

# **МОДЕЛЬ ГЛУБИННОГО СТРОЕНИЯ ПРИКАСПИЙСКОЙ ВПАДИНЫ ПО ДАНЫМ РЕГИОНАЛЬНЫХ СЕЙСМИЧЕСКИХ НАБЛЮДЕНИЙ МОГТ – ГСЗ И МЕСТОРОЖДЕНИЯ УГЛЕВОДОРОДОВ**

## **Часть 1**

А.М. Кузин

Институт проблем нефти и газа РАН

e-mail: amkouzin@ya.ru

## **Введение**

В настоящее время накоплен огромный геолого-геофизический материал, позволяющий с новых позиций подойти к объяснению тектонического строения земной коры и закономерностей размещения месторождений углеводородов, а также к исследованию нефтегазоносности «безграничных» впадин [Вольвовский Б., Вольвовский И., 1988]. Абсолютное большинство супергигантских месторождений нефти и газа приурочены к седиментационным бассейнам с корой «безграничного» типа. Средняя мощность континентальной коры составляет  $40,5 \pm 1,6$  км, кристаллической части –  $36 \pm 1,7$  км [Беляевский, 1981], осадочного чехла – 3,5–4 км. Особое место в геологическом строении земной коры континентов занимают глубочайшие депрессии, на которые приходится около 8% поверхности Земли [Вольвовский Б., Вольвовский И., 1988].

Прикаспийская впадина выделяется особой картиной расположения месторождений углеводородов. Все крупнейшие месторождения расположены в обрамлении впадины, независимо от геологического строения и истории развития вмещающих месторождения структурно-породных комплексов. В восьмидесятые и в начале девяностых годов XX века в нефтегазовой геологии считалось, что крупные месторождения углеводородов могут находиться в центральной части впадины и, в частности, залегать только на больших глубинах и локальных поднятиях [Аксенов и др., 1985; Шарданов, 1984]. Очевидно, что такие представления были основаны на известном факте наличия значительной мощности (около 20–25 км) осадочного чехла в центральной части впадины. Действительно, большая мощность осадочного чехла может рассматриваться как благоприятный фактор для нефтегазонакопления и экранирования флюидных и тепловых потоков. В то же время убедительного объяснения факторов размещения всех крупных месторождений в бортовых частях впадины в литературе нет.

### Сейсмическая модель Прикаспийской впадины и нефтегазоносность

По данным интерпретации профилей ГСЗ «Челкар-Волгоград», «Элиста – Бузулук» и др., а также профилей КМПВ, Прикаспийская впадина характеризуется следующей сейсмической моделью. Мощность осадочного чехла впадины ( $V_p = 3,0\text{--}3,5$  км/с) составляет более 20 км. Осадочная толща представлена сложной соляной тектоникой: переслаиванием высокоскоростных слоев известняков и солей с низкоскоростными терригенными породами. Верхний скоростной этаж консолидированной коры с  $V_p = 5,8\text{--}6,2$  км/с выклинивается к центру впадины (на рис. 1, см. приложение, – пикет 800, на рис. 2 – пикет 100). Породы среднего этажа ( $V_p = 6,4\text{--}6,5$  км/с) развиты не повсеместно, в отдельных останцах их мощность не превышает 5 км. Породы нижнего этажа ( $V_p = 6,7\text{--}7,0$  км/с) образуют мощный слой в 15–20 км, поверхность которого поднимается к центру впадины [Егоркин, Разникова, 1980].

Картина гравитационного поля Прикаспийской впадины резко отличается от характера гравитационного поля окружающих ее тектонических структур. На общем положительном фоне поля силы тяжести Восточно-Европейской платформы аномалии в Прикаспийской впадине почти повсеместно отрицательные, лишь на отдельных локальных участках их значения близки к нулю. В районе Хобдинского и Аралсорского выступов положительные аномалии силы имеют интенсивность в несколько десятков миллигал. По окраинам впадины выделяются сравнительно глубокие гравитационные минимумы интенсивностью до 60–100 мГл. Общее отрицательное гравитационное поле обусловлено мощной толщей осадочных пород, влияние которой в районах Хобдинского и Аралсорского максимумов компенсируется подъемом поверхности консолидированной коры [Вольвовский Б., Вольвовский И., 1988]. Общая мощность коры в наиболее прогнутых участках впадины, в районах Аралсорского и Хобдинского максимумов силы тяжести, сокращена до 30–32 км, по сравнению со средней глубиной в 40 км для прибортовых зон (рис. 3, а, б). Область между этими максимумами лежит почти на одной линии с Каспийским морем, и можно предполагать, что она служит областью активизации флюидотектонических процессов.

В пределах этих максимумов выделяются две резкие мантийные границы. К верхней границе относится преломляющий горизонт с  $V_p = 8,2$  км/с. Нижний горизонт под Аралсорским максимумом очерчивает линзообразное тело в верхах мантии. Кроме того, в

сторону максимума увеличивается  $V_p$  вдоль поверхности Мохоровичича: от 8,0–8,2 км/с на бортах до 8,4 км/с в районе максимума [Егоркин, Разникова, 1980].

В самой верхней части мантии под «безграничной» частью впадины (20 км ниже границы Мохоровичича) фиксируется тонкий слой пониженной скорости. Слой мантии, расположенный между кровлей этого слоя и границей Мохоровичича, характеризуется резкими колебаниями скорости распространения сейсмических волн (от 8,2 до 8,7 км/с), причем локальные зоны их максимальных значений совпадают в плане с Аралсорским и Хобдинским максимумами силы тяжести. Глубже этого слоя выделено несколько низкоскоростных и высокоскоростных горизонтов. Все они в первом приближении повторяют рельеф границы Мохоровичича. Скоростная неоднородность вместе с переходом «кора – мантия» и резким утонением коры свидетельствуют об их тесной взаимосвязи в разрезе литосферы [Вольвовский Б., Вольвовский И., 1988]. В свою очередь, это указывает и на возможную взаимосвязь с процессами миграции флюидов.

Согласно общей классификации сейсмических моделей земной коры и верхней мантии осадочных бассейнов [Юдахин и др., 2003], специфическими чертами Прикаспийской впадины (модель I, с. 67) являются аномальная мощность осадочных отложений в центральной части впадины, с тонкой консолидированной корой резкий скачок скорости продольных волн ( $V_p$ ) при переходе от коры к мантии. В центральной части впадины в верхней мантии в интервале глубин 40–60 км залегает высокоскоростное тело. Оно прослеживается под Астраханским сводом, в других бортовых частях впадины оно отсутствует.

По поверхности архейско-протерозойского фундамента (преломляющая граница с  $V_T = 6,2\text{--}7,2$  км/с) Прикаспийская впадина резко асимметрична: западный и северный борта крутые, а восточный и южный сравнительно пологие [Аксенов и др., 1985]. Различие глубинного строения между восточным и западным бортами впадины уверенно прослеживается в нижние горизонты коры, а также коррелируется с распределением отношения скорости продольной волны к поперечной ( $V_p/V_s$ ). В подошве коры под Астраханским сводом (рис. 4) значения  $V_p/V_s$  относительно повышенные, под месторождениями Оренбургским (рис. 5), Карачаганак (рис. 6), Жонажол (рис. 7) и др. значения  $V_p/V_s$  относительно пониженные.

Существенное различие распределений скоростей наблюдается также в верхней мантии непосредственно под месторождениями углеводородов. Так, под Астраханским

месторождением  $V_p = 8,10$  км/с,  $V_p/V_s = 1,73$ ; под месторождениями Жонажол и Кенкияк  $V_p = 8,00$  км/с,  $V_p/V_s = 1,68$  [Булин, Егоркин, 2000]. Следовательно, различие распределений  $V_p$  и  $V_p/V_s$  в разрезах южной и восточной частей впадины прослеживается от верхней части коры и до верхней мантии включительно. Это различие может иметь взаимосвязь с закономерностью размещения углеводородных скоплений: на северном и юго-западном бортах впадины преобладают газоконденсатные залежи, на восточном и юго-восточном – нефтяные и газонефтяные [Аксенов и др., 1985].

Прикаспийская впадина, как и многие другие нефтегазоносные бассейны, является сейсмически активной территорией. 26 апреля 2008 г. в Западном Казахстане, в 80 км к юго-востоку от города Уральска, с восточной стороны соленого озера Шалкар, произошло землетрясение интенсивностью 7 баллов. Летом того же года там было зафиксировано повторное землетрясение. Эпицентр Шалкарского землетрясения расположен в северной части Прикаспийской впадины, где осадочный чехол достигает мощности 15–18 км. Исторические данные свидетельствуют о том, что более слабые землетрясения наблюдались в данном районе и ранее, в том числе и до начала добычи углеводородов на ближайшем Карачаганакском нефтегазоконденсатном месторождении, расположенном в 140 км к северо-востоку от озера Шалкар. Интересно отметить, что уровень озера Шалкар повышается и понижается одновременно с уровнем Каспийского моря. Это говорит о связи подземных вод в зонах разрывных нарушений, соединяющих акватории озера и моря [Михайлова, Великанов, 2010], а также о возможном участии таких вод в процессах нефтегазообразования.

Горизонтальные и наклонные разрывные нарушения закартированы сейсморазведкой МОГТ в осадочном чехле [Каринский и др., 1985] и в породах консолидированной коры (рис. 4, а, б и в), которые могут служить каналами фильтрации воды. Проникновение морской воды на 150 км вглубь островов зафиксировано в акватории Тихого океана [Виноградов, 2002].

При переинтерпретации данных многоволновых ГСЗ было установлено, что месторождения Астраханское (профиль «Краснодар – Эмба», рис. 4, б), Оренбургское, Нагумановское, Шуваловское, Таращанское, Верхнеуральское (профиль «Эмба – Оренбург», рис. 5), Карачаганак (профиль «Манаш – Карачаганак», рис. 6, б), Жонажол, Кенкияк, Алибек-Мола (профиль «Колпашево – Эмба», рис. 7) залегают на жестких неоднородностях, характеризующихся пониженными значениями отношения скорости

продольных волн к скорости поперечных волн ( $V_p/V_s$ ) [Кузин, 1994, 2016]. Причем эти неоднородности могут находиться в фундаменте (Астраханское месторождение), в фундаменте и осадочном чехле (Оренбургское, Нагумановское и др.), в осадочном чехле (Жонажол и др.).

Как известно, наибольшее влияние на параметр  $V_p/V_s$  оказывает содержание флюида. Повышенное содержание газовой фазы в породе (при сохранении жестких структурных связей) находит отражение в низких значениях  $V_p/V_s$ , что в отдельных случаях может приводить к отрицательным эффективным значениям коэффициента Пуассона, например для рифов и зон трещиноватости [Кузин и др., 2004].

Г.В. Краснопевцевой была выполнена переинтерпретация по профилям ГСЗ «Краснодар – Эмба», «Манаш – Карачаганак», «Замьяны – Вязовка» и «Волгоград – Нахичевань» по нестандартной методике, которая заключалась в построении разрезов отклонений времен ( $\Delta t$ ) прихода первых коровых  $P$ -волн по отношению к среднестатистическому годографу. Преимуществами этого способа является то, что на модель среды не накладывается никаких условий, не нужно учитывать строение верхней части разреза. Значения  $\Delta t$  несут объективную информацию о распределении истинной скорости в разрезе.

На схеме объемного распределения  $\Delta t$  для района Астраханского месторождения (рис. 8) отмечается присутствие узкой субвертикальной низкоскоростной зоны (положительные значения  $\Delta t$ ). На разрезах  $\Delta t$  профилей «Замьяны – Вязовка» и «Краснодар – Эмба», построенных в последующие годы уже с большей детальностью (рис. 9 и 10), эта зона разделяет на две половины крупные высокоскоростные неоднородности (отрицательные значения  $\Delta t$ ), залегающие над кристаллическим фундаментом.

По сравнению с разрезом  $V_p/V_s$  (рис. 4), разрез параметра  $\Delta t$  (рис. 10) позволяет выделить особенности распределения скорости, в частности низкоскоростную зону переменной мощности с крутым падением на юго-запад.

В то же время между разрезом  $V_p/V_s$  и тектоническим строением наблюдается очень хорошая согласованность. Кряж Карпинского выделяется низкими значениями  $V_p/V_s$ , Каракульско-Смушковская зона дислокаций – повышенными значениями  $V_p/V_s$ , Астраханский свод – пониженными  $V_p/V_s$ , Северо-Каспийская зона поднятий – низкими значениями  $V_p/V_s$ . Следовательно, параметр  $V_p/V_s$  позволяет не только выделить

тектонические структуры в разрезе, но и идентифицировать их по упругим свойствам (рис. 4, а, б).

Лучшим совпадением распределений параметров  $Vp/Vs$  и  $\Delta t$  на разрезах (по сравнению с Астраханским сводом) отличается их картина для месторождения Карачаганак (рис. 6, б и 11). Месторождение залегает на жесткой неоднородности, представленной рифогенной постройкой, характеризующейся низкими значениями  $Vp/Vs$ , которым на разрезе  $\Delta t$  соответствует область отрицательных значений этого параметра. Возможно, различие в характере картин распределения  $\Delta t$  и  $Vp/Vs$  на разрезах для месторождений Астраханского и Карачаганак объясняется тем, что при данном способе расчета временных аномалий  $\Delta t$  [Кузин и др., 2004] лучше выделяются вертикальные структуры. В то же время есть и сходство в их характере: многие отражающие границы (наклонные разрывные нарушения) лежат вдоль контура пониженных значений  $Vp/Vs$ .

Разрез по профилю ГСЗ «Эмба – Оренбург» интересен тем, что, помимо общей закономерности – принадлежности Оренбургского, Нагумановского, Шуваловского и других месторождений углеводородов к неоднородностям с низкими значениями  $Vp/Vs$ , – на нем четко прослеживается глубинное происхождение этой неоднородности (рис. 5). Нижняя кромка этой неоднородности лежит на глубине 15 км, что примерно в два раза превышает глубину кристаллического фундамента. Весьма вероятно, что низкие значения  $Vp/Vs$  в осадочном чехле в породах фундамента вызваны общей причиной – повышенным содержанием газа вследствие процесса глубинной дегазации.

Положение в разрезе месторождений Жонажол, Кенкияк, Алибек-Мола на профиле «Колпашево – Эмба» (рис. 7) подобно таковому по профилю ГСЗ «Манаш – Карачаганак». Как и месторождение Карачаганак, эта группа месторождений залегает на неоднородности с низкими значениями  $Vp/Vs$ , расположенной в осадочном чехле. Месторождения находятся в карбонатных отложениях шельфового и рифогенного типов.

В качестве еще одной общей закономерности распределения упругих неоднородностей под месторождениями углеводородов необходимо отметить то, что области с низкими значениями  $Vp/Vs$  граничат с областями высоких значений  $Vp/Vs$ . Причем области повышенных значений  $Vp/Vs$  располагаются, как и области низких значений  $Vp/Vs$ , в осадочном чехле и фундаменте. Это должно являться аргументом в пользу глубинного происхождения структур с участием флюидов. Симбиоз повышенных

и пониженных значений  $V_p/V_s$ , возможно, отображает общую закономерность фазовой локализации флюидных потоков на границе разнотипных сред.

Последними из профилей многоволнового ГСЗ, выполненных в Прикаспийской впадине, были широтный профиль «Яшкуль – Медногорск» и меридиональный «Пугачев – Бейнау» [Проект «ПРИКАСПИЙ – 1993..., 2013]. Профиль «Яшкуль – Медногорск» начинается на вале Карпинского, пересекает в северо-восточном направлении территорию Казахстана и заканчивается в Уральской складчатой области (рис. 12, схема). В распределении значений  $V_p/V_s$  вдоль профиля отмечается тенденция их понижения с запада на восток (рис. 13). Наиболее отчетливо она просматривается вдоль границы Мохоровичича. Аналогичная тенденция изменения  $V_p/V_s$  с севера на юг наблюдается по профилю «Пугачев – Бейнау» для средней и верхней частей земной коры (рис. 14). Распределение  $V_p/V_s$  на разрезах сходно с картиной распределения, полученной по фрагменту геотраверса «Озеро Тенгиз – море Лаптевых» в Западной Сибири (рис. 15). Изменение  $V_p/V_s$  в консолидированной коре вдоль профиля отражает смену преимущественно нефтяных месторождений (относительно повышенные значения) на газовые месторождения.

Интерпретация распределения  $V_p/V_s$  как смена фазового состава флюида была выполнена на основе всестороннего анализа поведения параметра  $V_p/V_s$  в горных породах: при различных давлениях и температурах, при разном содержании кремнезема, а также при содержании флюида в жидкой и газообразной фазах [Кузин, 2011]. Выяснилось, что диапазон значений  $V_p/V_s$  для сухих и водонасыщенных образцов лежит в интервале от 0 до 10%  $V_p/V_s$ , тогда как даже по теоретически рассчитанной зависимости разность значений  $V_p/V_s$  для основных и кислых пород составляет не более 6% [Алейников и др., 1981]. Следовательно, водонасыщенность верхней и средней частей консолидированной коры (глубины, на которых могут существовать открытые трещины) может оказывать более сильное, чем считалось ранее, влияние на параметр  $V_p/V_s$ . Действительно, распределение  $V_p/V_s$  на глубинных разрезах трудно объяснить содержанием кремнезема (рис. 5 и 6). Уменьшение значений  $V_p/V_s$  вдоль профиля более убедительно объясняется сменой преимущественно фазового состава флюида с водного на газовый.

Ранее было установлено, что «существует тесная корреляция между возрастом платформ (рис. 16, а) и типом зависимости  $K(H) = V_{cp}/V_{cs}$  от мощности кристаллической коры ( $H$ ): значения  $V_{cp}/V_{cs}$  ( $V_{cp}$  и  $V_{cs}$  – средние значения  $V_p$  и  $V_s$ ) в земной коре

докембрийских платформ увеличиваются с ростом  $H$  (зависимости 1–3). Для эпипалеозойских плит (зависимости 4–6), герцинских и каледонских орогенных областей (зависимости 7–8) отмечается обратное соотношение, но при равных значениях  $H$  отношения  $V_{cp}/V_{cs}$  существенно различны» [Егоркин, 1996].

Графики  $K(H)$  интерпретировались в работе [Егоркин, 1996] как зависимости изменения содержания  $\text{SiO}_2$  в земной коре от глубины: тем больше содержание  $\text{SiO}_2$ , чем меньше  $V_p/V_s$ . Поскольку графики 1–3 получены для консолидированной коры докембрийских платформ, а графики 4–8 – для фанерозойских структур, сделан вывод о том, что для древних платформ свойственно уменьшение содержания  $\text{SiO}_2$  с увеличением мощности коры [Егоркин, 1996]. Графики  $K(H)$  для фанерозойских (1–2) и древних (4–5–7) платформ почти параллельны между собой. Причем «параллельность» для фанерозойских плит выражена более четко, и, следовательно, между ними большее подобие  $K(H)$ , по сравнению с докембрийскими платформами. Обратный угол наклона графиков 1–3 и 4–8 свидетельствует о качественном преобразовании вещества нижней части земной коры.

На древних платформах меньший угол наклона графиков, от низких значений  $V_{cp}/V_{cs}$  к относительно повышенным значениям, может интерпретироваться как результат завершившейся аккреции земной коры, ее гранитизации. Чем древнее земная кора, тем больше в ней должны быть относительные потери наиболее подвижных химических соединений и вынос их в верхнюю часть коры. Это объясняет различие распределения  $K(H)$  в докембрийских и фанерозойских платформах. Различие по содержанию кремнезема молодых и древних платформ еще ранее обосновывалось в работе [Ронов, 1980] как следствие процесса приращения континентальной коры за счет океанической. Однако зависимость  $V_p/V_s$  от  $\text{SiO}_2$  соблюдается только для кварцсодержащих пород ( $V_p < 7$  км/с). При  $V_p > 7$  км/с (для безкварцевых пород) зависимость  $V_p/V_s$  определяется содержанием окислов железа и магния и имеет обратный наклон по отношению к зависимости  $V_p/V_s$  от  $\text{SiO}_2$  [Детальн. исслед..., 1993]. Поэтому для подошвы коры наклон графиков  $V_p/V_s$  должен был измениться.

Графики  $K(H)$  для архейских и фанерозойских платформ отражают резкую смену процессов в образовании континентальной коры, без каких-либо отличительных структурных и петрологических особенностей. Единственным фактором, обеспечивающим такие условия смены зависимости, может быть изменение флюидного

режима, его фазового состава. Графики  $Vp/Vs$  показывают общую тенденцию преобразования консолидированной коры в сторону увеличения содержания воды (рис. 16, б), что согласуется с известными моделями эволюции коры [Макаренко и др.]. В целом такое распределение  $Vp/Vs$  (рис. 16) свидетельствует об увеличении газонасыщенности (интенсивности дегазации) разреза земной коры по мере перехода от более древних структур к более молодым [Кузин, 2011]. Распределение  $Vp/Vs$  на разрезах (рис. 17) можно рассматривать как совокупность двух взаимосвязанных процессов фильтрации и инфильтрации воды в земной коре.

Прикаспийская впадина является структурой с фанерозойским типом земной коры, образовавшейся в процессе плавления коры докембрийского типа [Егоркин, 1996]. Кровля астеносферы (высокопроводящего слоя, по данным МТЗ) во внутренней зоне Прикаспийской впадины расположена на глубинах 90–130 км, что более чем на 100 км выше ее залегания в смежных районах. Относительно высокое положение проводящего слоя указывает на большую разогретость мантии под впадиной. Это находит свое отражение на карте распределения теплового потока. Под впадиной он составляет 60–70 мВт/м<sup>2</sup>, что на 20% выше средних значений для Восточно-Европейской платформы (40–50 мВт/м<sup>2</sup>). Абсолютные температуры на глубине 10 км изменяются от 100 до 600 °С [Чермак, 1982].

Результаты геотермических исследований, выполненных в Прикаспийской впадине (рис. 18), коррелируются с картиной распределения  $Vp/Vs$  на разрезах по профилям «Яшкуль – Медногорск» и «Пугачев – Бейнау». Просматривается явное повышение температуры на глубинных срезах с северо-востока на юго-запад (рис. 18, Б). В восточной части впадины на границе с Мугоджарами температуры на глубине 2 и 3 км составляют соответственно 40–45 и 60–65 °С, в районе Южной Эмбы и Мангышлака на тех же глубинах 50–60 и 70–75 °С. Это согласуется с выводом о снижении теплового потока в восточной части Прикаспийской впадины. Температуры в земной коре до глубины 50 км демонстрируют ту же тенденцию, что и в интервале бурения скважин: они плавно увеличиваются в юго-западном направлении (рис. 18, В). В Центрально-Прикаспийской депрессии, в районе Южной Эмбы, Мертвого Култука и Северного Мангышлака (восточная часть впадины), а также Астраханского и Бузулукского сводовых поднятий, на границе Мохоровичича температура составляет 400 °С (рис. 19). При этом достаточно четко видна взаимосвязь между температурными куполами и зонами промышленной

нефтегазоносности [Хуторской и др., 2013]. Однако в региональном плане также четко просматривается меридиональная зональность вдоль Урала.

Понижение температуры в северо-восточном направлении коррелируется с уменьшением значений  $Vp/Vs$ . Следовательно, совпадение градиента изменения значений  $Vp/Vs$  с градиентом повышения температуры подтверждает флюидную природу распределения повышенных значений  $Vp/Vs$ .

Температурная зональность в Прикаспийской впадине может быть соотнесена с закономерностью размещения месторождений углеводородов. На северном и юго-западном бортах впадины преобладают газоконденсатные залежи, на восточном и юго-восточном – нефтяные и газонефтяные.

Присутствие зон инфильтрации в Прикаспийской впадине было установлено в различных ее частях [Сыдыков, Мухамежданов, 1985; Сардаров, 1989]. В краевых обрамлениях впадины на участках локальных поднятий в зонах дробления разрывных нарушений воды имеют преимущественно инфильтрационный генезис. Инфильтрация приводит к их смешению с глубокими пластовыми водами и внедрению в верхние горизонты, а также в локальные структуры, содержащие углеводороды [Сыдыков, Мухамежданов, 1985]. Возможные механизмы инфильтрации в осадочном чехле и консолидированной коре перечислены в работах [Абукова, 2007; Кузин, 2015].

Исследование теплового потока в зоне разлома проводилось по данным измерения температуры в мелких скважинах [Сардаров, 1989]. В скважине глубокого бурения был получен мощный выход термальных вод. Разлом проявляется цепочкой геотермических аномалий разного знака в соответствии с конвективной моделью (рис. 20).

Тектонические блоки, содержащие залежи углеводородов, за счет архимедовых сил замыкаются относительно массопереноса; конвекция приводит к изометричной мозаике значений теплового потока, которого нет в блоках, не содержащих больших количеств застойного флюида [Сардаров, 1989].

### **Заключение**

Все крупные месторождения Прикаспийской впадины расположены в ее обрамлении, независимо от геологического строения и истории развития вмещающих месторождения структурно-породных комплексов. Все месторождения контролируются залегающими под ними механически жесткими неоднородностями. Распределение значений параметра  $Vp/Vs$  на сейсмических разрезах профилей «Яшкуль – Медногорск» и

«Пугачев – Бейнау» коррелируется с температурной зональностью на территории Прикаспийской впадины; повышенные значения  $V_p/V_s$  соотносятся с повышенными температурами, что может быть объяснено функционированием в консолидированной коре конвективной гидротермальной системы. Пониженные значения  $V_p/V_s$  объясняются повышенной газонасыщенностью (дегазацией Земли) и наличием жестких структурных связей в массиве. Данные свойства геосреды обеспечивают накопление упругой энергии и, соответственно, потенциальную возможность сейсмических событий [Кузин, 2015]. Таким образом, параметр  $V_p/V_s$  может служить отображением конвективного гидротермального процесса, процесса подготовки землетрясений, а также служить прямым и косвенным признаком скопления углеводородов.

*Статья написана в рамках выполнения государственного задания (тема «Энергетика, динамика и дегазация Земли, теоретические и экспериментальные основы инновационных сейсмоакустических технологий исследования геологической среды и контроля за объектами нефтегазодобычи», № АААА-А16-116021510125-7).*

#### ЛИТЕРАТУРА

Абукова Л.А. Модели и механизмы нисходящей миграции УВ из осадочного чехла в приподнятые блоки фундамента // Нефтегазовая гидрогеология на современном этапе (теоретические проблемы, региональные модели, практические вопросы). М., 2007. С. 191–209.

Аксенов А.А., Гончаренко Б.Д., Калинин М.К., Капустин И.Н., Кирюхин Л.Г., Размышляев А.А. Нефтегазоносность подсолевых отложений. М.: Недра, 1985. 205 с.

Алейников А.Л., Немзоров Н.И., Халевин Н.И. Роль поперечных волн в повышении эффективности рудной сейсморазведки // Сейсморазведка при поисках месторождений цветных металлов на Урале: труды. М., 1981. С. 46–56.

Беляевский Н.А. Строение земной коры континентов по геолого-геофизическим данным. М.: Недра, 1981. 430 с.

Булин Н.К., Егоркин А.В. Региональный прогноз нефтегазоносности недр по глубинным сейсмическим критериям. М.: Центр ГЕОН, 2000. 194 с.

Виноградов В.И. Вертикальная аккреция в свете данных изотопной геохимии // Вертикальная аккреция земной коры: факторы и механизмы. М., 2002. С. 356–387. (Тр. ГИН РАН; вып. 542).

*Вольвовский Б.С., Вольвовский И.С.* Структура и геофизические параметры «безграничных» впадин – крупнейших нефтегазоносных бассейнов мира. М., 1988. 67 с. (Развед. геофизика: обзор ВИЭМС).

*Егоркин А.В., Разникова М.И.* Прикаспийская впадина // Сейсмические модели литосферы основных геоструктур территории СССР. М., 1980. С. 90–95.

*Егоркин А.В.* Многоволновые глубинные сейсмические исследования // Геофизика. 1996. № 4. С. 25–30.

Детальные сейсмические исследования литосферы на *P*- и *S*-волнах. Новосибирск: Наука, 1993. 199 с.

*Каринский С.Д., Милановский С.Ю., Номоконов В.П., Пантелей Н.Н., Пружанский И.С., Кавалеров К.В., Шевченко А.А.* Новые данные о дизъюнктивной тектонике левобережной части Астраханского свода по сейсмическим отражениям от зон разломов // Геология нефти и газа. 1985. № 5. С. 11–14.

*Кузин А.М.* Разработка методики прогноза залежей флюидального генезиса по данным сейсмических методов // Прикладная геофизика: (50 лет ВНИИГеофизике). М., 1994. Вып. 131. С. 396–406.

*Кузин А.М., Баранский Н.Л., Краснопевцева Г.В.* К вопросу методологии интерпретации сейсмических данных для прогноза месторождений углеводородов // Нефтегазовая геология и освоение ресурсов и запасов углеводородов: сб. науч. тр.: к 70-летию ИГиРГИ. М., 2004. С. 217–235.

*Кузин А.М.* Пространственно-фазовая локализация месторождений углеводородов и отображение конвергентности процессов флюидизации в геологической среде по сейсмическим данным // Дегазация Земли и генезис нефтяных месторождений: к 100-летию со дня рождения П.Н. Кропоткина: сб. тр. М., 2011. С. 276–301.

*Кузин А.М.* О некоторых общих свойствах флюида в геологических процессах, явлениях и закономерностях: (к обоснованию единой системы геолого-геофизического изучения недр). Ч. 1 [Электрон. ресурс] // Георесурсы, геоэнергетика, геополитика: электрон. науч. журн. 2015. Вып. 2(12). 19 с. – Режим доступа: <http://oilgasjournal.ru> (Дата обращения 02.08.2018).

*Кузин А.М.* То же. Ч. 2 [Электрон. ресурс] // Георесурсы, геоэнергетика, геополитика. 2015. Вып. 2(12). 29 с. – Режим доступа: <http://oilgasjournal.ru> (Дата обращения 02.08.2018).

*Кузин А.М.* Модель глубинного строения Прикаспийской впадины по данным региональных сейсмических наблюдений МОГТ – ГСЗ и месторождения углеводородов [Электрон. ресурс] // Пространство пространств: Каспийский диалог. Пространство и время. 2016. Т. 13, вып. 1. – Режим доступа: [http://j-spacetime.com/actual%20content/t13v1/2227-9490e-aprov\\_r\\_e-ast13-1.2016.45.php](http://j-spacetime.com/actual%20content/t13v1/2227-9490e-aprov_r_e-ast13-1.2016.45.php) (Дата обращения 02.08.2018).

*Макаренко Ф.А., Ильин В.А., Кононов В.И., Поляк Б.Г.* Физическая модель подземной гидросферы // Международный геологический конгресс: докл. сов. геологов. М., 1972. Т. 11/13. Симпоз. 1: Гидрогеология и инженерная геология. С. 15–24.

*Кунин Н.Я., Волож Ю.А., Циммер В.А., Семенова Г.И.* Глубинное строение Прикаспийской впадины по данным сейсмических зондирований и некоторые вопросы ее происхождения // Геология и нефтегазоносность Прикаспийской впадины. М., 1974. С. 24–37.

*Михайлова Н.И., Великанов А.Е.* Роль соляного диапиризма и карстообразования в возникновении землетрясений в Прикаспийской низменности (на примере Шалкарского землетрясения 2008 г.) // Триггерные эффекты в геосистемах: тез. докл. семинара-совещ. (Москва, июль 2010 г.) М., 2010. С. 63–64.

Проект ПРИКАСПИЙ – 1993. Профиль «Яшкуль – Медногорск». Профиль «г. Пугачев – г. Бейнау» // Атлас «Опорные геолого-геофизические профили России». Глубинные сейсмические разрезы по профилям ГСЗ, отработанным в период с 1972 по 1995 год: [электрон. изд.]. СПб., 2013. С. 51–52.

Проект БАТОЛИТ–2 – 1989. Профиль «г. Краснодар – р. Эмба». Профиль «р. Эмба – г. Колпашево». Профиль «Манаш – п. Карачаганак». Профиль «р. Эмба – г. Оренбург» // Там же. С. 45–47.

*Ронов А.Б.* Осадочная оболочка Земли. М.: Наука, 1980. 78 с.

*Сафонов А.С., Дунаева Л.П., Корольков Ю.С., Семяшкин А.Г., Страхаль М.В.* Физико-геологическая модель – основа прогноза высокоперспективных зон нефтенакопления // Прикладная геофизика (50 лет ВНИИГеофизике). М., 1994. Вып. 131. С. 385–392.

*Сардаров (мл.) С.С.* Структуры в гидротермальных системах. М.: Наука, 1989. 151 с.

*Сыдыков Ж.С., Мухамежданов М.А.* Термогидрогеологические условия и нефтегазоносность структур Прикаспийской впадины // Подземные воды и эволюция литосферы: материалы Всесоюз. конф. М., 1985. Т. 2. С. 225–227.

*Шарданов А.Н.* Оценка перспектив нефтегазоносности палеозоя Прикаспийской синеклизы в свете дистанционных исследований // Проблемы количественного прогнозирования нефтегазоносности недр. М., 1984. С. 124–128.

*Юдахин Ф.Н., Щукин Ю.К., Макаров В.И.* Глубинное строение и современные геодинамические процессы в литосфере Восточно-Европейской платформы. Екатеринбург: УрО РАН, 2003. 299 с.

*Чермак В.* Карта теплового потока Европы // Тепловое поле Европы. М.: Мир, 1982. 376 с.

*Хуторской М.Д., Ахмедзянов В.Р., Ермаков А.В., Леонов Ю.Г., Подгорных Л.В., Поляк Б.Г., Сухих Е.А., Цыбуля Л.А.* Геотермия арктических морей. М.: ГЕОС, 2013. 232 с. (Тр. ГИН РАН; вып. 605).

*Яковлев Л.Е., Поляк Б.Г.* Проблема формирования континентальной коры в свете взаимодействия «вода – порода» // Вертикальная аккреция земной коры: факторы и механизмы. М., 2002. С. 323–355. (Тр. ГИН РАН; вып. 542).

## ПРИЛОЖЕНИЕ

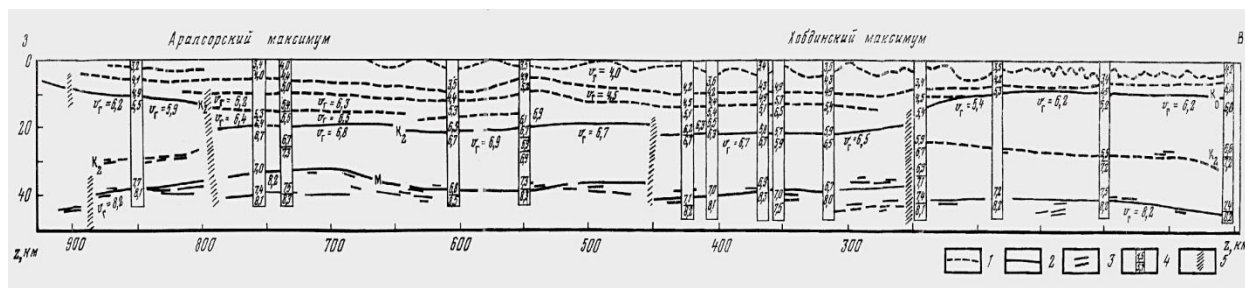


Рис. 1. Сейсмический разрез по профилю Челкар – Волгоград, по Циммеру [Кунин и др., 1974]; скоростные колонки, по М.И. Разникова [Егоркин, Разникова, 1980]

1 – преломляющие горизонты в осадочной толще; 2 – поверхность фундамента и границы Мохоровичича; 3 – отражающие площадки; 4 – колонки пластовых скоростей, км/с

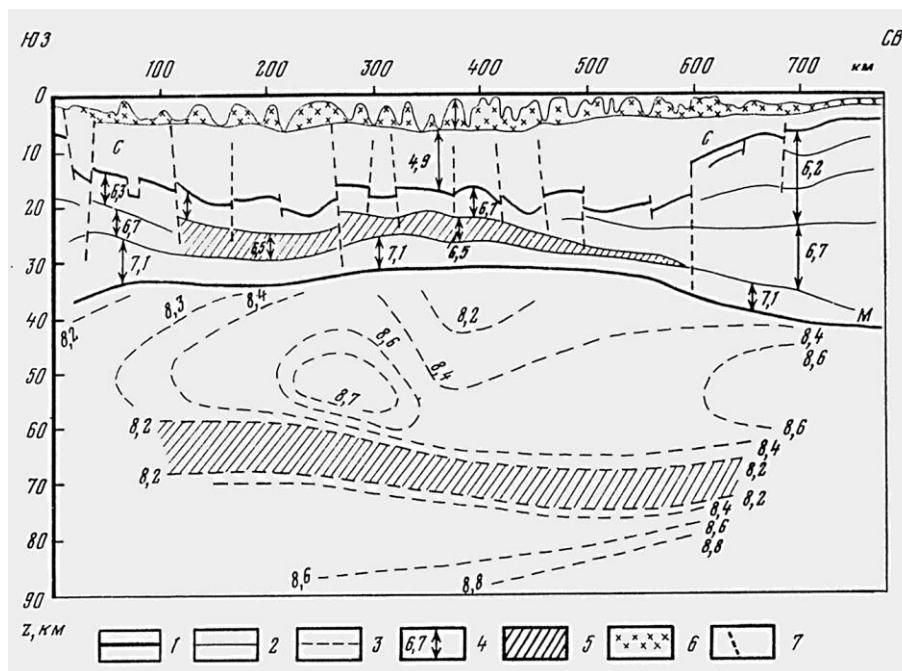


Рис. 2. Сейсмический разрез по профилю Элиста – Бузулук (сост. А.В. Егоркин, Э.Г. Данилова, Л.Б. Щеглова и др.)

1 – поверхность фундамента и границы Мохоровичича, построенные по преломленным и обменным волнам; 2 – границы в коре; 3 – изолинии скорости, км/с; 4 – пластовые скорости, км/с; 5 – области пониженной скорости; 6 – соль; 7 – разрывные нарушения [Егоркин, Разникова, 1980]

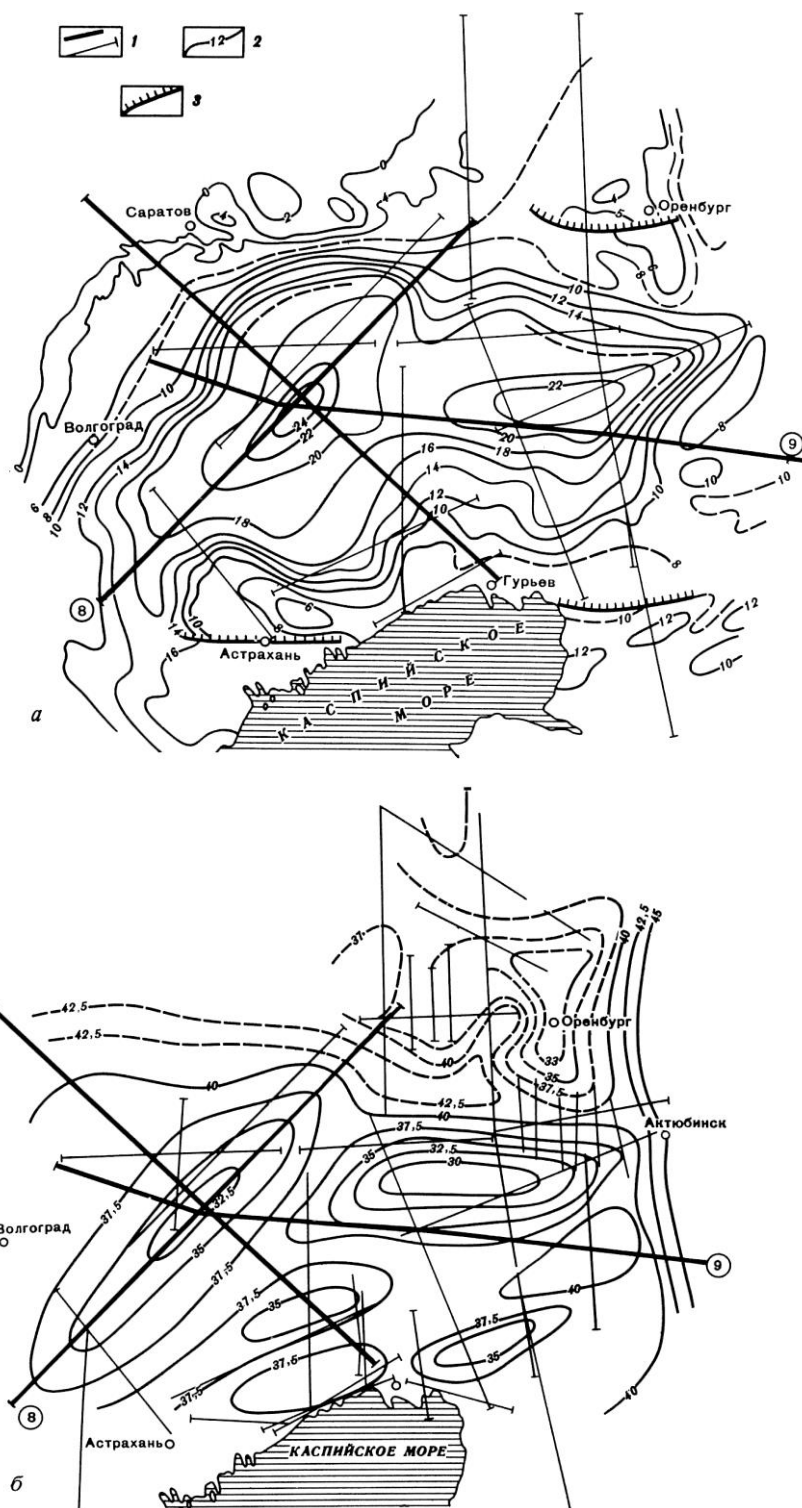


Рис. 3. Схемы рельефа поверхности фундамента (а) и границы Мохоровичича (б) Прикаспийской впадины (сост. М.И. Разникова)  
 1 – сейсмические профили (8 – Элиста – Бузулук; 9 – Челкар – Волгоград); 2 – изолинии глубин, км; 3 – краевые разрывные нарушения [Егоркин, Разникова, 1980]

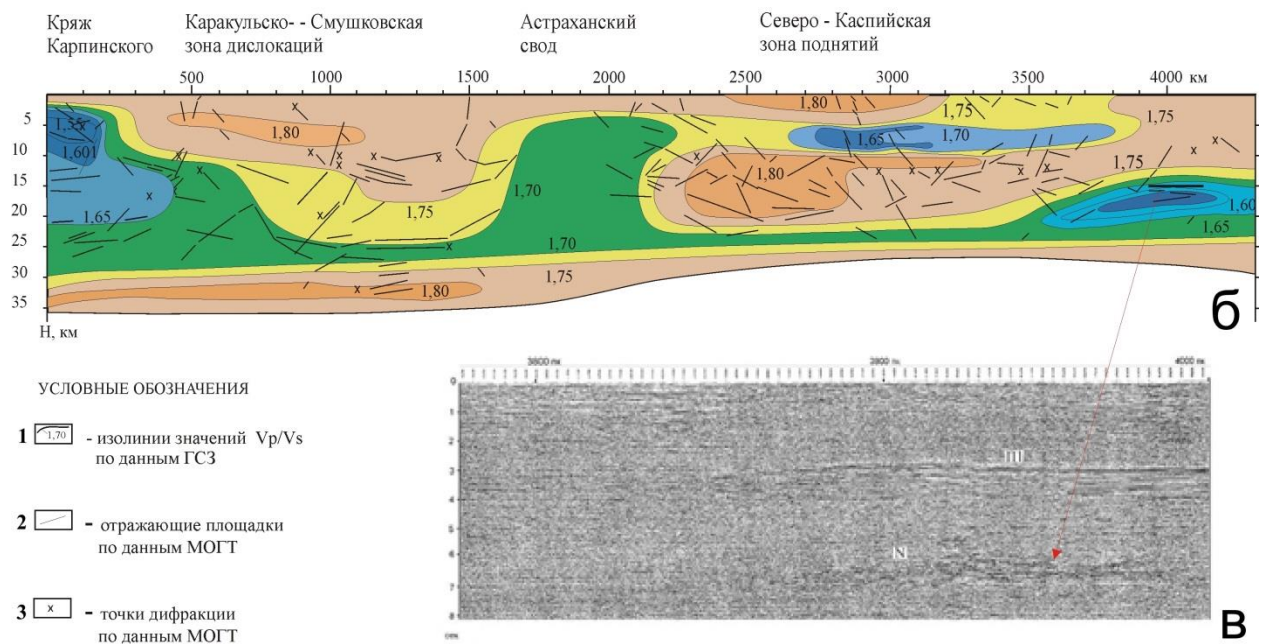


Рис. 4. Сейсмический разрез по геотраверсу «Батолит-2»

**а** – Фрагмент сейсмогеологического разреза по профилю «Батолит-2» МОГТ. Граница кристаллического фундамента и границы в консолидированной коре по данным ГСЗ, геотраверс «г. Краснодар – р. Эмба» [Проект БАТОЛИТ-2 – 1989..., 2013]; **б** – Фрагмент разреза отношения скоростей  $V_p/V_s$  по геотраверсу ГСЗ «г. Краснодар – р. Эмба» с отражающими границами по данным МОГТ [Кузин, 1994]; **в** – Фрагмент временного разреза по профилю МОГТ «Батолит-2» [Кузин, 1994, 2004]

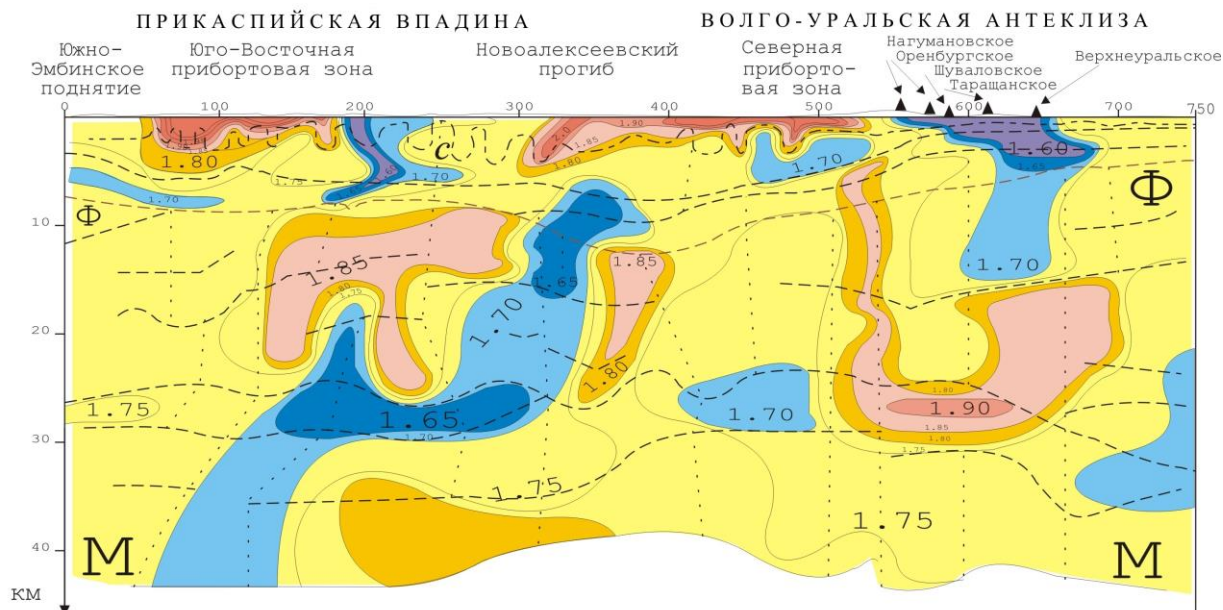


Рис. 5. Разрез отношения скоростей  $V_p/V_s$  по геотраверсу «р. Эмба – г. Оренбург», построен по данным [Проект БАТОЛИТ-2 – 1989..., 2013] в интерпретации автора

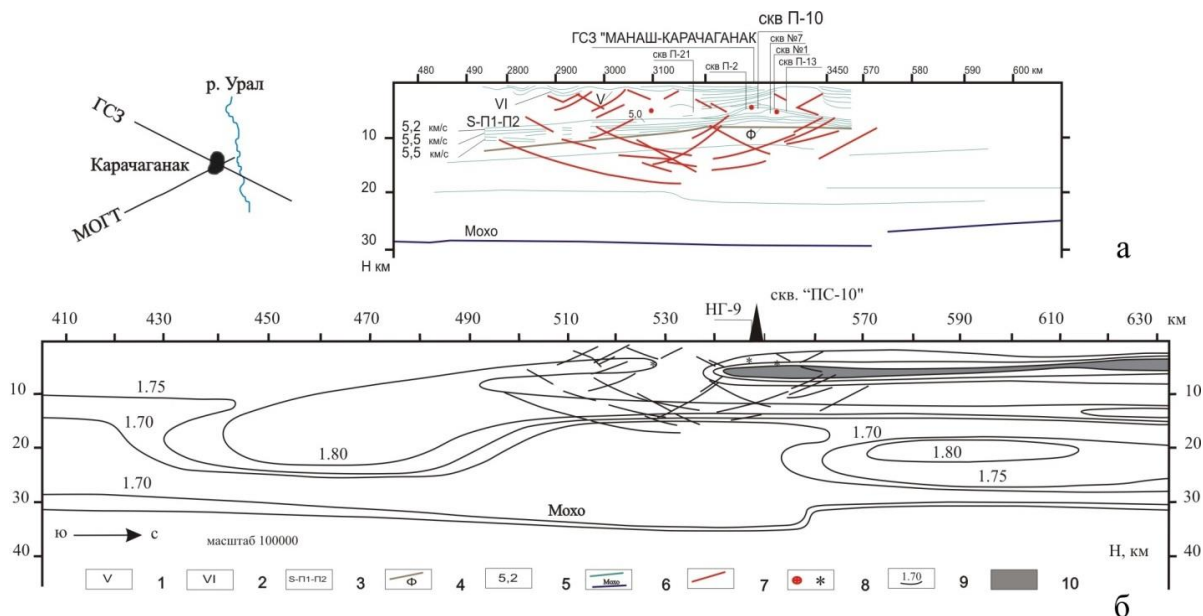


Рис. 6. а – Фрагмент сейсмогеологического разреза по профилю МОГТ «НГ-9». Граница кристаллического фундамента и границы в консолидированной коре по данным ГСЗ, профиль «Манаш – Карачаганак» [Проект БАТОЛИТ-2..., 2013]; б – разрез отношения скоростей  $V_p/V_s$  по геотраверсу «Манаш – Карачаганак» с отражающими границами по данным «НГ-9» МОГТ [Кузин, 1994]

Условные обозначения: 1, 2, 3 – отражающие границы в осадочном комплексе пород по данным МОГТ; 4 – граница кристаллического фундамента; 5 – значения пластовой скорости по данным МОГТ, в км/с (интерпретация ВНИИ Геофизики); 6 – границы в консолидированной коре [Проект «БАТОЛИТ-2 – 1989..., 2013»]; 7 – отражающие границы – разрывные нарушения, построенные по данным МОГТ; 8 – точки дифракции по данным МОГТ; 9 – изолинии  $V_p/V_s$ ; 10 – область со значениями 1,70  $V_p/V_s$  [Кузин, 1994]

Разрез отношения скоростей продольных и поперечных волн по профилю ГСЗ "Колпашево-Эмба"

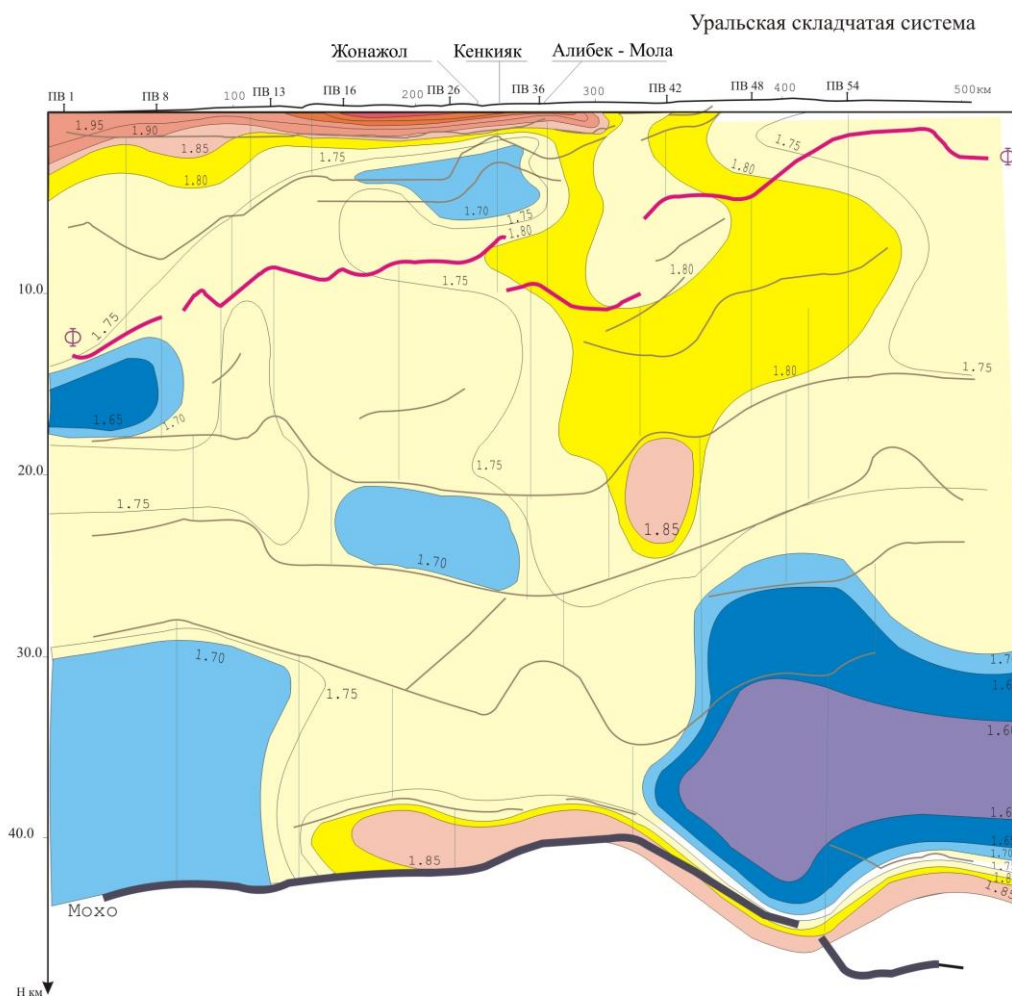


Рис. 7. Разрез отношения скоростей  $V_p/V_s$  по геотраверсу «Колпашево – р. Эмба», построен по данным [Проект БАТОЛИТ-2 – 1989..., 2013] в интерпретации автора

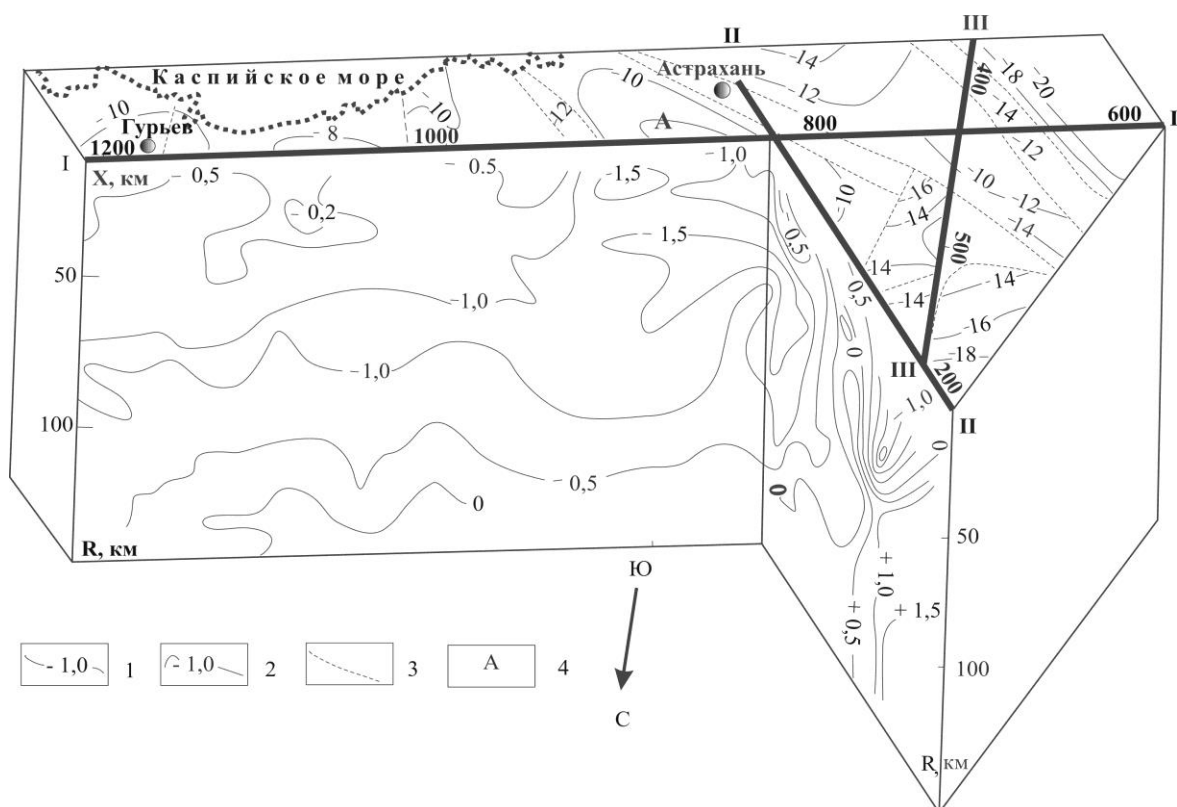


Рис. 8. Объемное распределение параметра  $\Delta t$  в районе Астраханского месторождения (по данным Г.А. Краснопевцевой)

1 – изолинии  $\Delta t$  в секундах; 2 – изогипсы по кровле фундамента в метрах; 3 – тектонические нарушения по фундаменту; 4 – Астраханское газоконденсатное месторождение  
Фрагменты профилей ГСЗ: I-I – «г. Краснодар – р. Эмба»; II-II – «Замьяны – Вязовка»; III-III – «Волгоград – Нахичевань» [Сафонов и др., 1994]

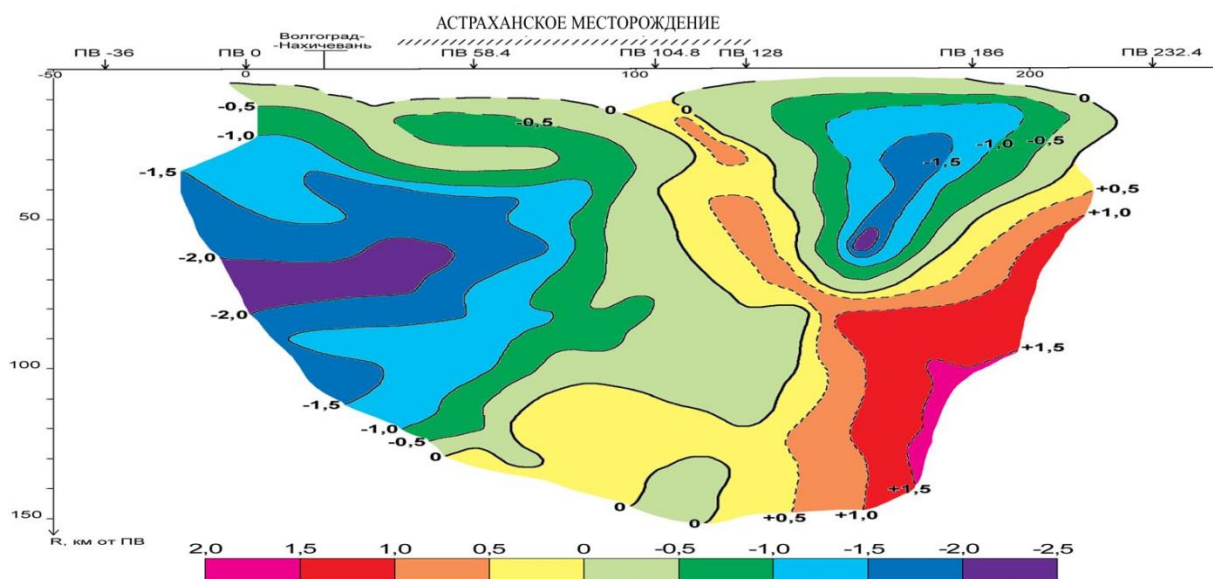


Рис. 9. Разрез временных аномалий  $\Delta t(R)$  первых коровых Р-волн по наблюдаемым годографам на профиле ГСЗ «Замьяны – Вязовка» (новая интерпретация Г.В. Краснопевцевой, 2003 г.)

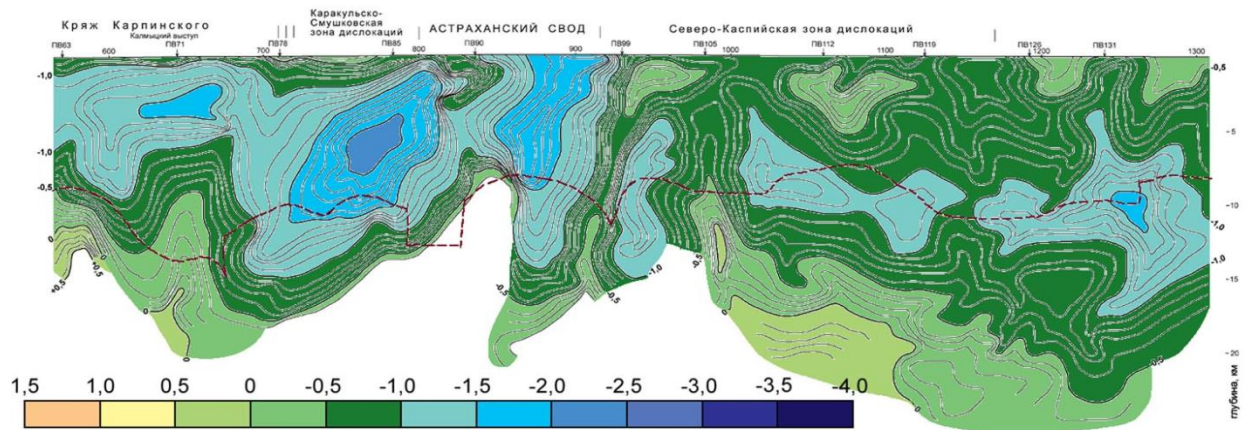


Рис. 10. Разрез временных аномалий  $\Delta t(R)$  первых коровых Р-волн по наблюдаемым годографам на геотраверсе ГСЗ «г. Краснодар – р. Эмба» [Кузин, Баранский, Краснопевцева, 2004]

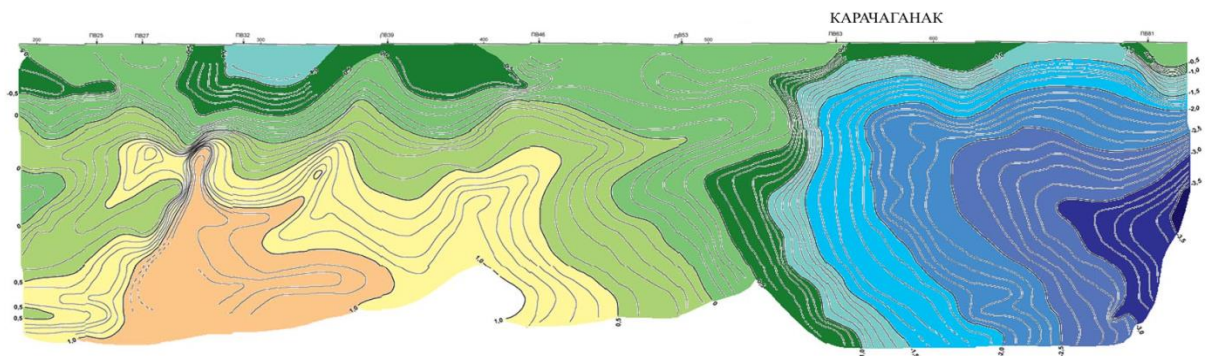


Рис. 11. Разрез временных аномалий  $\Delta t(R)$  первых коровых Р-волн по наблюдаемым годографам на геотраверсе ГСЗ «Манаши – Карачаганак» [новая интерпретация Г.В. Краснопевцевой, 2003 г.]

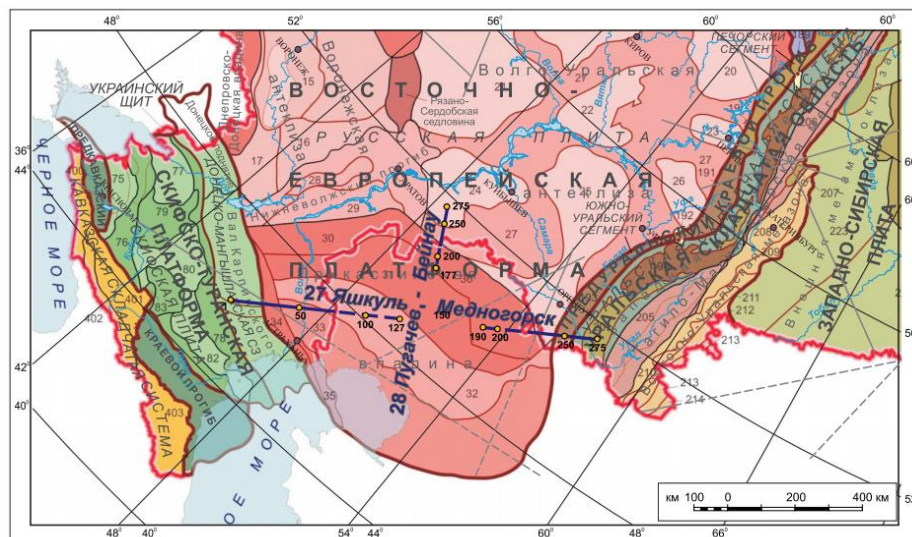


Рис. 12. Схема последних профилей ГСЗ («Яшкуль – Медногорск» и «Пугачев – Бейнау»), отработанных в Прикаспийской впадине по проекту «Прикаспий» [Проект «ПРИКАСПИЙ – 1993.., 2013]

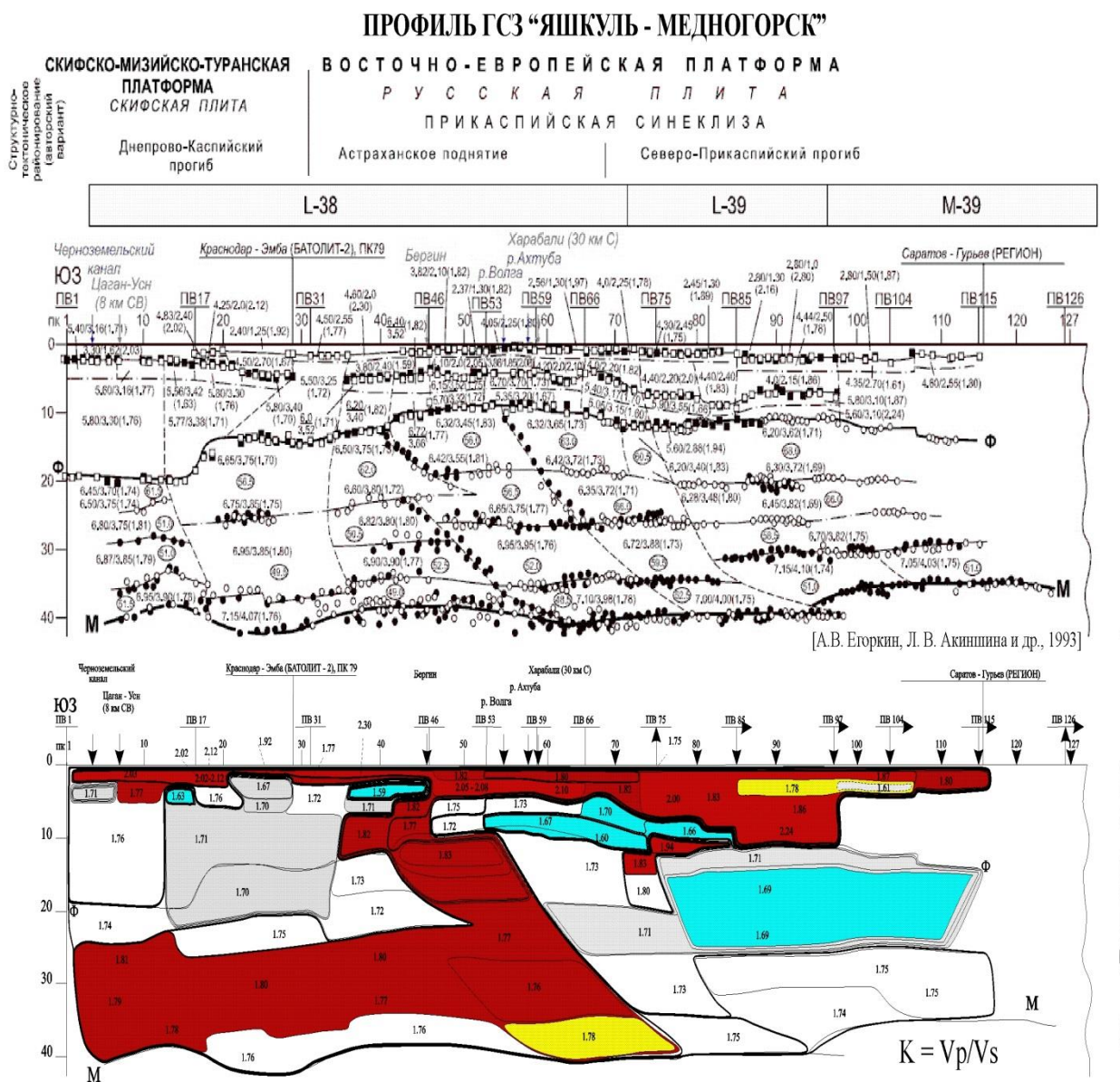


Рис. 13, а. Западная часть профиля ГСЗ «Яшкуль – Медногорск» [Проект «ПРИКАСПИЙ – 1993.., 2013]. Разрез  $V_p/V_s$  в интерпретации автора

# ПРОФИЛЬ ГСЗ «ЯШКУЛЬ - МЕДНОГОРСК»

ВОСТОЧНО-ЕВРОПЕЙСКАЯ ПЛАТФОРМА  
 РУССКАЯ ПЛИТА  
 ПРИКАСПИЙСКАЯ СИНЕКЛИЗА

ПРЕДУРАЛЬСКИЙ ПРОГИБ

Восточно-Уральская  
 антеклиз

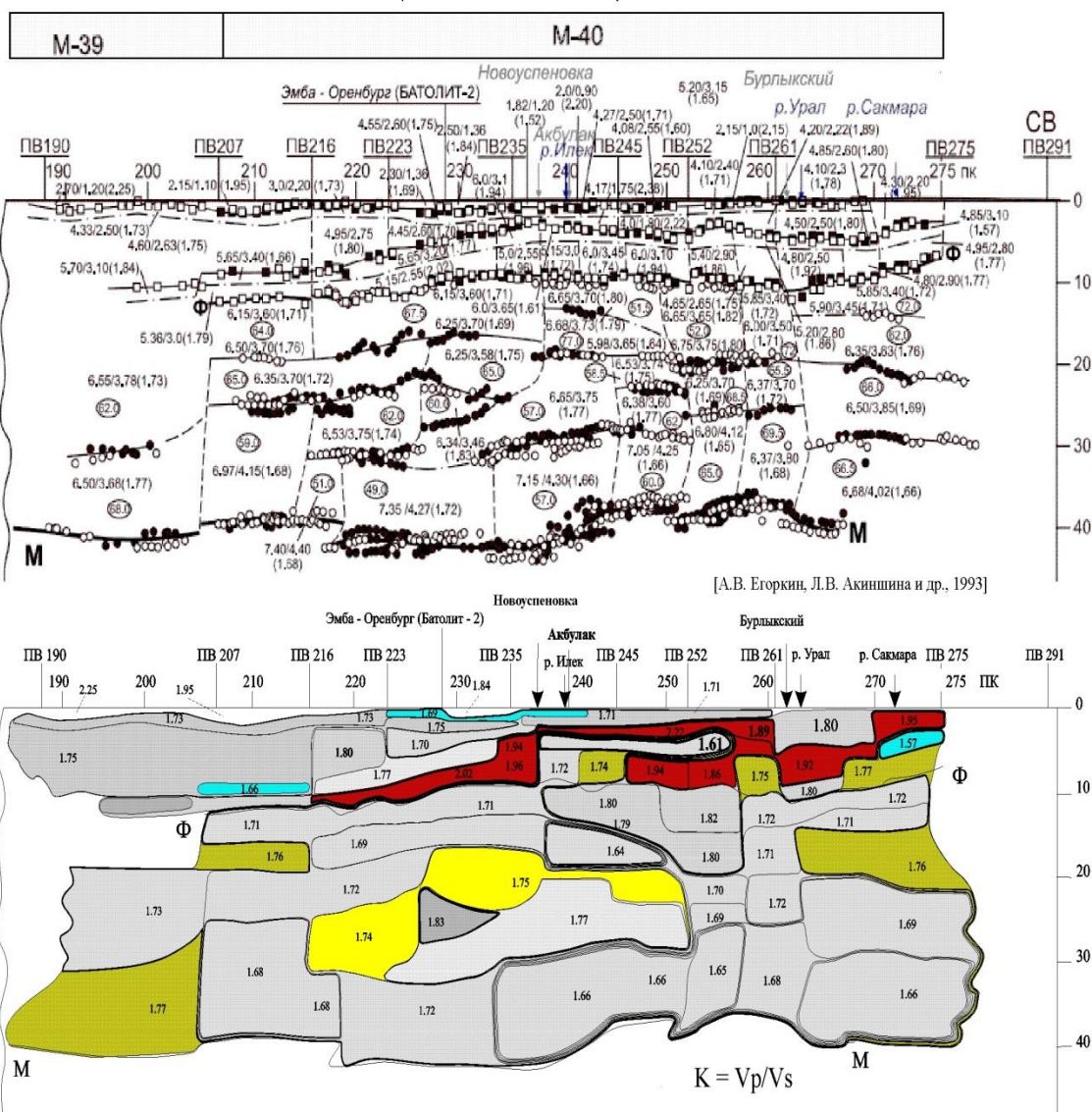


Рис. 13, б. Западная часть профиля ГСЗ «Яшкуль – Медногорск» [Проект «ПРИКАСПИЙ – 1993... 2013]. Разрез  $V_p/V_s$  в интерпретации автора

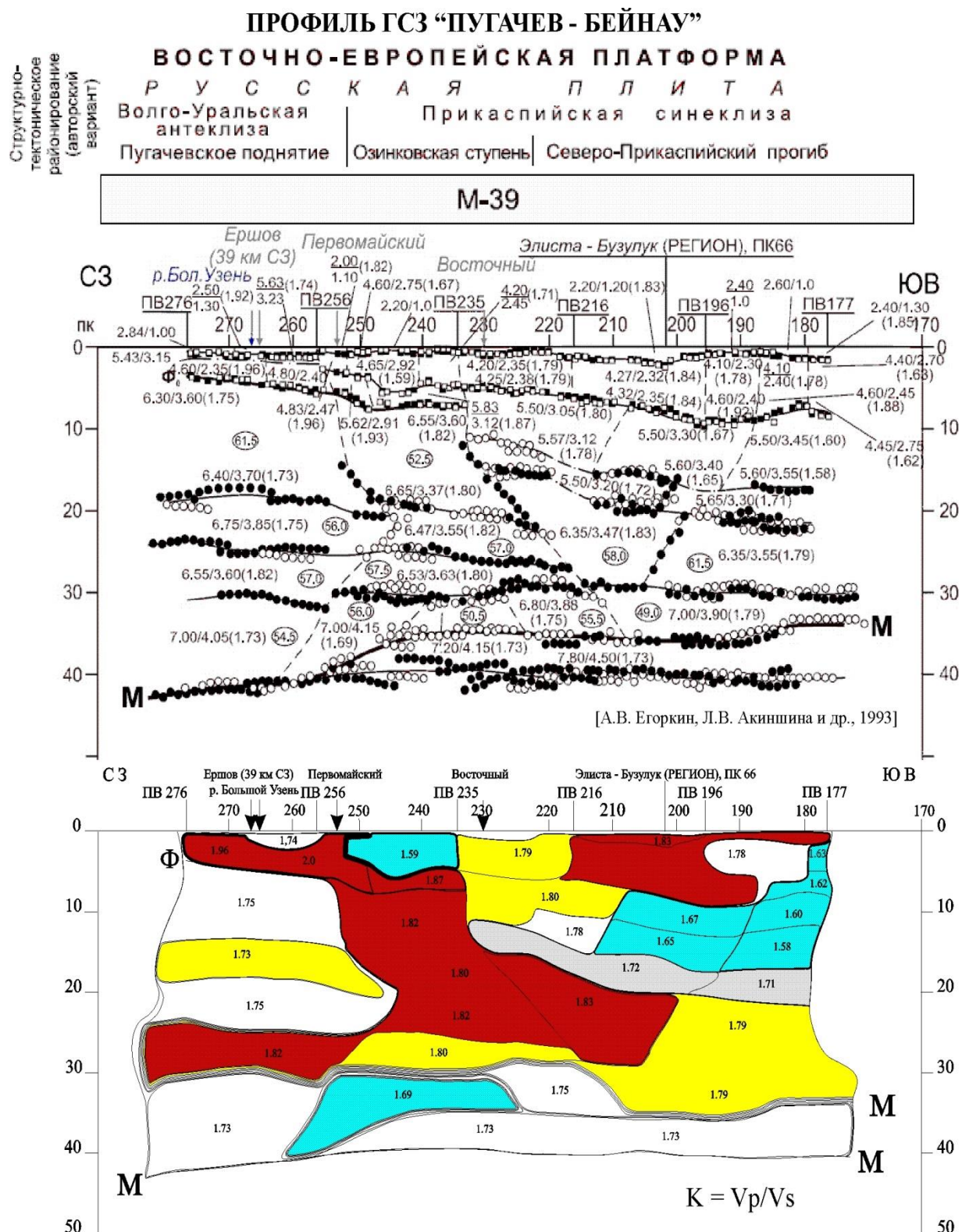


Рис. 14. Профиль ГСЗ «Пугачев – Бейнау» [Проект «ПРИКАСПИЙ – 1993.., 2013]. Разрез  $V_p/V_s$  в интерпретации автора

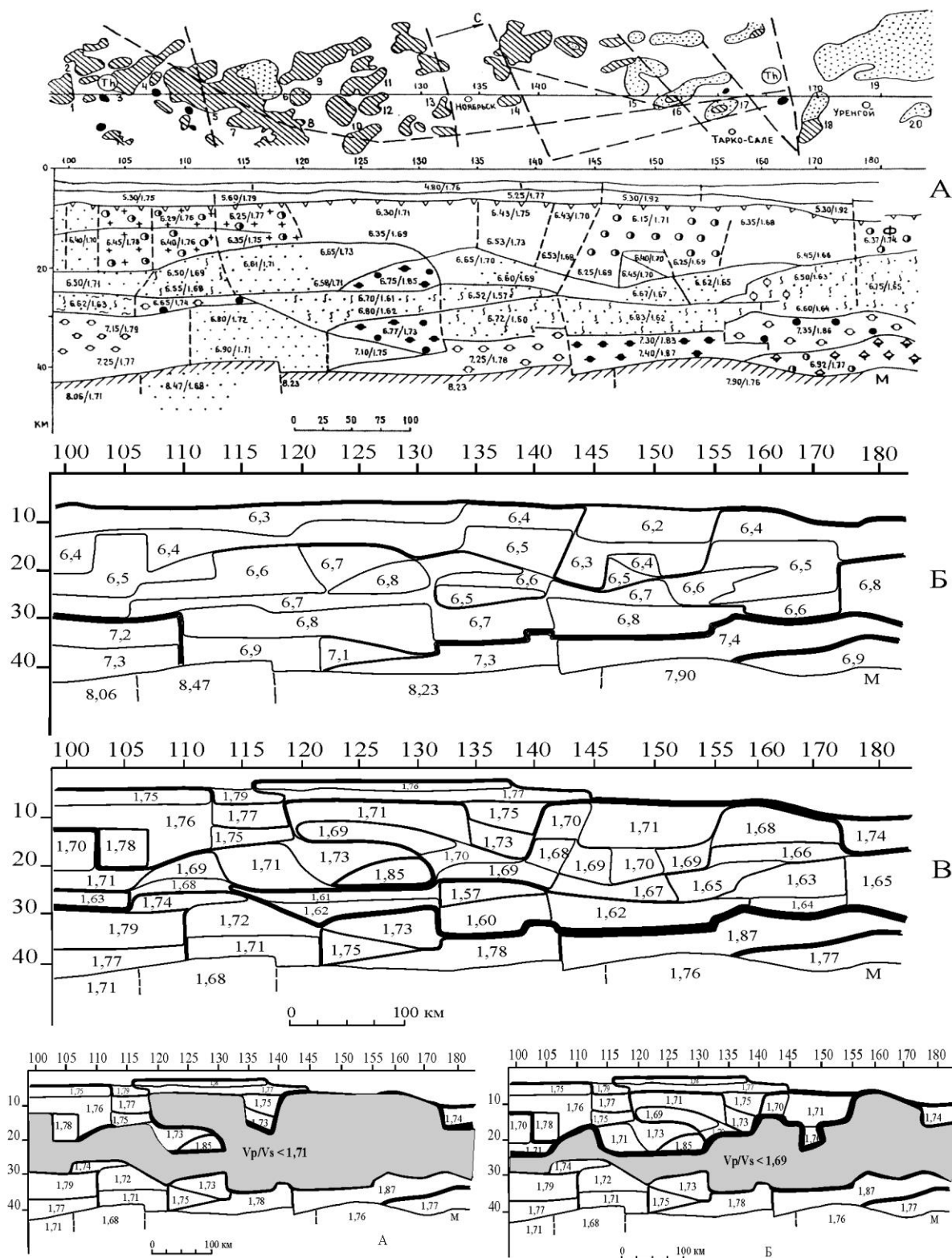


Рис. 15. А – Сейсмический разрез фрагмента геотраверса оз. Тенгиз – море Лаптевых. Месторождения: 1 – Северо-Чупальское; 2 – Малобалыкское; 3 – Южно-Балыкское; 4 – Мамонтовское; 5 – Сургутское; 6 – Федоровское; 7 – Родниковое; 8 – Кечимовское; 9 – Савуйское (Сорымское); 10 – Восточно-Ягунское; 11 – Южно-Ягунское; 12 – Грибное; 13 – Пограничное; 14 – Ноябрьское; 15 – Комсомольское; 16 – Губкинское; 17 – Западно-Таркосалинское; 18 – Южно-

Пырейное; 19 – Уренгойское (Евояхинское); 20 – Ярояхинское [Булин, Егоркин; 2000]. Б – Глубинный разрез распределения скорости продольных волн. В – Глубинный разрез отношения скорости продольных волн к скорости поперечных волн ( $V_p/V_s$ ) Сейсмический разрез фрагмента геотраверса оз. Тенгиз – море Лаптевых в изолиниях  $V_p/V_s$ . А –  $V_p/V_s < 1,71$ ; Б –  $V_p/V_s < 1,69$  [Кузин, 2011]

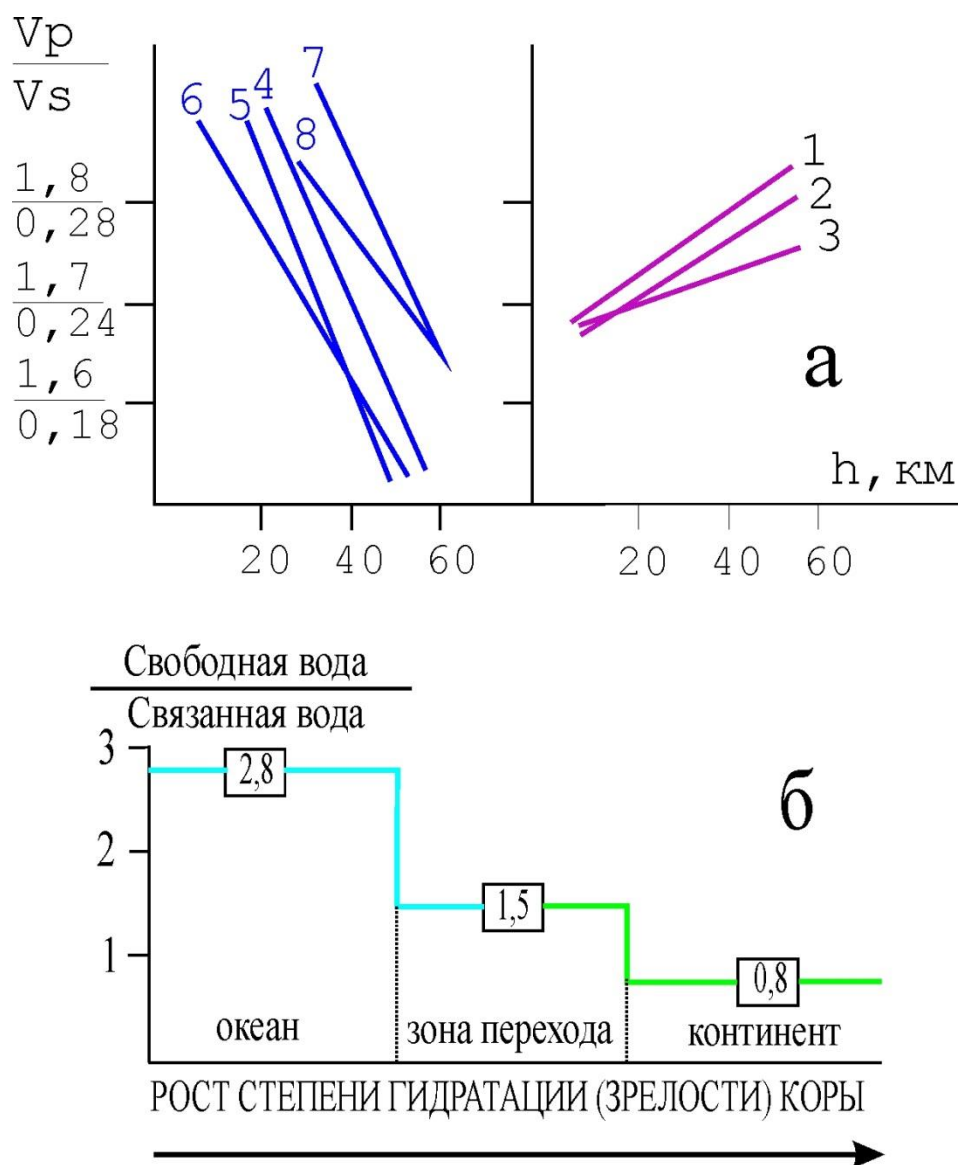


Рис. 16. а – Графики зависимости отношения средних скоростей продольных и поперечных волн ( $V_{cp}/V_{cs}$ ) от мощности консолидированной коры,  $K(h) = V_{cp}/V_{cs}$  [Егоркин, 1996]; б – Изменение степени гидратации земной коры по мере ее эволюции (по Макаренко и др., 1972), из [Яковлев, Поляк, 2006], с сокращениями

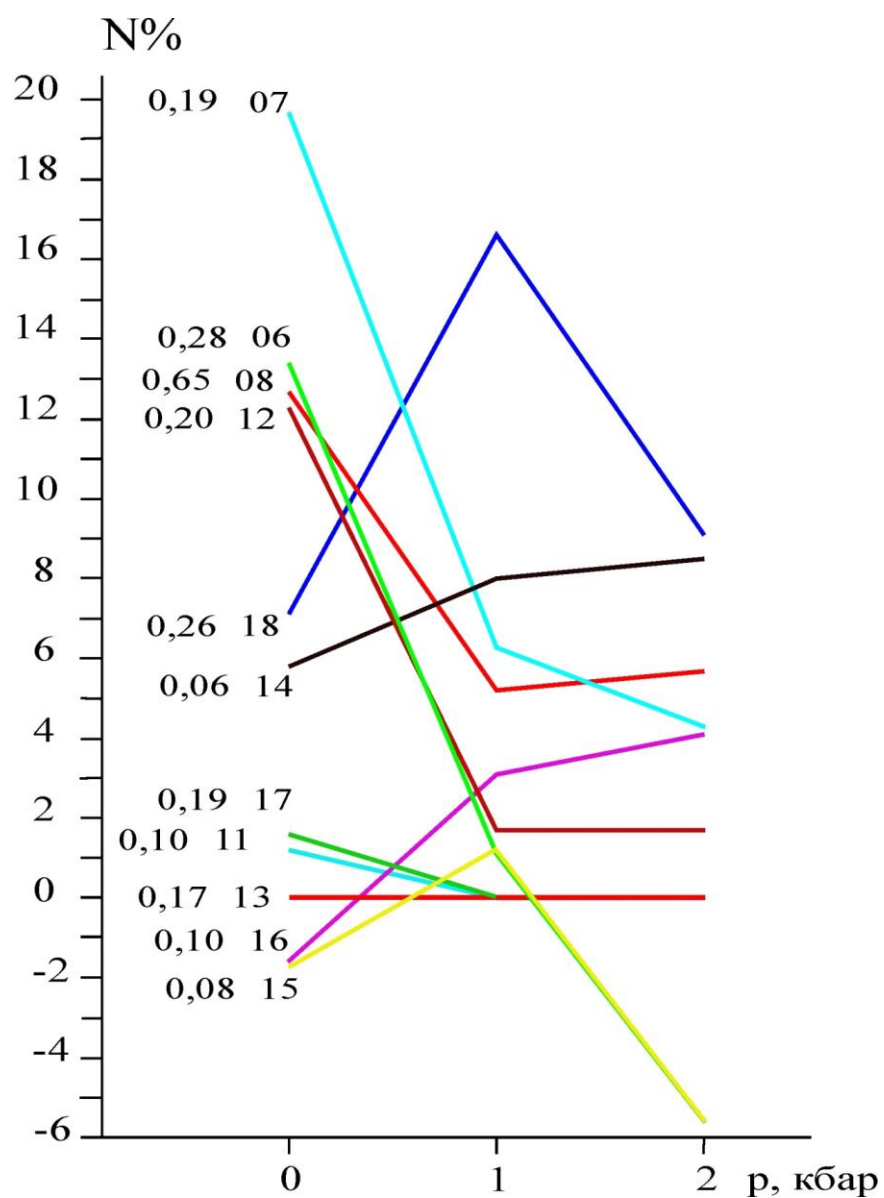


Рис. 17. Графики изменения процентного соотношения  $V_p/V_s$  между сухими и водонасыщенными образцами, рассчитанными по [Волярович, Томашевская, Будников, 1979]. Первый индекс на графике – открытая пористость, второй индекс – номер образца [Кузин, 2011]

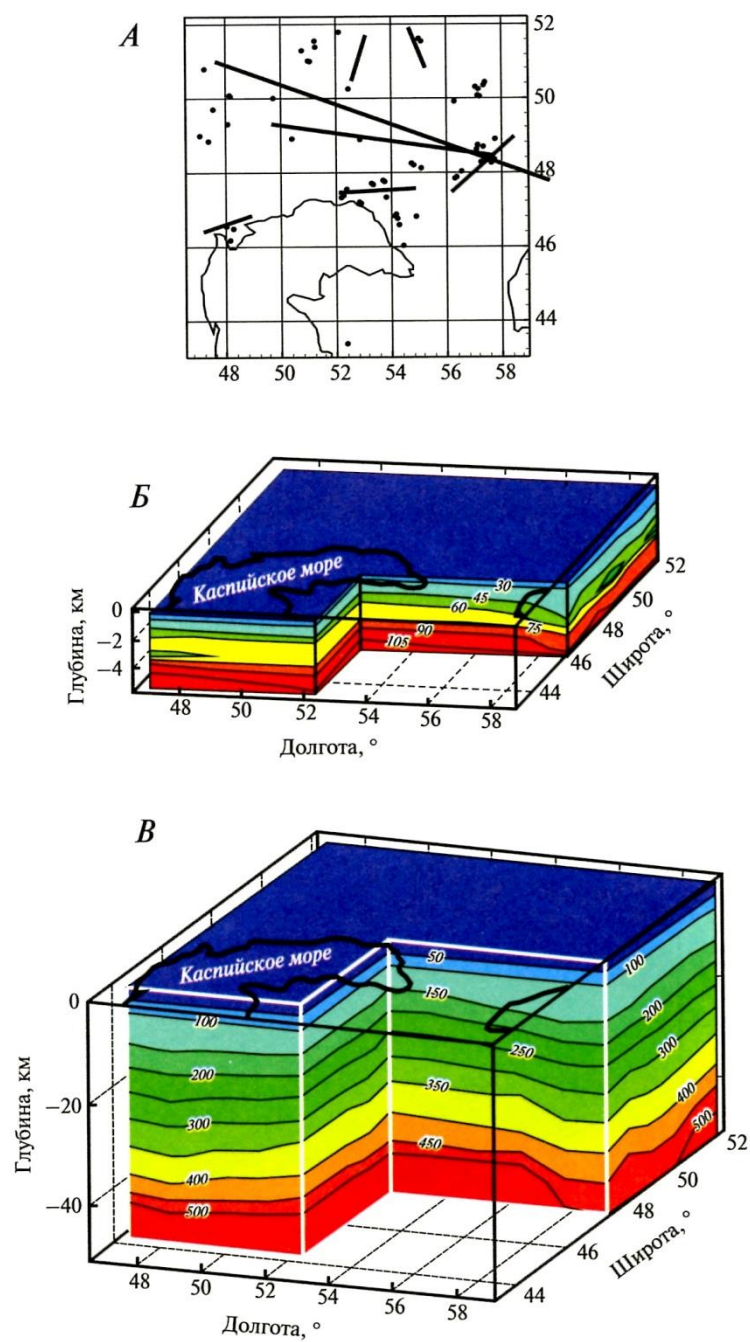


Рис. 18. 3D-модели распределения глубинных температур в Прикаспийской впадине  
 А – схема расположения использованных профилей и скважин; Б – объемная модель в интервале бурения скважин 0–5 км; В – объемная модель земной коры (0–50 км) [Хуторской и др., 2013]

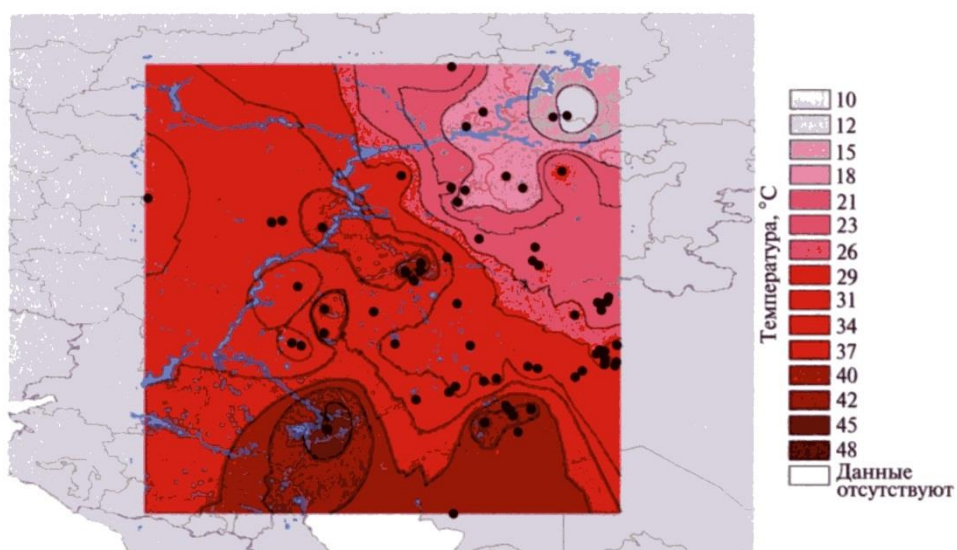


Рис. 19. Распределение температур на глубине 1000 м в Волго-Уральской провинции по данным термометрии скважин [Хуторской и др., 2013]

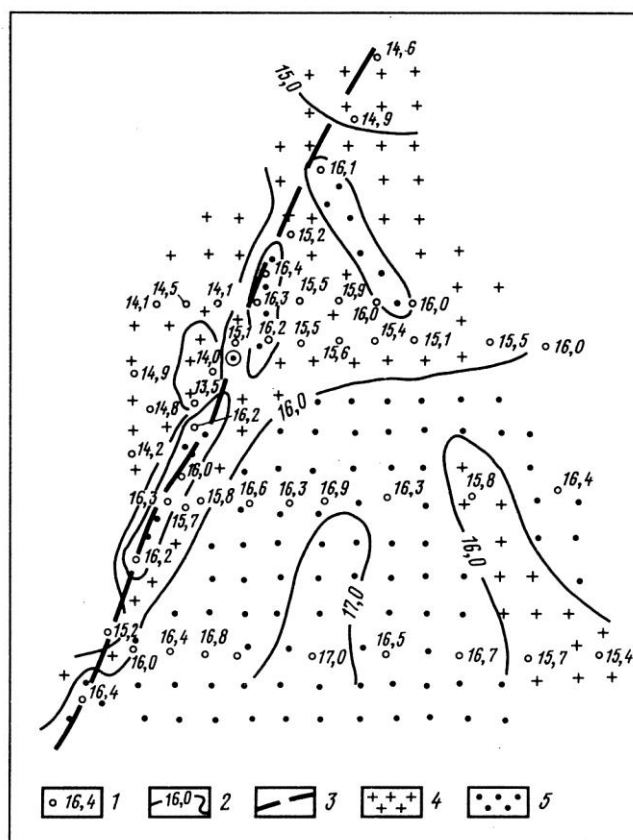


Рис. 20. Геотермическое поле разлома (Прикаспийская синеклиза)  
 1 – пункты измерения,  $t = 0$  °C; 2 – изотермы; 3 – скважина глубокого бурения; 4 – положительные аномалии; 5 – отрицательные аномалии [Сардаров, 1989]