

УДК 550.341

© Ю.В. Козленко, М.В. Козленко, Д.В. Лысынчук, 2009

Институт геофизики им. С.И. Субботина НАН Украины, Киев

КОМПЛЕКСНОЕ СЕЙСМОСТРУКТУРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЕРСПЕКТИВНЫХ УГЛЕВОДОРОДНЫХ СТРУКТУР В ЗАПАДНОЙ ЧАСТИ ЧЕРНОГО МОРЯ

Проведена комплексная интерпретация сейсмических данных вдоль профиля ГСЗ № 25 в Черном море методами томографической инверсии первых вступлений сейсмических волн и сейсмоструктурного моделирования. Проанализированы особенности распределения скоростей и положений сейсмических границ, на основе чего выделены структурно-тектонические элементы разреза. Сопоставление полученных результатов с известными месторождениями нефти и газа и районами потенциального гидратообразования в Черном море показало возможность использования этой методики для выделения структур, перспективных на поиски углеводородов.

Проблема достоверного прогноза перспективности на углеводороды тех или иных областей континентальной окраины достаточно сложна. Известно, что на формирование залежей углеводородов оказывает влияние не только седиментогенез, но и процессы в консолидированной коре и верхней мантии [5, 11, 18]. Однако влияние структурных неоднородностей консолидированного фундамента на закономерности залегания пород осадочного чехла, развития складчатых и разрывных нарушений в западной части Черного моря проанализированы недостаточно, несмотря на многочисленные исследования [2, 3, 12, 16, 20].

Целью работы является определение элементов структуры земной коры, выявление связей между отдельными элементами осадочного чехла и фундамента, установление корреляции скоростных параметров полученного разреза и нефтегазоносных коллекторов. Авторами данной статьи предлагается новый подход к интерпретации сейсмических данных, который состоит в комплексном решении прямой и обратной задач сейсморазведки. Исследования проводились вдоль профиля глубинного сейсмического зондирования (ГСЗ) №25, который проходит почти через все Черное море с севера на юг, пересекая северо-западный шельф, а также северную и центральную части Западно-Черноморской впадины (рис. 1). Координаты ПК 0 – 45°59' с.ш., 32°16' в.д.; ПК -450 – 42°00' с.ш., 30°48,3' в.д.

В процессе исследований были применены современные программы, которые прошли апробации при моделировании ведущими европейскими геофизиками разрезов по международным профилям, таких как EURO-BRIDGE'97, DOBRE и др. [21, 27]. Решение обратной задачи сейсморазведки с использованием принципов томографии дает возможность получить

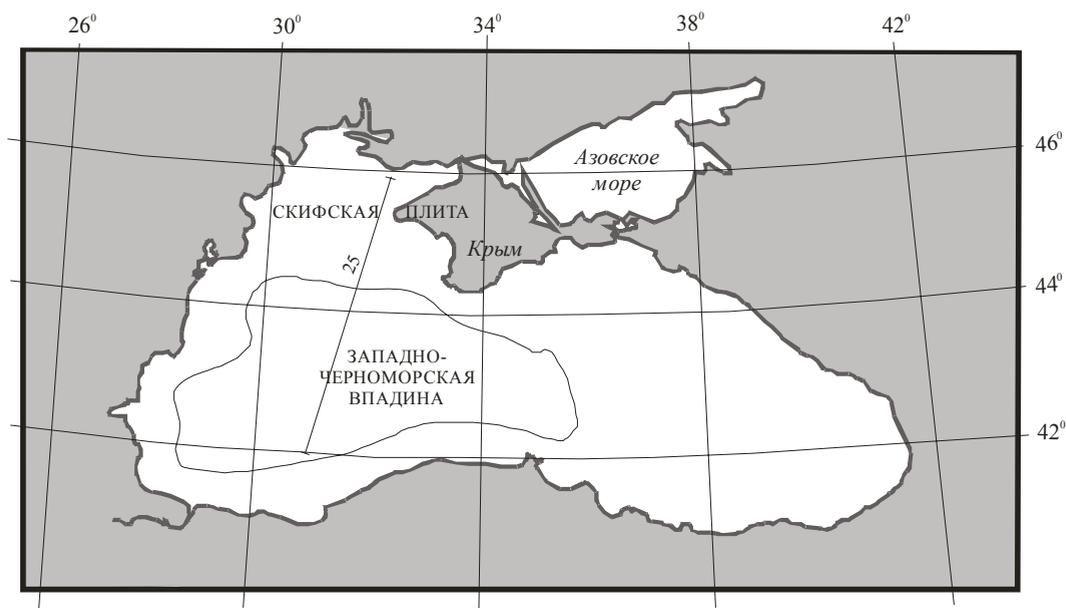


Рис. 1. Схема расположения профиля ГСЗ № 25

качественную оценку распределения скоростей в разрезе. Дальнейшее решение прямой задачи позволяет построить глубинный сейсмический разрез, выделить в нем неоднородности земной коры и верхней мантии, которые можно использовать для оценки характеристик углеводородовмещающих пород и особенностей тектоники района исследований.

Основой для построения модели послужила система годографов, полученных с помощью оцифровки наблюдаемых данных (рис. 2). Аппроксимация годографов выполнялась кусочно-ломаными линиями, задавались координаты точек излома на плоскости $x - T$. При таком подходе исключаются мелкие неоднородности среды, искажения, вызванные особенностями строения зоны малых скоростей, случайные отклонения отдельных точек годографов.

Скоростные характеристики верхней части разреза были получены с помощью программы томографической инверсии первых вступлений сейсмических волн FAST [22]. Расчет проводился по сетке с расстояниями между узлами 1 км по профилю и по глубине. Минимальные расхождения в расчетных и наблюдаемых годографах получены после пяти итераций. На рис. 3 приведен томографический разрез с наложением на него структурных границ осадочного чехла до поверхности меловых отложений по [17].

Вторым этапом работы был расчет сейсмоструктурной модели в режиме итерационного подбора по программе RAYINVR [28]. Для верхнего этажа земной коры были использованы данные по кайнозойским отложениям: положение структурных границ из работы [17], их скоростные характеристики – по [24]. Средняя часть разреза задавалась на основе полученного томографического разреза. Для нижнего яруса использовался разрез, рассчитанный с помощью методики СЕЙСМОД [14]. В построенной таким образом модели (рис. 4) при закрепленных глубинах осадочной толщи кайнозойского

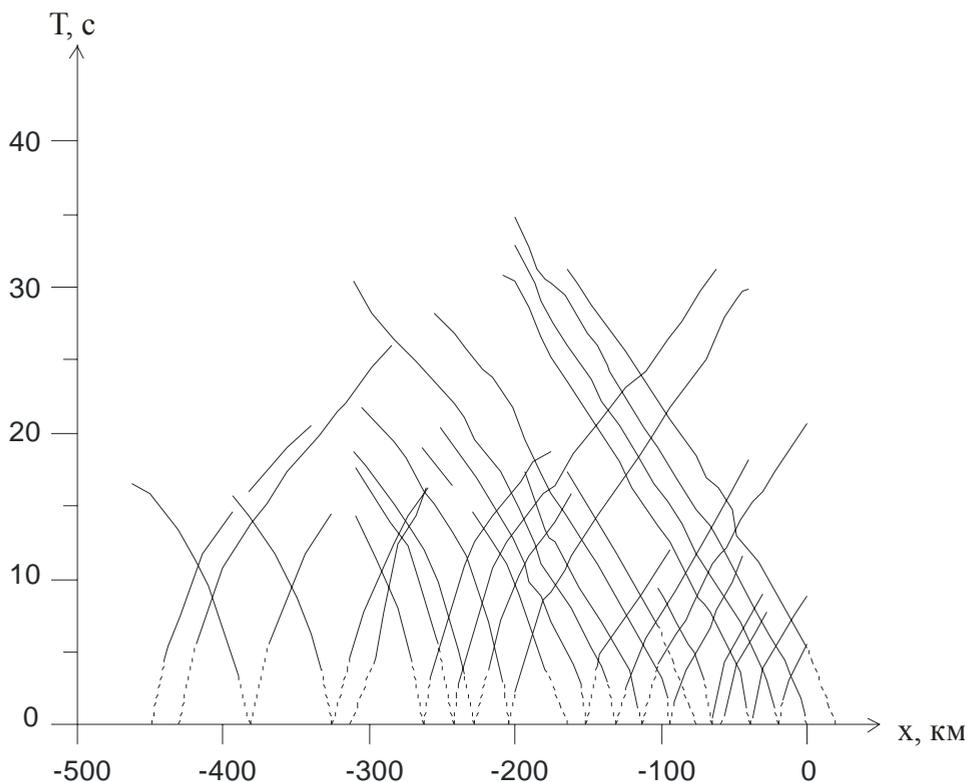


Рис. 2. Выходные данные по профилю ГСЗ № 25 в виде кинематических годографов. Сплошные линии – наблюдаемые, пунктирные – экстраполированные отрезки годографов первых вступлений

возраста подбирались конфигурации границ в консолидированной коре и поверхность Мохо, а также скоростные характеристики всего разреза.

Вдоль профиля сейсмические границы были заданы на 256 точек, распределение скоростей продольных волн – в 244 точках среды, т.е. приблизительно через 2 км. Исследования позволили определить скорости вдоль профиля до глубины 40 км и очертить геометрию поверхностей в земной коре и верхней мантии. С наибольшей точностью и достоверностью определены элементы модели до 20 км. С глубиной, вследствие рекурсивного накопления ошибок, степень неоднозначности построения увеличивается.

На полученной в результате томографического расчета волновой картине (см. рис. 3) изолинии сейсмических скоростей вдоль профиля образуют разноамплитудные чередующиеся прогибы и поднятия, которые характеризуются определенными закономерностями. Часть ундуляций представляют собой парные системы из сопряженных выступов и опусканий, оси которых субпараллельны и распространяются на 6–7 значений скорости. Кроме этого, выделяются изгибы, охватывающие две–четыре изолинии V_p , с одиночными осями.

В пределах Западно-Черноморской впадины на ПК -390...-365 и ПК -305...-280 выделяются две системы парных изгибов изолиний скорости, оси которых, начинаясь почти от поверхности дна, пересекают всю кай-

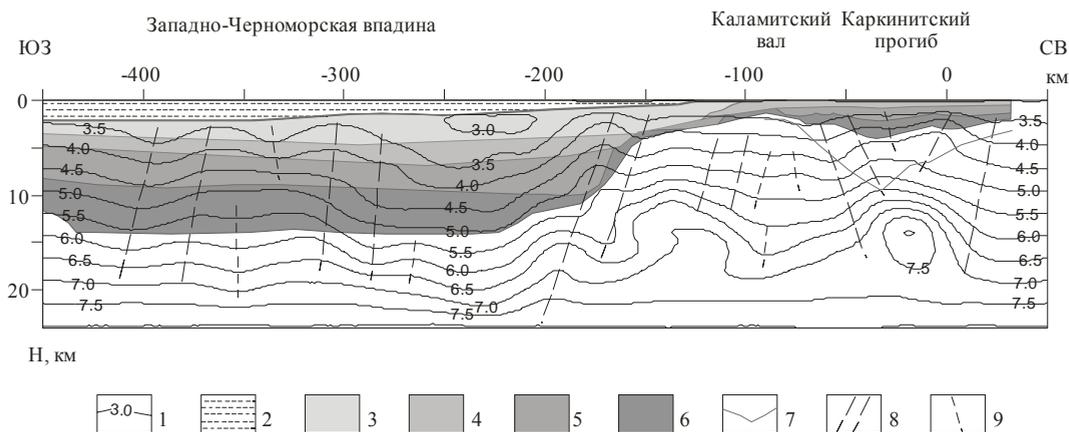


Рис. 3. Структурно-скоростной разрез, полученный по результатам томографической инверсии по профилю ГСЗ № 25. 1 – изолинии V_p , км/с; 2 – вода; структурные горизонты осадочного чехла по [17]: 3 – верхний неоген – антропоген ($N_2 - Q$), 4 – нижний неоген (N_1^{2-3}), 5 – майкопская серия ($P_3 - N_1^1$), 6 – нижний и средний палеоген (P_{1-2}); 7 – подошва отложений мелового возраста; 8 – оси парных ундуляций скоростных изолиний; 9 – оси одиночных ундуляций скоростных изолиний

нозойскую осадочную толщу и достигают глубины 15 км (см. рис. 3). Эти зоны с севера и юга ограничивают участок с поднятой до 15 км сейсмической границей с $V_p = 6,5/6,85$ км/с (см. рис. 4). В пределах описанного блока на томографическом разрезе (см. рис. 3) наблюдаются также два локальных прогиба изолиний V_p . Первый, на ПК -350, расположен в доэоценовых осадках и консолидированной части коры, охватывая интервал скоростей 5,5–7,5 км/с; второй (ПК -320, $V_p = 3,5-4,5$ км/с) локализован только в верхней части осадочного пласта - от антропогена до майкопа.

На томографическом разрезе (см. рис. 3) в интервале ПК -270...-200 на глубинах 2–22 км выделяется большой прогиб группы изолиний V_p от 3,0 до 7,5 км/с. Максимальное прогибание отмечается на ПК -230. В этом месте находится континентальное подножье палеоценового бассейна. Такая структура в зонах перехода от океанического типа коры к континентальному должна сопровождаться погружением поверхности кристаллического фундамента [23]. Отсутствие прогибания подошвы осадков объясняется тем, что использованный нами стратиграфический разрез [17] ограничен кровлей мела, который не обязательно совпадает с поверхностью консолидированной части коры. Существование докайнозойских осадочных отложений в западной части Черноморского бассейна установлено в работах [16, 24]. Наличие таких осадков в районе исследований подтверждают значения скорости 5,65–5,95 км/с в слое на глубине 13–16 км (см. рис. 4).

Парное нарушение распределения скоростей на томографическом разрезе (рис. 3) на ПК -165...-150 совпадает с участком резких изменений глубин залегания границ как в осадочном чехле, так и в консолидированном фундаменте на сейсмической модели (рис. 4). Эта область находится в зоне перехода между Скифской плитой и Западно-Черноморской котловиной. По результатам моделирования, Западно-Черноморская впадина (ПК -450...-290) подстилается субокеанической корой – фундамент имеет мощность около

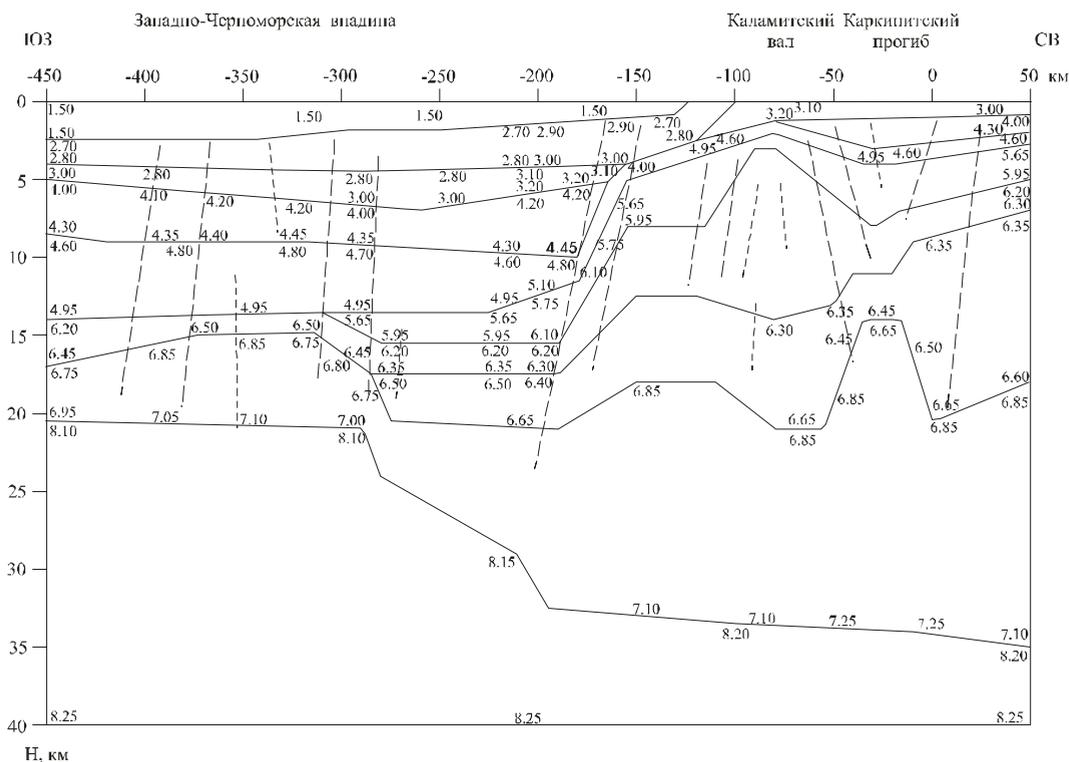


Рис. 4. Двумерная скоростная модель по профилю ГСЗ № 25. Значения V_p в км/с. Штриховыми линиями показаны оси ундуляций скоростей, выделенные по томографическому разрезу (рис. 3).

7 км, поверхность Мохо (сейсмическая граница со скачком скорости 7,1/8,2 км/с) залегает на глубине порядка 21 км. Скифская плита (севернее ПК -200) характеризуется субконтинентальным типом коры с глубиной залегания кровли мантии свыше 33 км.

Перегиб поверхности Мохо, который отмечает смену типов коры с субокеанического на субконтинентальный (ПК -200), трассируется выделенными по томографии осями ундуляций изолиний скоростей на континентальное подножье майкопского бассейна (рис. 4). Таким образом, можно считать, что мегаструктура Западно-Черноморского бассейна как субокеанической депрессии окончательно сформировалась к началу олигоцена. Дальнейшая тектоническая эволюция Черного моря не сопровождалась изменением типа коры и заключалась в общем опускании в основном в пределах впадины. Этот вывод согласуется с моделью Окая [25], соответственно которой режим растяжения Западно-Черноморского задугового бассейна на продолжался вплоть до эоцена.

На томографическом разрезе привлекает внимание подъем с 19 до 13,5 км изолинии $V_p = 7,0$ км/с в интервале ПК -130...-110 (см. рис. 3). Этот участок характеризуется отсутствием в разрезе отложений нижнего и среднего палеогена и верхнего неогена, т.е. осадки антропогенного возраста залегают прямо на майкопской серии, которая лежит непосредственно на породах мелового возраста. Такое строение указывает на неоднократные вос-

ходящие движения данного блока, во время которых происходили размыывы осадков. Можно предположить, что данная высокоскоростная аномалия обусловлена проникновениями в кору мантийных выплавок во время процессов тектонической активизации, что вызвало общее поднятие изолиний $V_p = 4,0-7,0$ км/с. На сейсмической модели повышения скоростей на этом участке проявляются в согласном подъеме границ в средней части консолидированной коры.

В интервале ПК -110...-95 на глубинах 4–12 км отмечается парная ундуляция изолиний скорости (см. рис. 3), оси которой имеют южное падение. Подобная система нарушений, но с северным наклоном осей, отмечена на ПК -60–50. Эти элементы на сейсмической модели (см. рис. 4) с обеих сторон ограничивают сводчатую структуру, которая проявляется подъемом с 8 до 3 км границы $V_p 5,95/6,25$ км/с и отождествляется с кровлей домелового метаморфического комплекса. Вершина данной структуры залегает непосредственно под Каламитским валом. Таким образом, Каламитский вал, который структурно был определен [17] по кровле массивных известняков палеоцен-верхнемелового возраста, является поверхностным проявлением глубинной структуры, охватывающей докайнозойский осадочный, метаморфический и гранитный слои ($V_p = 5,65-5,95; 6,2-6,3$ и $6,3-6,65$ км/с на рис. 4).

Участок ПК -60...-30 (см. рис. 3) относится к Каркинитскому прогибу. На ПК -30...-5 на глубине 12,5–17,5 км изолинией $V_p = 7,5$ км/с оконтурена довольно большая скоростная аномалия, которая на сейсмической модели (см. рис. 4) проявляется подъемом границы $V_p = 6,45/6,65$ км/с, отождествляемой с поверхностью базальтового слоя. Сочетание прогиба подошвы осадочного чехла с узким блоком повышенных скоростей в фундаменте дает классическую картину рифтогена, отличительной чертой которого является базификация средней части коры (так называемая “осевая дайка”) [7]. Следует отметить, что на этом участке изолинии $V_p = 5,0-7,0$ км/с выгнуты вверх, а $3,5-4,5$ км/с – прогнуты вниз (см. рис. 3). Это можно объяснить характерным для рифтогенеза уплотнением пород в консолидированной коре, которое сопровождается их погружением, что вызывает, в свою очередь, проседание подошвы фундамента и увеличение мощности осадков. Ядро аномалии скорости с двух сторон почти симметрично обрамляют системы изгибов изолиний скорости: внешние (ПК -50 и ПК 10) охватывают изолинии скорости от 3,5 до 7,0 км/с на глубинах 2,5–18,5 км; внутренние (ПК -40 и ПК 0) – $V_p = 3,5-5,0$ км/с на глубинах 1,5–7,5 км. Оси этих ундуляций наклонены от периферии к центру аномалии и маркируют, скорее всего, нарушения разломного характера, что также указывает на рифтовую природу данного блока.

Сопоставление осей ундуляций изолиний скоростей, выделенных на томографическом разрезе, с сейсмической моделью дает основание заключить, что зоны изменений скоростных характеристик в виде парных субпараллельных изгибов изолиний V_p , которые охватывают 6–7 значений и протягиваются на значительную глубину, связаны с тектоническими границами блоков. К тому же на ПК -280 и -200 оси таких зон прослеживаются до поверхности Мохо, что позволяет отнести их к долгоживущим разломам,

вероятно, мантийного происхождения. Одиночные ундуляции изолиний скорости, которые охватывают две – четыре изолинии, отражают структурные неоднородности, обусловленные изменением по латерали геологических характеристик пород (фациальных, гранулометрических, плотностных и др.).

Сопоставление характерных элементов томографического разреза (см. рис. 3) и особенностей сейсмической модели (см. рис. 4) с известными проявлениями углеводородов (УВ) привело к следующим результатам.

Приуроченность известных месторождений нефти и газа к бортам Каркинитского прогиба (рис. 5), для которого в данной работе определена рифтовая природа, позволяет подтвердить известный генетический фактор прогнозирования расположения скоплений УВ в пределах авлакогенов [11].

Выявленные в результате исследований изменения значений скоростей в пределах осадочных пластов согласуются с соответствующими параметрами в слоях, содержащих УВ.

В нефтенасыщенных песчаных коллекторах на глубинах 1,5–3 км скорость продольных волн уменьшается на 6–12 %, а в газонасыщенных – на 15–30 % [1]. На месторождениях Самарской области были получены значения снижения скорости при нефтенасыщенности на 21%, в Азербайджане – на 18% [4]. На полученном томографическом разрезе локальные участки снижения скоростей наблюдаются на шельфе в районе ПК 10–0, -20...-40, -60...-80 (см. рис. 3). Сопоставление положения этих зон уменьшений V_p с уже известными источниками нефти и газа дало хорошее совпадение (см. рис. 5). Первый участок пространственно относится к северной бортовой части Каркинитского прогиба с месторождениями Шмидтовское и Южно-голицинское, второй – к южному борту этого прогиба с месторождениями Прибойная и Крымское, третий находится в пределах Каламитского вала рядом со структурой Ильичевская.

Перспективным на скопления углеводородов может быть участок современного материкового склона (ПК -190...-270), расположенный в пределах мезозойского предконтинентального прогиба, где также отмечено снижение скоростей на томографическом разрезе (см. рис. 3). Поскольку кайнозойский осадочный чехол в пределах этого участка деформирован слабо, его режим, очевидно, близок к платформенному и, таким образом, здесь можно прогнозировать структуры, благоприятные для накопления УВ в породах с соответствующими коллекторскими свойствами [18]. Этот район представляет повышенный интерес в плане аккумуляции углеводородов как за счет накопления органического материала, так и генерации УВ в краевом прогибе за счет влияния трансорового тектонического разлома [5].

В отличие от нефтегазовых образований, в газогидратовмещающих осадках скорости сейсмических волн увеличены на 15–20 % [26]. Согласно расчетам [10] условия для гидратообразования (ГО) в Черном море появляются на глубине свыше 650–670 м, и мощность зоны ГО возрастает в направлении континентального подножия. На томографическом разрезе (см. рис. 3) и сейсмической модели (см. рис. 4) в интервале ПК -150...-190 отмечен участок с повышенными скоростями, который находится в средней части современного континентального склона на глубинах 1100–1300 м в пре-

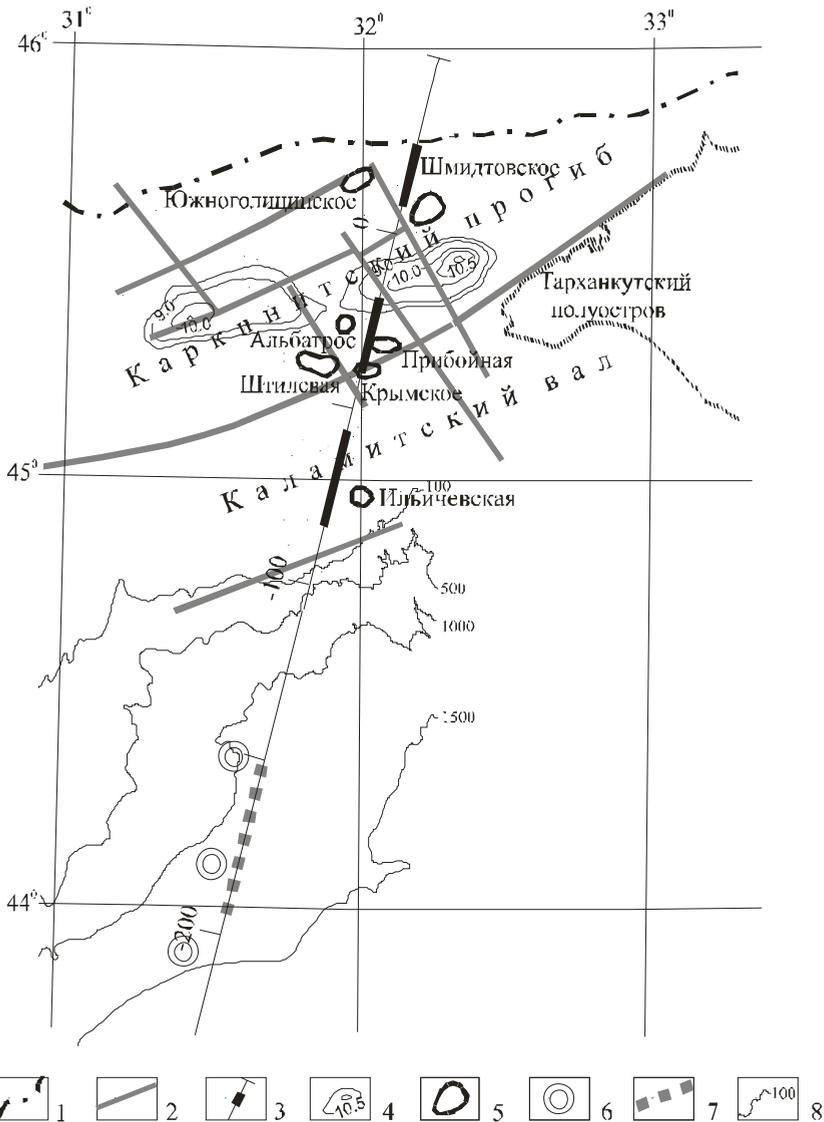


Рис. 5. Схема размещения участков с аномальными скоростями сейсмических волн в осадках, выделенных по результатам томографической инверсии и сейсмического моделирования. 1 – южная граница Восточно-Европейской платформы по [3]; 2 – разломы по [15]; 3 – профиль ГСЗ № 25, утолщениями показаны участки со сниженными скоростями в осадках; 4 – изолинии поверхности фундамента домелового возраста, км; 5 – месторождения углеводородов; 6 – грязевые вулканы по [19]; 7 – участок с повышенными скоростями в осадках; 8 – глубины дна, м

делах площади потенциального развития газогидратов [19] (см. рис. 5). На повышенное содержание газа в осадках данного района указывают три грязевые вулкана, которые расположены рядом с указанной частью профиля. Следует заметить, что этот участок расположен в зоне глубинного разлома, который разделяет Скифскую плиту и субокеаническую Западно-Черноморскую впадину. Можно предположить наличие связанных с этим разломом восходящих потоков флюидов, с которыми поднимается газ, генерирующий газогидраты в верхней части осадочного пласта.

Таким образом, проведенная работа в целом показала возможность использования комплексной томографической и сейсмоструктурной интерпретации данных ГСЗ для выделения в Черном море тектонических элементов земной коры и структур, перспективных на поиски углеводородов.

1. *Авербух А.Г.* Изучение состава и свойств горных пород при сейсморазведке. М.: Недра, 1982. – 231 с.
2. Геологическая история Черного моря по результатам глубоководного бурения. М.: Наука, 1980. – 202 с.
3. Геология шельфа УССР. Тектоника. Киев: Наук. думка, 1987. – 152 с.
4. *Давыдова Л.Н., Березкин В.М.* К обоснованию применения сейсморазведки для прямых поисков месторождений нефти и газа // Прикладная геофизика. – 1976. – № 70. – С. 82–86.
5. *Доленко Г.Н.* Происхождение нефти и газа и нефтегазонакопление в земной коре. К.: Наук. думка, 1986. – 138 с.
6. Земная кора и история развития Черноморской впадины. М.: Наука, 1975. – 358 с.
7. *Козленко В.Г., Козленко М.В.* Строение земной коры переходной зоны Днепровско–Донецкого авлакогена по данным сейсмогравитационного моделирования // Геофиз. журн. – 2007. – 29, № 5. – С. 162–178.
8. *Корягин В.В.* Сейсморазведка нефтегазоперспективных структур малого размера. М.: Недра, 1993. – 264 с.
9. *Кунин Н.Я., Кучерук Е.В.* Сейсмостратиграфия в решении проблем поиска и разведки месторождений нефти и газа, М.: ВИНТИ, сер. Месторождения горючих полезных ископаемых. – 1984. – Т. 13. – 198 с.
10. *Кутас Р.И., Кравчук О.П., Бевзюк М.И., Стахова Л.И.* Результаты геотермических исследований в северной части Черного моря // Геофиз. журн. – 2007. – 29, № 4. – С. 49–65.
11. *Кучерук Е.В., Алиева Е.Р.* Рифтогенез и нефтегазоносность. – М.: ВИНТИ, сер. Месторождения горючих полезных ископаемых. – 1991. – 244 с.
12. *Моргунов Ю.Г., Калинин А.В., Куприн П.Н. и др.* Тектоника и история развития северо–западного шельфа Черного моря., М.: Недра, 1981. – 240 с.
13. Сейсмическая стратиграфия: использование при поисках и разведке нефти и газа. В 2–х томах / Пер. с англ. / Под ред. Ч.Пейтона., М.: Мир, 1983. – 846 с.
14. Сейсмогравитационное моделирование при изучении литосферы / Под ред. В.И. Старостенко, Я.Шванцара., Киев: Наук. думка, 1994. – 292 с.
15. *Старостенко В.И., Пашкевич И.К., Макаренко И.Б., Русаков О.М., Кутас Р.И., Легостаева О.В.* Разломная тектоника консолидированной коры северо–западного шельфа Черного моря // Геофиз. журн. – 2005. – 27, № 2. – С. 195–207.
16. Строение и эволюция земной коры и верхней мантии Черного моря / Под ред. В.В.Белоусова, Б.С.Вольвовского., М.: Наука, 1989. – 292 с.
17. *Туголесов Д.А., Горшков А.С., Мейснер Л.Б., Соловьев В.В., Хахалев Е.М.* Тектоника мезокайнозойских отложений Черноморской впадины. – М.: Недра, 1985. – 215 с.
18. *Чистяков А.А., Щербаков Ф.А.* Седиментационные ловушки континентальных окраин и связанные с ними полезные ископаемые, М.: ЭИ ВИЭМС, 1984. – С. 1–9.
19. *Шнюков Е.Ф.* Газогидраты метана в Черном море // Геология и полезные ископаемые Мирового океана. – 2005. – № 2. – С. 41–52.
20. *Шнюков Е.Ф., Коболев В.П., Стажилов А.Г. и др.* Геология Черного моря, Киев: ОМГОР НАН Украины, 1997. – 188 с.

21. DOBREFraction-99 Working Group. DOBREFraction'99 – velocity model of the crust and upper mantle beneath Donbas Foldbelt (East Ukraine) // *Tectonophysics*. – 2003. – 371. – P. 81 – 110.
22. *Hole J.A.* Non-linear high-resolution three-dimensional seismic travel time tomography // *J. Geophys. Res.* – 1992. – 97, – P. 6553–6562.
23. *Karner G.D., Watts A.B.* On isostasy at Atlantic-type continental margins // *Journ. Geophys. Res.* – 1982. – 87, № B4. – P. 2923 – 2948.
24. Monograph on the Black Sea // *Boll. geofis. teor. applic.*, 1988, v. XXX, N 117–118. – 324 p.
25. *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. – 22. – P. 267–270.
26. *Stoll R.D., Bryan G.N.* Physical properties of sediments containing gas hydrates // *J. Geophys. Res.* – 1979. – 84, N B4. – P. 1629–1634.
27. *Thybo H., Yanik T., Omelchenko V.D. et al.* Upper lithospheric seismic velocity structure across the Pripyat Trough and the Ukrainian shield along the EUROBRIDGE'97 profile // *Tectonophysics*. – 2003. – 371. – P. 41–79.
28. *Zelt C.A.* Modelling strategies and model assessment for wide-angle seismic traveltimes data // *Geophys. J. Int.* – 1999. – 139, – P. 183–204.

Проведено комплексну інтерпретацію сейсмічних даних вздовж профілю ГСЗ № 25 методами томографічної інверсії перших вступів сейсмічних хвиль і сейсмоструктурного моделювання. Проаналізовано особливості розподілу швидкостей та положень сейсмічних границь, на основі чого виділено структурно-тектонічні елементи розрізу. Співставлення отриманих результатів з відомими родовищами нафти й газу та районами потенційного гідратуутворення в Чорному морі показало можливість використання цієї методики для виділення структур, перспективних на пошуки вуглеводнів.

An integrated interpretation of results from the 25 DSS profile has been performed. Peculiarities of velocity distributions and the locations of seismic surfaces have been used to reveal tectonic elements of the cross-section. A comparison of the results obtained with known the oil and gas fields and potential areas of hydrates formations in the Black Sea has demonstrated for ability of this method for mapping prospective hydrocarbon features.