

УДК 550.834.05

В.Б. Пийп<sup>1</sup>, А.Г. Родников<sup>2</sup>, Н.А. Буваев<sup>3</sup>

## ИССЛЕДОВАНИЕ ГЛУБИННОГО СТРОЕНИЯ ЛИТОСФЕРЫ ВДОЛЬ СЕЙСМИЧЕСКОГО ПРОФИЛЯ КАВКАЗ–ЮЖНО-КАСПИЙСКАЯ ВПАДИНА–АПШЕРОНСКИЙ ПОРОГ–СРЕДНЕ-КАСПИЙСКАЯ ВПАДИНА–ТУРАНСКАЯ ПЛИТА

По сейсмическим данным получен разрез литосферы через Кавказ, Каспийское море и Туранскую плиту. Использована интерпретация годографов преломленных волн методом однородных функций. Никакие предварительные модели разреза при этом не использовались. На разрезе длиной более 1000 км видны структуры коры и мантии до глубины 60 км в Куринской, Южно-Каспийской и Средне-Каспийской впадинах и на Туранской плите, а также характер сочленения этих структур. Разрез Южно-Каспийской впадины в целом удовлетворяет представлениям Е.В. Артюшкова о ее строении. Мощный осадочный слой до глубины 30 км подстилается утоненной корой мощностью около 10 км и высокоскоростной мантией. Туранская плита имеет трехслойный разрез, характерный для платформ мощностью около 50 км.

*Ключевые слова:* сейсмический разрез, метод однородных функций, геологическая интерпретация.

Deep section through Caucasuses — Caspian sea and Turan plate is received on the seismic data. The interpretation of travelttime curves of the refracted waves by a method of homogeneous functions is used. Any preliminary models of a section were not used. Structures of the crust and mantle up to depths of 60 km are visible in Kurin depression, South-Caspian both Middle — Caspian depression and Turan plate, and also character сочленения of these structures at the section of length more than 1000 kms. The section of the South — Caspian depression, as a whole, satisfies to performances of E.V. Artjushkov about this structure. The powerful layer of sediment deposits up to depth of 30 km is spread by thin crust by capacity about 10 km and high-velocity mantle. Turan plate has three layer section, which is characteristic for platforms by capacity about 50 km

*Key words:* seismic section, homogeneous function method, geological interpretation.

**Введение.** Исследованию глубинного строения литосферы Каспийского моря уделяется повышенное внимание в России и за рубежом в связи с перспективами открытия новых крупных месторождений углеводородов. Несмотря на многочисленные геолого-геофизические исследования, многие детали строения и эволюции впадин Каспийского моря остаются невыясненными. Нами сделана попытка провести геологическую интерпретацию сейсмических профилей, полученных в прошлом веке, по новой методике, разработанной на геологическом факультете МГУ, которая позволяет получить новые данные как о строении осадочных бассейнов, так и о структурных особенностях коры и верхней мантии региона [Пийп, 1991; Piip, 2001].

На акватории Каспийского моря и прилегающих территориях Кавказа и Туркмении в разные годы было выполнено огромное количество профилей глубинного сейсмического зондирования (ГСЗ). Из материалов ГСЗ нами выбраны наблюдения, относящиеся к единому профилю, пересекающему Кас-

пийский регион и прилегающие территории Кавказа (Куринскую впадину), Южно-Каспийскую впадину, Апшеронский порог, Средне-Каспийскую впадину и Туранскую плиту [Аксенович и др., 1962; Гальперин, Косминская, 1958; Краснопецева, 1984; Егоркин, Матушкин, 1968]. Как отмечала Г.В. Краснопецева [Краснопецева, 1984], большинство сейсмических материалов тех лет представлено в виде традиционных разрезов «осадочного», «гранитного» и «базальтового» слоев с осредненными значениями граничной и средней скорости упругих волн.

Новая интерпретация сейсмических материалов дала возможность получить детальный сейсмический разрез земной коры и верхов мантии протяженностью до 1100 км и глубиной 60 км, на котором проявились дополнительные характеристики глубинного строения структурных элементов Каспийского региона.

**Краткая тектоническая характеристика.** Регион Каспийского моря пересекает с севера на юг серию широтных структурных зон юго-восточной окраины древней (докембрийской) Восточно-Европейской

<sup>1</sup> Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра сейсмологии и геоакустики, вед. науч. с., профессор, *e-mail:* piip@list.ru

<sup>2</sup> Геофизический центр РАН, гл. науч. с., профессор, *e-mail:* rodnikov@wdsb.ru

<sup>3</sup> Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра сейсмологии и геоакустики, аспирант, *e-mail:* piip@list.ru

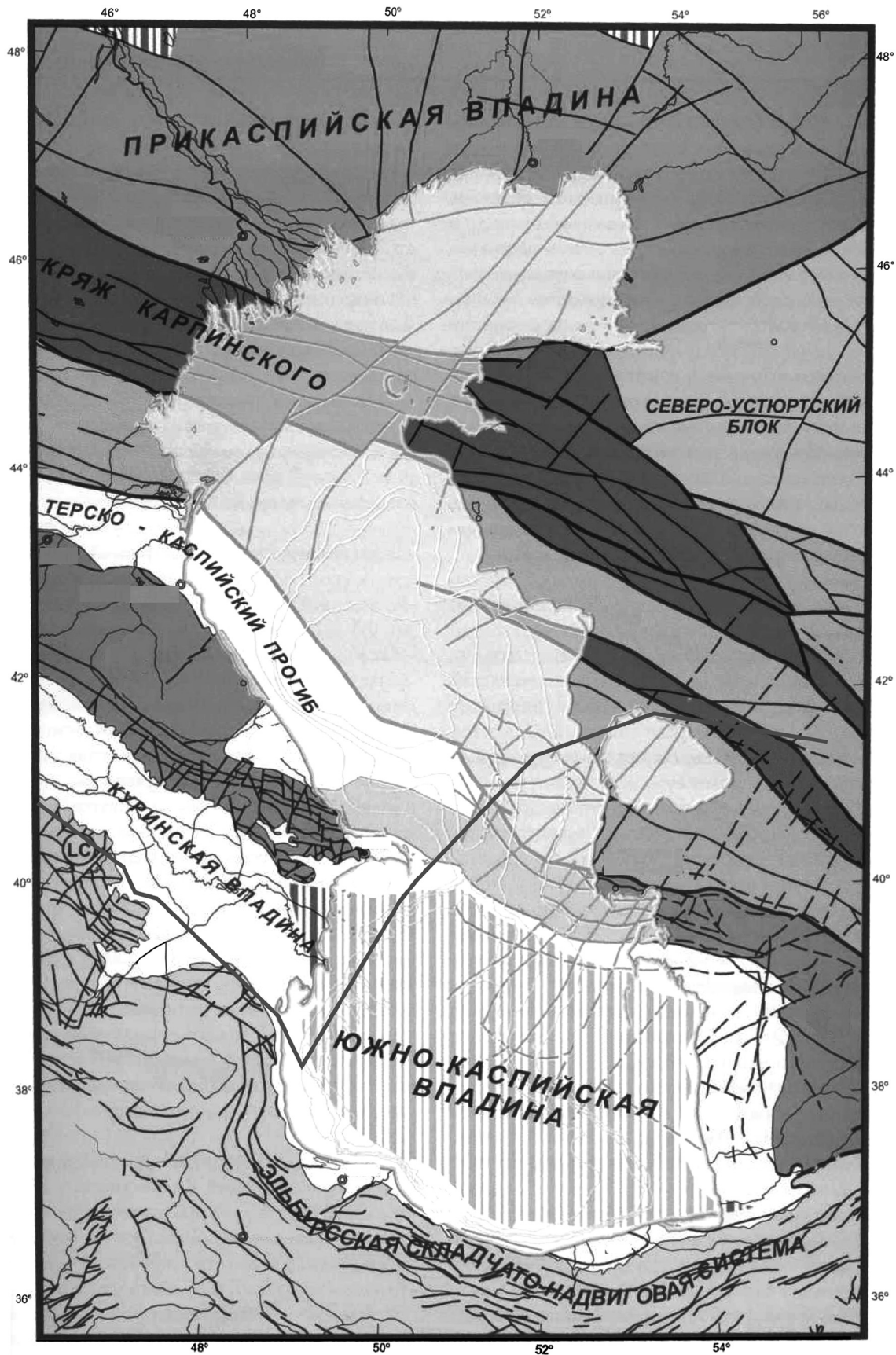


Рис. 1. Тектоническая карта Каспийского региона [Международная..., 2003] с линией геотраверса: 1–4 – фундамент платформенных областей: 1 – раннедокембрийский; 2 – байкальский; 3 – герцинский; 4 – раннекеммерийский; 5, 6 – альпийские складчато-покровные системы: 5 – Большой Кавказ и Копетдаг; 6 – Малый Кавказ, Талыш, Эльбурс; 7 – передовые прогибы и впадины; 8 – впадины с корой океанического типа; 9 – разрывные нарушения, соответствующие границам крупных структур; 10 – прочие важные разрывы

платформы, молодой (эпигерцинской) Скифско-Туранской плиты и Альпийско-Гималайского орогенного пояса [Буаев, 1998; Международная..., 2003; Глумов и др., 2004] (рис. 1). Резко различные по возрасту и геодинамике северное и южное побережья Каспийского моря также определенно влияют на сложные процессы, происходящие в глубинной среде этого региона.

Е.В. Артющков [Артющков, 2007] полагает, что образование Южно-Каспийской впадины произошло путем быстрого погружения древней континентальной коры вследствие перехода габбро в базальтовом слое в более плотные гранатовые гранулиты или эклогиты под действием мантийного диапира. Следствием этого может быть утонение консолидированной коры под мощным осадочным слоем, высокие значения скорости упругих волн ниже раздела Мохо.

Нами рассмотрено глубинное строение вдоль выбранного профиля ГСЗ, пересекающего следующие структурные подразделения исследуемого региона: структуры Кавказа (Куринская впадина), Южно-Каспийская впадина, Апшеронский порог, Средне-Куринская впадина, структуры Туранской плиты (Кара-Богаз-Гол и Туаркырская зона). Результаты интерпретации по двум центральным профилям, пересекающим Каспийское море, приведены в работе [Буаев, Пийп, 2004].

**Методика интерпретации сейсмических данных.** Представим результаты интерпретации сейсмических материалов по геотраверсу при помощи разработанного на геологическом факультете МГУ пакета компьютерных программ ГОДОГРАФ, а также построенный по данному геотраверсу разрез. Технология программы основана на применении модели сейсмической среды с однородной функцией скорости. Годографы сейсмических волн на изученном геотраверсе представлены на рис. 2.

Метод обращения годографов — метод однородных функций. Это метод автоматического компьютерного преобразования годографов первых волн в двумерное поле скорости в глубинном масштабе, которое содержит информацию о сейсмических границах раздела. Никакая предварительная информация о строении разреза при этом не используется. Геологическая интерпретация про-

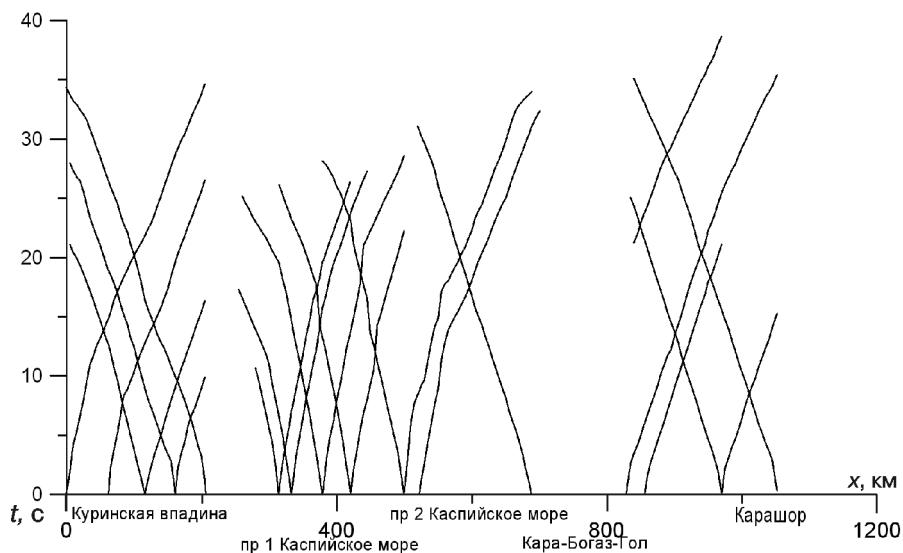


Рис. 2. Наблюдаемые годографы первых волн по геотраверсу. Приведены названия профилей, включенных в геотраверс

водится на готовом сейсмическом разрезе. Методика подробно описана в статьях [Пийп, 1991, Piiр, 2001]. Годографы изображены в виде временного разреза (разреза офсетов) на рис. 3.

Временной разрез свидетельствует о том, что годографы содержат информацию о строении Каспийской впадины и прилегающих территорий. Временной разрез использован для равномерной линейной интерполяции значений времен в отношении источников с шагом 25 км. Интерполированные в отношении источников годографы представлены на рис. 4. Эти годографы использованы для вычисления разреза.

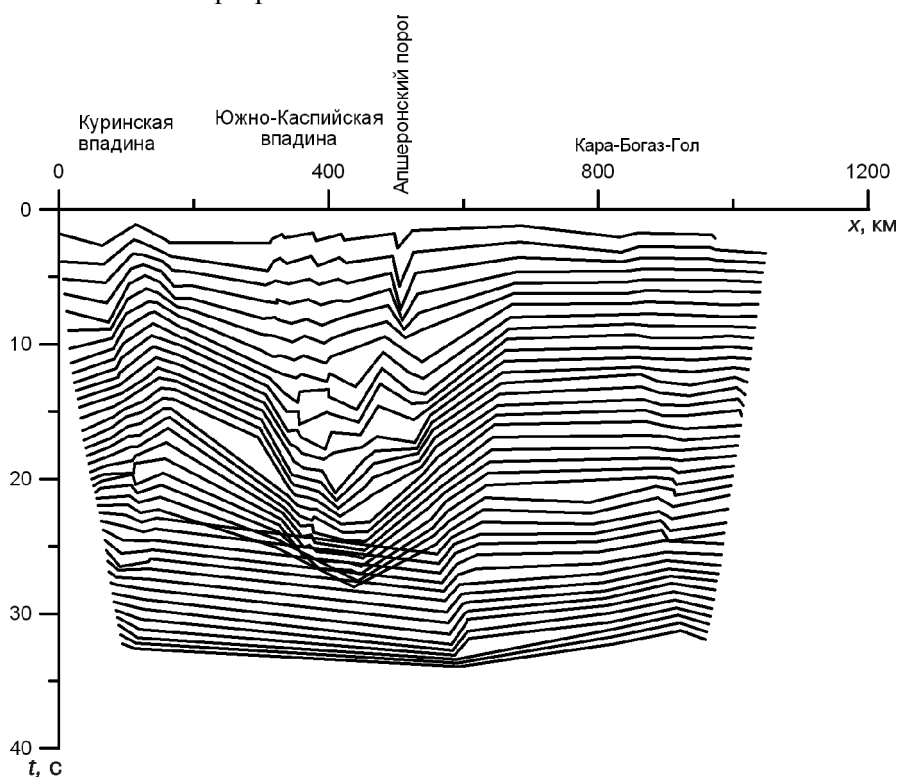


Рис. 3. Временной разрез (разрез офсетов) по геотраверсу

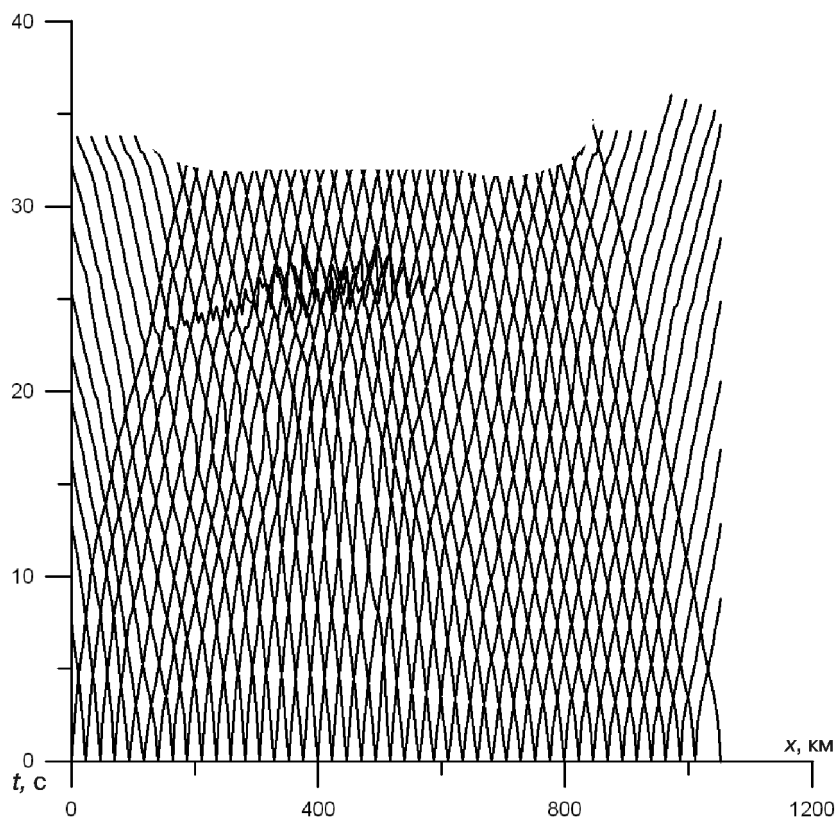


Рис. 4. Интерполированные годографы, использованные для вычисления разреза

**Результаты интерпретации.** Интерпретационный разрез ГСЗ представлен на рис. 5. Рассмотрим глубинное строение структур, пересеченных профилем ГСЗ с запада на восток. Южно- и Средне-Каспийская впадины представляют собой симметричный прогиб, наложенный на соседние тектонические области субширотного простирания — Туранскую плиту на востоке и структуры Кавказа на западе; прогиб ограничен глубинными разломами. На западе геотраверса Южно-Каспийская впадина граничит со структурами Куринской впадины Большого Кавказа.

**Куринская впадина,** расположенная в пределах Большого Кавказа, открывается в Южно-Каспийскую впадину, выполнена толщей олигоцен-четвертичных моласс, подстилаемых карбонатно-вулканогенными образованиями юры—эоцена [Международная..., 2003]. Мощность осадочного слоя, по данным ГСЗ (рис. 5), достигает 15 км. Предполагается, что гранитно-метаморфический фундамент, обнажающийся на западной и южной перифериях впадины и слагающий консолидированную двухслойную кору, прослеживается в основании прогиба. Здесь значения сейсмической скорости составляют около 7 км/с. Мощность коры не превышает 30 км. Консолидированная кора на границе с Южно-Каспийской впадиной образует складку, мощность осадочного слоя сокращается до 5 км, породы осадочного чехла дислоцированы, возможно, в результате сжатия со стороны Большого Кавказа. Судя по резкой складчатости, вполне вероятно, что Куринская впадина отделена от

Южно-Каспийской впадины глубинным разломом (рис. 5), образовавшимся во время формирования меридиональных структур Каспийского бассейна.

Граница Мохо в **Южно-Каспийской впадине** находится на глубине 40 км, она подстилается чрезвычайно высокоскоростной и высокоградиентной мантией, скорость в мантии возрастает с 8 до 9 км/с на глубине всего 10 км. В центре Южно-Каспийской впадины наблюдается утоненная консолидированная кора (скорость от 6 до 8 км/с) мощностью около 10 км. В западной части впадины мощность консолидированной коры увеличена примерно до 20 км, и она разделяется здесь на верхнюю и нижнюю кору. В центральной части впадины мощность осадочного слоя (скорость от 1,5 до 6 км/с) достигает 30 км. Со стороны Ленкорани и Средне-Каспийской впадины нижняя часть осадочного слоя перекрывается надвигами верхней коры.

**Южно-Каспийская впадина** выполнена мощной осадочной толщей, достигающей 30 км в центральной части. На плиоцен-четвертичные отложения приходится 10 км. Ниже распространены глинистые миоценовые и олигоценные отложения, с которыми связаны корни грязевых вулканов [Международная..., 2003; Хаин, 2005]. Толщина консолидированной коры уменьшена и составляет 10–20 км. Скорость сейсмических волн изменяется от 6,0 до 8,0 км/с, что характерно для океанического слоя. Скорость сейсмических волн ниже поверхности Мохо возрастает от 8,0 до 9,0 км/с (рис. 5).

По геологическим данным, интенсивное погружение Южно-Каспийской впадины началось с олигоцена с накоплением песчано-глинистых осадков мощностью свыше 10 км. В позднем миоцене в связи с Мессинским кризисом солёности (когда Средиземное море утратило связь с океаном) в Каспийском море резко понизился уровень. Вновь образовалось море в плиоцене (когда в Средиземное море через Гибралтар прорвались воды Атлантического океана), процесс прогибания резко ускорился, и в результате за 5 млн лет в отдельных районах моря накопилось еще более 10 км осадочных отложений [Грачев, 2000]. Некоторые ученые [Jackson et al., 2002; Allen et al., 2002; Родкин, 2003] пришли к выводу о поддвиге океанической литосферы Южно-Каспийской впадины под обрамляющие ее горные сооружения Эльбурса.

Проявление позднемиоценового—четвертичного вулканизма отмечено в работах [Jackson et al., 2002; Allen et al., 2002]. Структурные исследования в северной части Эльбурса свидетельствуют о том, что разломы на его границе с Южно-Каспийской впадиной компрессионные и, как полагают исследователи, свя-

заны с поддвигом Южного Каспия под Эльбурс. Данные фокальных механизмов очагов землетрясений указывают главным образом северо-восточную ориентацию осей сжатия [Уломов, 2003].

Граница Мохо под впадиной залегает на глубине около 35–40 км. По окраинам впадины она расположена на глубине 40–45 км. Впадина отличается значительным нарушением изостазии, отрицательные аномалии превышают –100 мГал. (Такие же аномалии наблюдаются в глубоководных желобах островных дуг Тихого океана.) Результаты магнитотеллурического зондирования показали, что в верхней мантии под корой существует область низкого удельного сопротивления [Грачев, 2000]. Верхняя мантия под впадиной — также область затухания поверхностных волн [Priestley, Sipar, 1993]. Поверхность астеносферы образует выступ под Южно-Каспийской впадиной на глубине 40–60 км, по периферии она погружена на 100–120 км [Геофизические..., 1996]. Эти данные, а также несколько повышенный тепловой поток (70–100 мВт/м<sup>2</sup>) могут свидетельствовать о наличии в верхней мантии под впадиной астеносферного диапира, насыщенного флюидами.

Образование Южно-Каспийской впадины произошло вследствие проявления двух глубинных процессов путем быстрого погружения при переходе габбро и других магматических пород коры в более плотные гранатовые гранулиты или эклогит [Артюшков, 2007]. Резкое ускорение погружения впадины в плиоцене и плейстоцене, как считает Е.В. Артюшков, было обусловлено инфильтрацией в кору активного флюида астеносферы, что катализовало фазовый переход габбро в эклогит. Действие глубинных флюидных потоков отмечено во многих осадочных впадинах [Родкин, 2003]. Южно-Каспийская впадина, вероятно, представляет собой поверхностное выражение мантийного потока — своеобразную горячую точку, где под действием астеносферных флюидов произошло

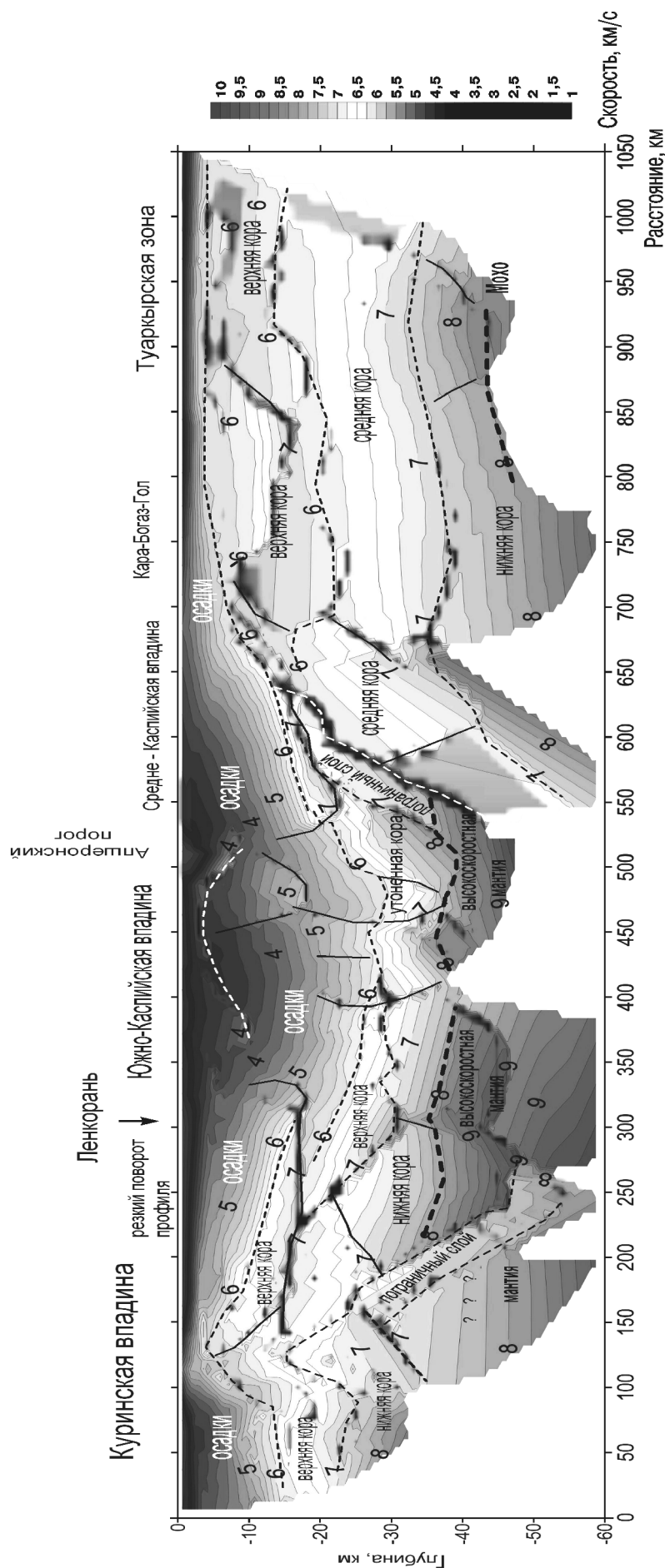


Рис. 5. Сейсмогеологический разрез по геотранверсу: 1 — нарушения; 2 — границы раздела; 3 — граница Мохо. Изолинии скорости проведены через 0,25 км/с

преобразование пород сиалической континентальной коры в высокометаморфизованные симатические породы, образовавшиеся в условиях высокого давления и температуры [Артюшков, 2007; Rodnikov, 2007].

**Апшеронский порог.** Южно-Каспийская впадина на севере отделена от Средне-Каспийской впадины Апшеронским порогом, соединяющим складчатые структуры Большого Кавказа и Копетдага. В пределах западной части Апшеронского порога установлены смятые в складки мезозойско-эоценовые породы, вероятно, являющиеся продолжением структур Большого Кавказа. К востоку они постепенно переходят в недеформированные одновозрастные слои складчатого чехла Западно-Туркменской низменности [Гарагаш и др., 1999].

Апшеронскому порогу соответствует узкая полоса очагов землетрясений [Уломов и др., 1999]. По данным ГСЗ [Баранова и др., 1990], установлен резкий перепад поверхности кристаллического фундамента в южном направлении от глубины 2–3 км до 20 км. По-видимому, здесь наиболее полно проявлена разломная тектоника. Вероятно, Апшеронский порог представляет собой зону глубинных разломов, которая, по мнению В.Е. Хаина [Хаин и др., 2007], возникла в конце миоцена. Толщина коры составляет около 40 км и подстилается высокоскоростными породами мантии (9 км/с).

**Средне-Каспийская впадина** на разрезе видна как асимметричная котловина с крутым западным бортом, где мощность осадочных пород достигает 20 км. Толщина коры около 40 км. Средне-Каспийская впадина на разрезе — это уступ или надвиг в верхней части общего разреза через Южно- и Средне-Каспийские впадины, а не отдельная независимая структура. Вообще разрез впадины со стороны Ленкорани и Средне-Каспийской впадины симметричен, имеет равную мощность осадочных образований (до 15 км). В самой верхней части Южно-Каспийской впадины в осадочном слое выделяется слой со скоростью на его подошве более 4 км/с, обращенный выпуклостью вверх, т.е. с инверсионной структурой. Встречные надвиги в верхней коре и выпуклая структура в верхах осадочного слоя, возможно, свидетельствуют о том, что погружение во впадине сопровождалось одновременным сжатием.

С запада и востока структуры Южно- и Средне-Каспийской впадин ограничены симметричными наклонными (около 15°) слоями с пониженной относительно вмещающих пород скоростью (от 7 до 8 км/с) и небольшой мощностью (5 км). Эти слои на разрезе названы пограничными слоями. Возможно, это шовные зоны, так как Южно- и Средне-Каспийская впадины, вероятно, образовались позже прилегающих структур.

Фундамент разбит серией разломов. Предполагается [Исмаилов и др., 2003], что докембрийский кристаллический фундамент Туранской плиты простирается и под Средне-Каспийской впадиной

и перекрыт палеозойскими метаморфическими породами. Впадина выполнена юрско-четвертичными отложениями, мощность которых, по данным, полученным при новой интерпретации сейсмических профилей, достигает 20 км.

На востоке Каспийская впадина граничит со структурами **Туранской плиты**. На разрезе Туранская плита имеет обычное строение. Ее разрез характеризуется трехслойной консолидированной корой. Граница Мохо (уровень 8 км/с) находится на глубине около 50 км. Мощность осадочных отложений 2–3 км. Верхняя кора очень низкоскоростная (5,7–6,2 км/с) и слабоградиентная, имеет значительную мощность (15–20 км). Ниже выделена средняя кора, в которой скорость изменяется по вертикали от 6 до 7,2 км/с при мощности около 20 км. Градиент постоянный и низкий.

Нижняя кора Туранской плиты отличается меньшей мощностью (10–12 км) и большим градиентом скорости. При приближении к Каспийской впадине верхняя кора Туранской плиты выклинивается, а средняя и нижняя кора погружаются под структуры Каспийской впадины под углом около 15°, при этом они претерпевают изменения: средняя кора становится однородной со скоростью около 7 км/с, а мощность нижней уменьшается. Возможно, эти преобразования произошли в процессе накопления осадков в Каспийской впадине.

**Заключение.** На основе новой интерпретации сейсмических материалов построен глубинный разрез литосферы, пересекающий следующие структурные подразделения Каспийского региона: структуры Кавказа (Куринская впадина), Южно-Каспийскую впадину, Апшеронский порог, Средне-Куринскую впадину, структуры Туранской плиты (Кара-Богаз-Гол и Туаркырская зона).

Установлено, что Южно- и Средне-Каспийская впадины вдоль профиля представляют собой симметричные прогибы, наложенные на соседние тектонические области субширотного простираения — Туранскую плиту на востоке и структуры Кавказа на западе, ограниченные глубинными разломами.

Получены дополнительные данные о глубинном строении осадочных впадин. В частности, мощность осадочных отложений, по данным сейсмических профилей, составляет 40 км в Южно- и 20 км в Средне-Каспийской впадине.

Южно-Каспийская впадина, вероятно, представляет собой поверхностное выражение мантийного потока, это своеобразная горячая точка, где под действием астеносферных флюидов произошло преобразование пород сиалической континентальной коры в высокометаморфизованные симатические породы, сформировавшиеся в условиях высоких давления и температуры, что подтверждается большими значениями мантийной скорости под границей Мохо.

Полученный разрез в целом подтверждает концепцию Е.В. Артюшкова о строении и развитии Южно-Каспийской впадины.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Аксенович Г.И., Гальперин Е.И., Аронов Л.Е.* и др. Глубинное сейсмическое зондирование в центральной части Каспийского моря. М.: Наука, 1962.
- Артюшков Е.В.* Образование сверхглубокой впадины в Южном Каспии вследствие фазовых переходов в континентальной коре // Геология и геофизика. 2007. Т. 48, № 12. С. 1289–306.
- Баранова Е.П., Косминская И.П., Павленкова Н.И.* Результаты переинтерпретации материалов ГСЗ по южному Каспию // Геофизический журн. 1990. Т. 12, № 5. С. 60–67.
- Буваев Н.А., Пийп В.Б.* Глубинное строение Южно-Каспийской впадины по сейсмическим данным // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2004. № 3. С. 60–64.
- Бутаев А.М.* Каспий: загадки уровня. Махачкала, 1998. 70 с.
- Гальперин Е.И., Косминская И.П.* Особенности методики глубинного сейсмического зондирования на море // Изв. АН СССР. Сер. геофиз. 1958. № 7. С. 137–146.
- Гарааш И.А., Хортов А.В., Шлезингер А.Е.* Эволюция каспийского региона и обоснование физических механизмов протекающих геологических процессов // Вестн. ОГГН РАН. 1999. № 4 (10). С. 38–54.
- Геофизические параметры литосферы южного сектора Альпийского орогена / Под ред. Б. С. Вольвовского, В.И. Старостенко. Киев: Наукова думка, 1996. 215 с.
- Глумов И.Ф., Маливицкий Я.П., Новиков А.А., Сенин Б.В.* Региональная геология и нефтегазоносность Каспийского моря. М.: Недра, 2004. 344 с.
- Грачев А.Ф.* Южно-Каспийская впадина // Новейшая тектоника, геодинамика и сейсмичность Северной Евразии. М.: Пробел, 2000. С. 217–224.
- Егоркин А.В., Матушкин Б.А.* Строение земной коры на Кавказе и в Средней Азии по данным геофизических исследований // Изв. АН СССР. Сер. геол. 1968. № 6. С. 80–91.
- Исмаилов Д. Ф., Козлов В.Н., Мартиросян В.Н., Терехов А.А.* Строение и особенности формирования плитного чехла в пределах Среднего Каспия (по материалам сейсмических исследований) // Геотектоника. 2003. № 4. С. 51–63.
- Краснопевцева Г.В.* Глубинное строение Кавказского сейсмоактивного региона. М.: Наука, 1984.
- Международная тектоническая карта Каспийского моря и его обрамления / Под ред. В.Е. Хаина, Н.А. Богданова. М.: Институт литосферы РАН, 2003.
- Пийп В.Б.* Локальная реконструкция сейсмического разреза по данным преломленных волн на основе однородных функций // Физика Земли. 1991. № 10. С. 24–32.
- Родкин М.В.* Флюидогеодинамическая модель литосферы Южного Каспия // Геотектоника. 2003. № 1. С. 43–53.
- Уломов В.И.* Объемная модель динамики литосферы, структуры сейсмичности и изменений уровня Каспийского моря // Физика Земли. 2003. № 5. С. 5–17.
- Уломов В.И., Полякова Т.П., Медведева Н.С.* Динамика сейсмичности бассейна Каспийского моря // Физика Земли. 1999. № 12. С. 76–82.
- Хаин В.Е.* Проблема происхождения и возраста Южно-Каспийской впадины и ее возможные решения // Геотектоника. 2005. № 1. С. 40–44.
- Хаин В.Е., Гаджиев А.Н., Кенгерли Т.Н.* О тектонической природе Апшеронского порога Каспийского моря // Докл. РАН. 2007. Т. 414, № 4. С. 523–527.
- Хаин В.Е., Попков В.И., Юдин В.В.* Палеогеодинамика южного обрамления Восточно-Европейского кратона // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2010. № 2. С. 3–9.
- Якобсон А.Н.* Скорость сейсмической поперечной волны в литосфере Южного Каспия // Докл. РАН. 1997. Т. 353, № 2. С. 258–260.
- Allen M.B., Jones S., Ismail-Zadeh A.* et al. Onset of subduction as the cause of rapid Pliocene-Quaternary subsidence in the South Caspian basin // Geology. 2002. Vol. 30, N 9. P. 775–778.
- Jackson J., Priesley K., Allen M., Berberian M.* Active tectonics of the South Caspian Basin // Geoph. J. Int. 2002. Vol. 148. P. 214–245.
- Piip V.B.* 2D inversion of refraction traveltimes curves using homogeneous functions // Geophys. prosp. 2001. Vol. 49. P. 461–482.
- Priestley K., Cipar J.J.* Central Siberian, upper mantle structure and the structure of the Caspian basin // Phillips Laboratory Environmental Res. Pap. 1993. N 1125. P. 86–92.
- Rodnikov A.G.* Comparison of the deep structure and evolution of sedimentary basins in the Pacific Mobil Belt and Tethys (Sea of Okhotsk and Caspian Sea) // Abstr. of the Second Intern. Conf. on the Geology of Tethys. Egypt: Cairo University, 2007. P. 89.