот вывод подтверждается данными о дисперсии скоростей поверхностных волн на трассах от землетрясений Средиземноморского региона к сейсмостанциям Крыма и Западного Кавказа (Анапа, Сочи). Согласно этим данным, под северной и южной частями акватории Черного моря выделяется отражающая граница на глубине 60–70 км, ориентированная параллельно побережьям. Эту границу можно рассматривать как подошву литосферы под Черным морем, поскольку глубина ее залегания согласуется с геотермическими оценками мощности литосферы.

4. Анализ данных теплового потока по акватории Черного моря позволяет сделать вывод об океаническом типе коры, подстилающей дно Западной котловины. Результаты геотермического моделирования строения литосферы Восточной котловины указывают, что, кроме базальтового слоя мощностью 6 км, здесь присутствует утоненный гранитный слой, мощность которого может достигать 4 км. Определенные мощности базальтового и гранитного слоев коры согласуются с оценками, сделанными по материалам глубинного сейсмического зондирования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Адамия Ш.А., Закариадзе Г.С., Лордкипанидзе М.Б. Эволюция древней активной континентальной окраины на примере Кавказа // Геотектоника. 1974. № 4. С. 88–103.
2. Артеменко В.И., Корсаков О.Д., Смирнова Л.Н. Детальные геотермические исследования на континентальном склоне западно-кавказского района Черного моря // Изв. АН СССР. Физика Земли. 1988. № 3. С. 92–97.
3. Вержбицкий Е.В. Геотермический режим и тектоника дна акваторий вдоль Альпийско-Гималайского пояса. М.: Наука, 1996. 132 с.
4. Гольмшток А.Я. О влиянии осадконакопления на глубинный тепловой поток // Океанология. 1979. Т. 19. Вып. 6. С. 1133–1138.
5. Гольмшток А.Я., Золотарев В.Г. Глубинный тепловой поток Черноморской впадины // Докл. АН СССР. 1980. Т. 254. № 4. С. 956–959.
6. Гольмшток А.Я., Хахалев Е.М. Оценка возраста Черноморской впадины и ее эволюция. История океана Тетис // М.: ИО АН СССР. 1987. С. 116–138.
7. Грачев А.Ф. Основные проблемы новейшей тектоники и геодинамики Северной Евразии // Физика Земли. 1996. № 2. С. 5–36.
8. Золотарев В.Г. Тепловой поток в различных геодинамических условиях на примере Красноморско-Аденского региона. Африкано-Сицилийского порога и Черного моря: Автореф. дис. ... канд. геол.-мин. наук. М.: ИО АН СССР. 1986. 24 с.
9. Зоненшайн Л.П., Ле Пишон К. Глубоководные впадины Черного и Каспийского морей – остатки мезозойских тыловых бассейнов. История океана Тетис. М.: ИО АН СССР. 1987. С. 74–93.
10. Казьмин В.Г. Рифтовые структуры Восточной Африки – раскол континента и зарождение океана. М.: Наука, 1987. 206 с.
11. Казьмин В.Г., Шрейдер А.А., Финетти И., Мелихов В.Р., Булычев А.А., Гиллод Д.А., Андреева О.И., Шрейдер Ал.Ан. Ранние стадии развития Черного моря по сейсмическим данным // Геотектоника. 2000. № 1. С. 46–60.
12. Конн М.Л., Щерба И.Г. Кавказский бассейн в палеогене // Геотектоника. 1998. № 12. С. 29–50.
13. Леонов Ю.Г. Континентальный рифтогенез: современные представления, проблемы и решения // Геотектоника. 2001. № 2. С. 3–16.
14. Маловицкий Я.П., Непрочнов Ю.П. Сопоставление сейсмических и гравиметрических данных о строении земной коры Черноморской впадины. Строение Черноморской впадины. М.: Наука. 1966. С. 5–16.
15. Муратов М.В. История формирования глубоководной котловины Черного моря в сравнении с впадинами Средиземного // Геотектоника. 1972. № 5. С. 22–41.
16. Непрочнов Ю.П. Глубинное строение земной коры под Черным морем по сейсмическим данным // Бюл. МОИП. Отд. геол. 1960. Т. 35. Вып. 4. С. 30–35.
17. Никишин А.М., Коротаев М.В. История формирования Черноморской впадины // Общие вопросы тектоники. Тектоника России: Матер. XXXIII Тектонического совещания. М.: ГЕОС, 2000. С. 360–363.
18. Новый каталог сильных землетрясений на территории СССР. М.: Наука, 1977. 535 с.
19. Поляк Б.Г., Смирнов Я.Б. Связь глубинного теплового потока с тектоническим строением континентов // Геотектоника. 1968. № 4. С. 3.
20. Полякова Т.П. Сейсмичность центральной части Средиземноморского пояса. М.: Наука, 1985. 160 с.
21. Пояснительная записка к альбому структурных карт и карт мощностей кайнозойских отложений Черноморской впадины / Ред. Туголесов Д.А. Геленджик: ГП НИПИ Океангеофизика, 1993. 71 с.
22. Смирнов Я.Б. Тепловое поле территории СССР. М.: ГИН АН СССР, ГУГК, 1980. 150 с.
23. Сорохтин О.Г. Глобальная эволюция Земли. М.: Наука, 1974. 184 с.

24. Строение и эволюция земной коры и верхней мантии Черного моря / Отв. ред. В.В. Белоусов, В.С. Вольвовский. М.: Наука, 1989. 208 с.
25. Строение, напряженно-деформированное состояние и условия сейсмичности литосферы Малого Кавказа. Тбилиси: Мецниереба, 1983. 124 с.
26. Чекунов А.В., Соллогуб В.Б., Соллогуб Н.В. и др. Глубинное строение литосферы Центральной и Юго-Восточной Европы. Сейсмичность и сейсмическое районирование Северной Евразии. М.: ИФЗ, 1993. Вып. 1. С. 152–161.
27. Шлезингер А.В. Структура осадочного чехла Черноморского бассейна // Проблемы тектоники земной коры. М.: Наука, 1981. С. 237–262.
28. Шрейдер А.А., Казьмин В.Г., Лыгин В.А. Магнитные аномалии и проблема возраста котловины Черного моря // Геотектоника. 1977. № 1. С. 59–70.
29. Янишин А.Л., Басеняц Ш.А., Пилипенко А.И., Шлезингер А.Е. Новые данные о времени образования глубоководной Черноморской впадины // Докл. АН СССР. 1980. Т. 252. № 1. С. 223–227.
30. Carlson R.L., Johnson H.P. On modeling the thermal evolution of the oceanic upper mantle: An assessment of the cooling plate model // J. Geophys. Res. 1994. V. 99. № B2. P. 3201–3214.
31. Davies E.E., Lister C.R.B. Fundamentals of ridge crest topography // Earth and Planet. Sci. Lett. 1974. Vol. 21. P. 405–413.
32. Erickson A., Simmons G. Environmental and Geophysical interpretation of heat flow measurements in Black Sea // Geol. Chem. and Biol. Tulsa: Okla. 1974. С. 50–62.
33. Erickson A.J., Von Herzen R.P. Downhole temperature measurements and heat flow data in the Black Sea // Init. report DSDP. Washington, 1978, Vol. 42. Part 2. P. 1085–1103.
34. Finetti I., Bricchi G., Del Ben A., Pipan M., Xuan Z. Geophysical study of the Black Sea // Bull. Geofisica. Teor. Ed. Appl. 1988. Vol. 30. № 117–118. P. 197–324.
35. Golmshtok A.Y., Zonenshain L.P., Terekhov A.A., Shainurov R.V. Age, thermal evolution and history of the Black Sea Basin based on heat flow and multichannel refraction data // Tectonophysics. 1992. Vol. 210. P. 273–293.
36. Initial Reports of the Deep Sea Drilling Project. Washington, 1978. Vol. 42. Part 1. 1249 p.
37. Initial Reports of the Deep Sea Drilling Project. Washington, 1978. Vol. 42. Part 2. 1244 p.
38. Kazmin V. Mesozoic to Cenozoic history of the back-arc basins in the Black Sea-Caucasus region // CASP Rep. № 656. Cambridge, 1997. 41 p.
39. Neprochnov Yu.P., Neprochnova A.F., Mirlin E.E. Deep structure of the Black Sea basin / Eds. E.T. Degens, D.A. Ross // The Black Sea geology, chemistry and biology. Tulsa: Am. Assoc. Petr. Geol. 1974. P. 35–49.
40. Okay A.I., Sengor A.M.C., Gorur N. Kinematic history of the opening of the Black Sea and its effect on the surrounding regions // Geology. 1994. Vol. 22. P. 267–270.
41. Parker R.L., Oldenburg D.W. Thermal model of ocean ridges // Nature. Phys. Sci. 1973. Vol. 242. P. 137–139.
42. Robinson A.G., Rudat J.H., Banks C.J., Wiles R.L. Petroleum geology of the Black Sea // Marine and Petroleum Geology. 1996. Vol. 13. № 2. P. 195–223.
43. Yoshii T. Regionality of group velocities of Rayleigh waves and thickness of the plate // Earth and Planet Sci. Lett. 1975. Vol. 25. P. 305–312.

Рецензент: Ю.Г. Леонов

Age and Thickness of the Lithosphere in the Black Sea Region

E. V. Verzhbitskii, I. P. Kuzin, and L. I. Lobkovskii

Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, Nakhimovskii pr. 36. Moscow, 117851 Russia

Abstract—The age of the Western and Eastern basins of the Black Sea was estimated on the basis of heat flow data. The estimated age (70–60 Ma) is in good accordance with the opening date of the Black Sea as determined by seismic and magnetic data. During this time, the Black Sea was formed due to the opening of back-arc basins at the rear side of the ancient Pontide island arc. The existence of this arc is confirmed by extremely high mantle seismicity in the eastern Pontide Mountains. The nearly synchronous inception of the Western and Eastern basins supports the hypothesis of their simultaneous genesis as a result of the clockwise rotation of the Andrusov arch. The lithospheric thickness of these basins (60–65 km) as determined from geothermal data corresponds to the thickness of the Early Cenozoic oceanic lithosphere. This estimate is confirmed by the data on the velocity dispersion of surface waves that propagate from earthquake foci in the Mediterranean to seismic stations in the Crimea and western Caucasus. Seismic and geothermal data suggest that seafloor in the Western basin is underlain by oceanic crust, while the seafloor in the Eastern basin rests on thinned continental crust. Geothermal modeling indicates that the thickness of the granitic layer in the Eastern basin is about 4 km, and that of the basaltic layer is approximately 6 km. Crustal layer thickness estimates for this basin are confirmed by seismic data.