

УДК 551.24:553.98(262.5-16)

Пинус О.В., Асеев А.А.

«Шлюмберже», Москва, Россия, OPinous@slb.com, AAseev@slb.com

Колосков В.Н.

ООО «Лукойл Инжиниринг», Москва, Россия, Vasily.Koloskov@lukoil.com

Хипели Р.В.

Московский филиал «ЛУКОЙЛ Оверсиз Сервис Б.В.», Москва, Россия, Roman.Khipeli@lukoil-overseas.com

Надежкин Д.В.

ООО «Лукойл Инжиниринг», Москва, Россия, Dmitry.Nadezhkin@lukoil.com

ИНТЕРПРЕТАЦИЯ СТРУКТУРНО-ТЕКТОНИЧЕСКОГО СТРОЕНИЯ СЕВЕРО-ЗАПАДНОЙ АКВАТОРИИ ЧЕРНОГО МОРЯ С ЦЕЛЮ ОЦЕНКИ ПЕРСПЕКТИВ ЕЕ НЕФТЕГАЗОНОСНОСТИ

Главной задачей в регионах со сложной тектоникой и структурным строением, где проведение геологоразведочных работ связано с высокими рисками по геометризации возможных перспективных объектов, является получение непротиворечивой структурной интерпретации геолого-геофизических данных.

Представлена комплексная структурно-тектоническая интерпретация геологического строения северо-западной части Черного моря. Подобная интерпретация включает себя не только картирование горизонтов и разломов, но и выполнение палеореконокструкций и проверку концептуальной модели на сбалансированность.

Определены основные тектоно-стратиграфические этапы развития северо-западной части Черного моря; существенно снижены риски, связанные со структурной интерпретацией путем построения геометрически непротиворечивой структурно-тектонической модели, уточнен возраст деформаций и рассчитано приблизительное укорочение/растяжение территории на тот или иной этап геологической эволюции.

Ключевые слова: *структурная интерпретация, Черное море, тектоника, инверсия, палеореконокструкции, структурообразование.*

Введение

Получение непротиворечивых интерпретаций структурного строения является одной из главных задач в практике поисково-разведочных работ. Общеизвестный факт, что геологическая интерпретация сильно дислоцированных объектов зачастую крайне субъективна даже в условиях наличия высококачественных данных. К примеру, варианты интерпретаций разломов (их геометрия, количество и пространственные взаимоотношения) могут значительно различаться у разных интерпретаторов даже при наличии сейсморазведки 3D. Повышение достоверности структурной интерпретации возможно за счет: 1) максимальной интеграции всех имеющихся геолого-геофизических данных для исключения противоречий; 2) проведения детального структурно-тектонического анализа, в том числе выполнение палеореконокструкций и тестирование структурных моделей на сбалансированность.

Структурно-тектонический анализ обычно включает определение основных структурных парагенезов и механизмов контролирующих строение территории, а также реконструкцию ее общей тектонической эволюции и истории формирования главных структур. Основным результатом данной работы – концептуальная модель, которая уже в свою очередь служит основой при проведении интерпретации. Принципиально важно, чтобы полученная модель не содержала противоречий между результатами интерпретаций всех имеющихся данных (сейсморазведка, скважинные отбивки, стратиграфические описания, датировки и пр.) и хорошо вписывалась в региональный контекст. Далее, для контроля качества структурной интерпретации по наиболее репрезентативным разрезам проводятся палеотектонические реконструкции и оценка их структурной сбалансированности. Результаты реконструкций позволяют оценивать качество интерпретации, снижать структурные риски, а также получать поэтапную иллюстрацию истории формирования структур.

В данной статье приводится пример комплексной структурно-тектонической интерпретации в рамках проекта региональной оценки перспектив нефтегазоносности северо-западной части Черного моря.

Методика и объекты исследования

В рамках представленной работы был проведен региональный анализ структурно-тектонического строения северо-западной акватории Черного моря, включая Украинский и Румынский шельфы (рис. 1). Территория исследования характеризуется разнообразным геологическим строением, поскольку включает в себя зоны с различной тектоникой и разной историей осадконакопления (впадины и поднятия Одесского шельфа, глубоководный бассейн Западно-Черноморской впадины (ЗЧВ), области их сочленения). Следует особо отметить значительную дислоцированность региона, присутствие многочисленных разломов разных генераций, крупных несогласий, разнообразных обстановок осадконакоплений от континентальных до глубоководных.

Интерпретация структурного строения выполнялась по материалам сейсморазведки 2D и представляла собой непростую задачу. Помимо сложной геологии, это обусловлено следующими факторами: 1) крайняя неоднородность сейсмических материалов – съемки разных годов и разного качества, зачастую весьма низкой разрешимости; и 2) хаотичность волновой картины и отсутствие прослеживаемости сейсмических отражающих горизонтов в зоне континентального склона, что вызвано нестабильностью процессов седиментации в условиях поступления огромных объемов осадков в неоген-четвертичное время.

Перечисленные факторы в совокупности обычно ведут к высокой неоднозначности структурной интерпретации, если корреляция ведется методом традиционного «ручного»

прослеживания отражающих поверхностей. Это и обусловило необходимость детального изучения региональной тектоники и создания концептуальной структурно-тектонической модели описывающей основные взаимоотношения структурных элементов региона. Создание такой модели включало: 1) выделение наиболее значимых элементов тектонического строения (рифтовых полуграбенов, структур инверсии, комплексов оползневых деформаций и пр.), 2) реконструкцию тектонической истории, в том числе с помощью выполнения палинспатических реконструкций с использованием специализированного ПО. Данная модель, легла в основу интерпретации горизонтов и разломов по сейсмическим данным (и их взаимной увязки), что позволило значительно снизить неоднозначность результатов. Это также дало возможность, определить перспективы образования структурных ловушек в целевой зоне исследования, что являлось одной из главных целей представленных работ.

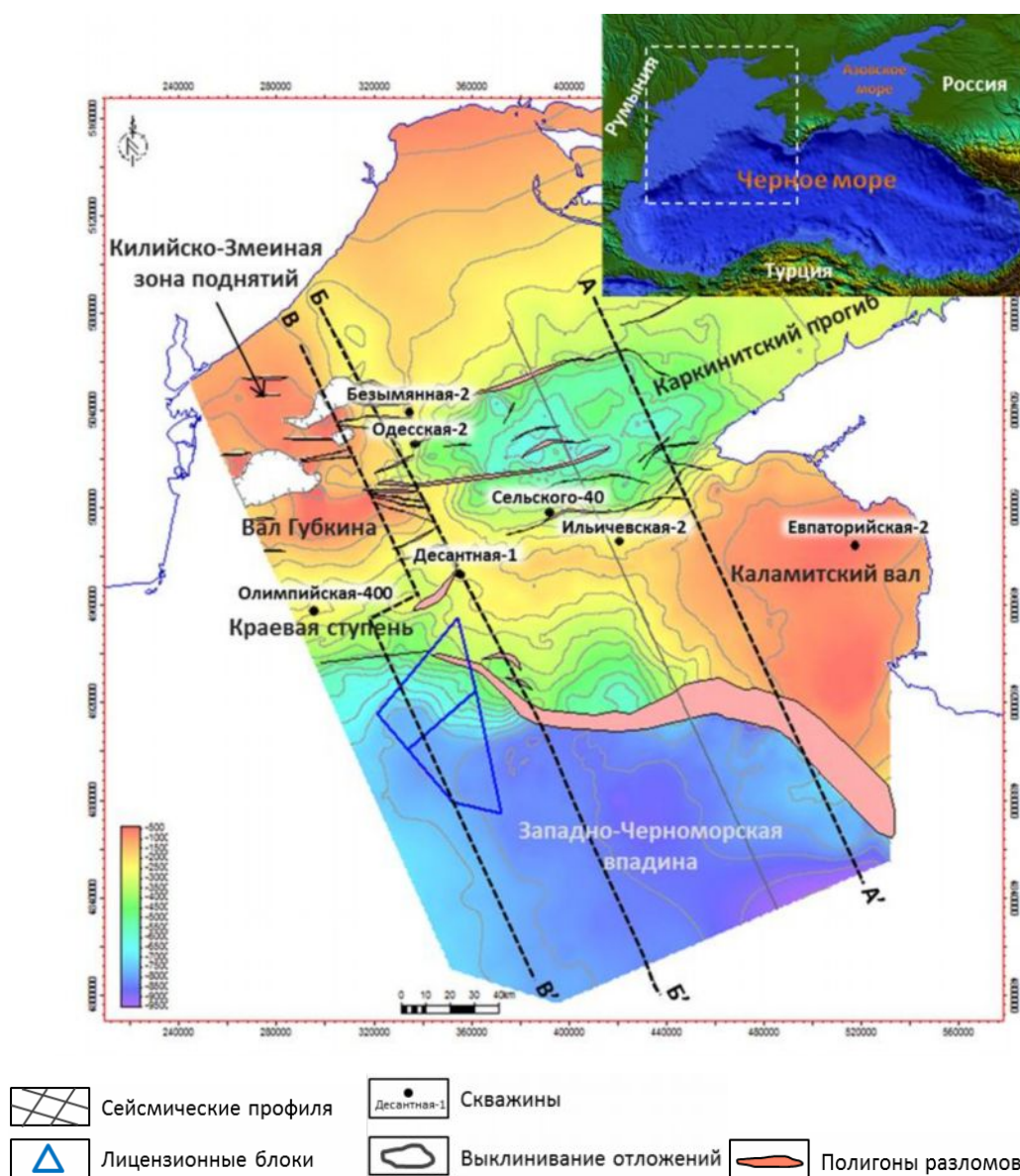


Рис. 1. Обзорная карта и тектоническая схема Северо-Западной акватории Черного моря

Краткий геологический обзор региона

Тектоно-стратиграфическая схема изучаемого региона приведена на рис. 2.

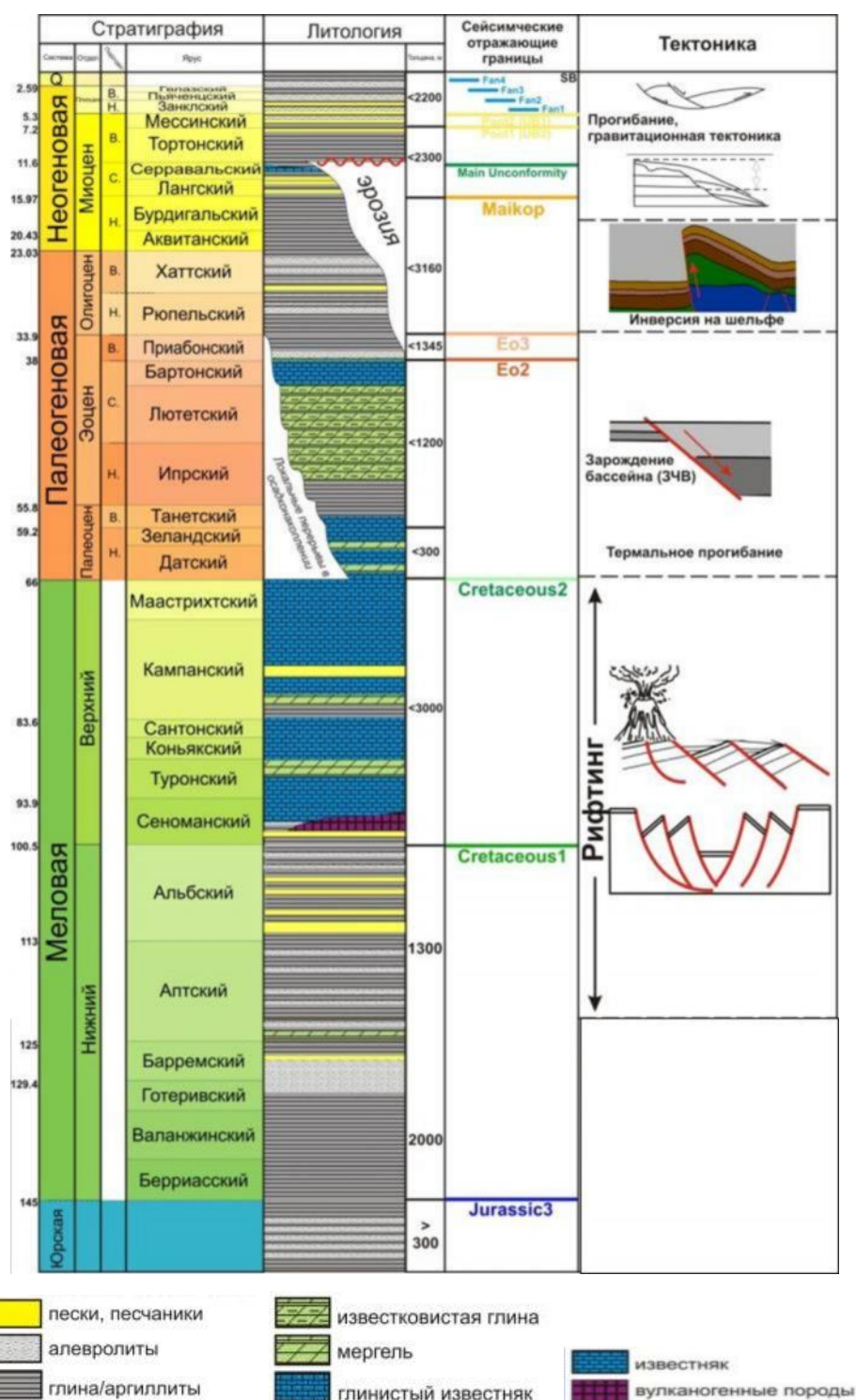


Рис. 2. Тектоно-стратиграфическая схема изучаемого района

В пределах региона исследования на востоке четко выделяются такие крупномасштабные тектонические элементы как Каркинитский прогиб, ЗЧВ и разделяющий их Каламитский вал (рис. 3а). При этом контакт Каламитского вала и ЗЧВ проходит по крупному региональному разлому сбросового типа. В литературе данный разлом

определяется как Северо-Эвксинский [Гожик и др., 2006]. В западном направлении структуры Каламитского вала и Каркинитского прогиба становятся менее ярко выраженными. На западе территории зона шельфа значительно дислоцирована и представлена серией высокоамплитудных поднятий и прогибов (рис. 3б, в): Крыловским прогибом, Змеиной зоной поднятий, Валом Губкина и Краевой ступенью. Переход от шельфа к впадине здесь выражен через плавное прогибание, обусловленное присутствием мощного клина неоген-четвертичных осадков (выше кровли майкопской серии). Как видно на рис. 3б и 3в, в районе континентального склона и впадины увеличиваются толщины неоген-четвертичного интервала (от кровли майкопа и выше).

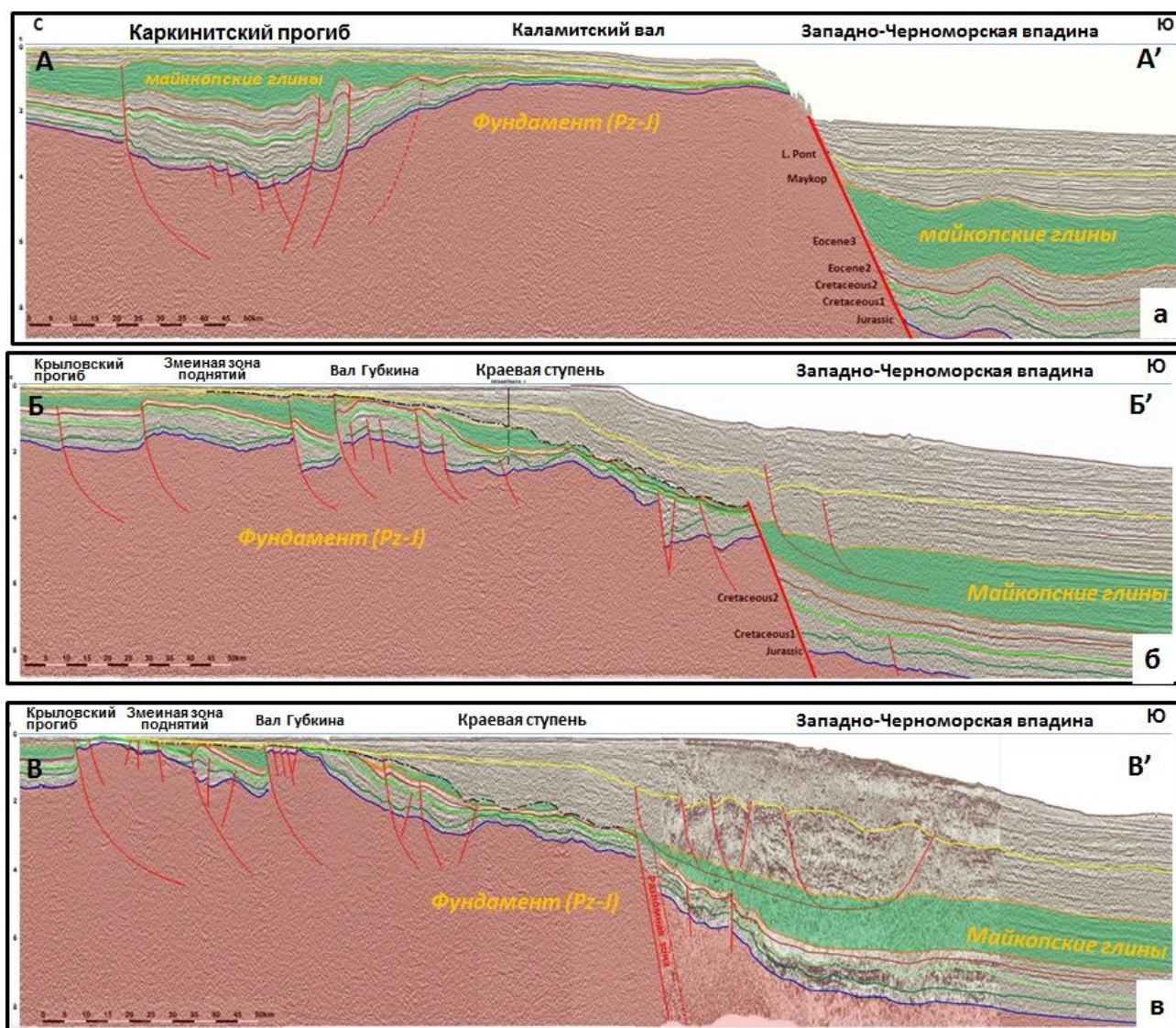
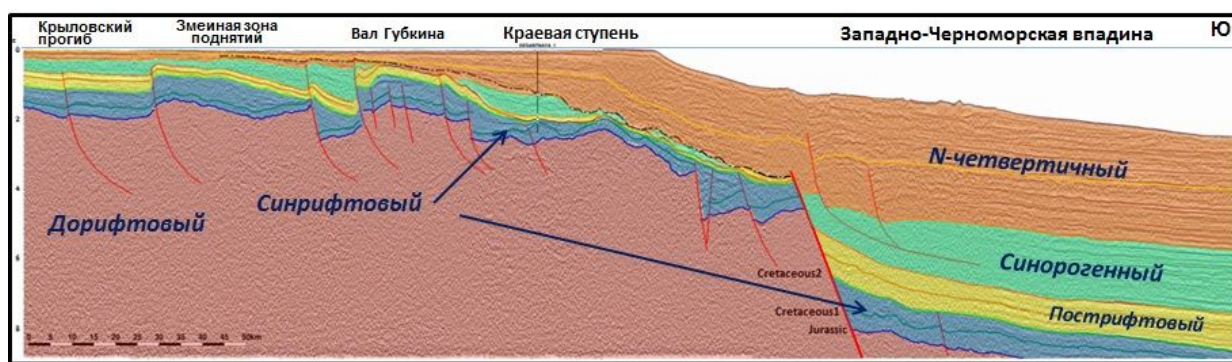


Рис. 3. Основные тектонические элементы Северо-Западной акватории Черного моря
а – профиль А-А' и выделение тектонических элементов; *б* – профиль Б-Б' и выделение тектонических элементов; *в* – профиль В-В' и выделение тектонических элементов.

Элементы структурного строения региона

В первую очередь, по материалам сейсморазведки 2D, был проведен анализ взаимоотношений отражающих поверхностей, что дало возможность определить следующие элементы структурного строения, характеризующие тектонику и структурообразование в регионе исследования.

Рифтовые полуграбены. Асимметричные грабены (полуграбены) наблюдаются на сеймопрофилях в стратиграфическом интервале ниже- и верхне-меловых отложений (рис. 3, 4). По размеру они варьируют в пределах 5-20 км в ширину, тогда как мощностью заполняющих их осадков может достигать 1,5 км. Данные полуграбены наблюдаются как на территории Одесского шельфа, так и в ЗЧВ, что дает возможность провести прямое сопоставление (корреляцию) этих зон.



- | | |
|------------------|--|
| • N-четвертичный | $Mi_2 - Q$. Прогибание, грав. тектоника |
| • Синорогенный | $Pg_3 - Mi_1$. Инверсия, складчатость на шельфе |
| • Пострифтовый | $Pg_1 - Pg_2$. Термальное прогибание, заложение ЗЧВ |
| • Синрифтовый | $K_1a1 - K_2$. Растяжение, формирование полуграбен |
| • Дорифтовый | $Pz - K_1$ |

Рис. 4. Основные этапы тектонического развития региона, выделенные на сейсмике

Структуры инверсии. Данные элементы наблюдаются в области Одесского шельфа и представляют собой серию крупных антиклинальных складок субширотной ориентации. Основным признаком инверсии является увеличением толщин меловых пород в осевых зонах антиклиналей. Это свидетельствует о том, что некоторые из сформировавшихся ранее рифтовых полуграбен были инвертированы в результате процессов регионального сжатия.

Северо-Эвксинский (краевой) разлом. Данный разлом является наиболее ярко выраженным нарушением и прослеживается наиболее четко на востоке территории вблизи полуострова Крым. Он представляет собой значительное смещение по типу сброс, которое определяет контакт зоны Одесского шельфа с ЗЧВ. В непосредственной близости от Крыма

разлом достигает морского дна у подножия континентального склона. Далее к западу, он становится менее ярко выраженным и постепенно закрывается неоген-четвертичными осадками.

Депозентр впадины Истрия. Картирование мощностей неоген-четвертичных осадков показывает присутствие крупнейшего регионального депозентра на западе исследуемой территории в непосредственной близости от целевых участков. В румынской литературе зона депозентра определяется как впадина Истрия, которая является частью Западно-Черноморского бассейна. Высокие скорости седиментации обусловлены поступлением огромных масс терригенного материала со стороны крупных рек, таких как Дунай, Днепр, Днестр и Южный Буг.

Комплексы оползневых деформаций. Аккумуляция мощных толщ неоген-четвертичных осадков сопровождалась процессами уплотнения и гравитационного смятия, что выразилось в присутствии многочисленных оползневых деформаций в зоне континентального склона. На сейсмических профилях наблюдаются как разломы сбросового типа, сопровождающиеся присбросовыми складками (roll-over), так и надвиговые структуры далее в направлении бассейна.

Общий механизм формирования оползневого комплекса объясняется следующим образом. Смещение значительных масс осадков вниз по склону в результате действия гравитационных сил ведет к листрическим сбросам в ближней зоне склона, которые компенсируются структурами сжатия в виде надвигов и сопутствующих складок далее в бассейне. Смещения происходили по поверхностям срыва (или скольжения), образующихся в интервале глинистых отложений майкопской толщи.

Палеотектоническiereконструкции

Анализ описанных выше структурных элементов и результаты геомеханических палеорекопструкций, вместе с обобщением результатов региональных тектонических исследований [Афанасенков, Никишин, Обухов, 2007; Dinu et al., 2005] позволили определить основные этапы тектонического развития региона (рис. 4):

1. **Син-рифтовый** (альб-конец позднего мела).
2. **Пост-рифтовый** (палеоцен-эоцен).
3. **Инверсионный или син-орогенный** (олигоцен – ранний миоцен).
4. **Пост-инверсионный** (миоцен – настоящее время).

Структурно-тектонические реконструкции исследуемой территории были проведены на двух типовых разрезах, что позволило протестировать структурные интерпретации на сбалансированность, а также проиллюстрировать тектоническую историю региона.

Использовалась методика геомеханического восстановления, при котором восстановление происходит согласно физическим свойствам пород.

Син-рифтовый. Основными признаками процессов рифтинга являются упомянутые выше асимметричные грабены (полуграбены), которые характеризуют рифтовый период тектонического развития территории. Процесс рифтинга также сопровождался вулканизмом, что подтверждается присутствием вулканических пород вскрытых в скв. Ильичевская-2.

Согласно палеореконструкциям, относительное растяжение во время мелового рифтогенеза (рис. 5, 6) составило ~ 4-5 км как в области Одесского шельфа, так и в районе ЗЧВ.

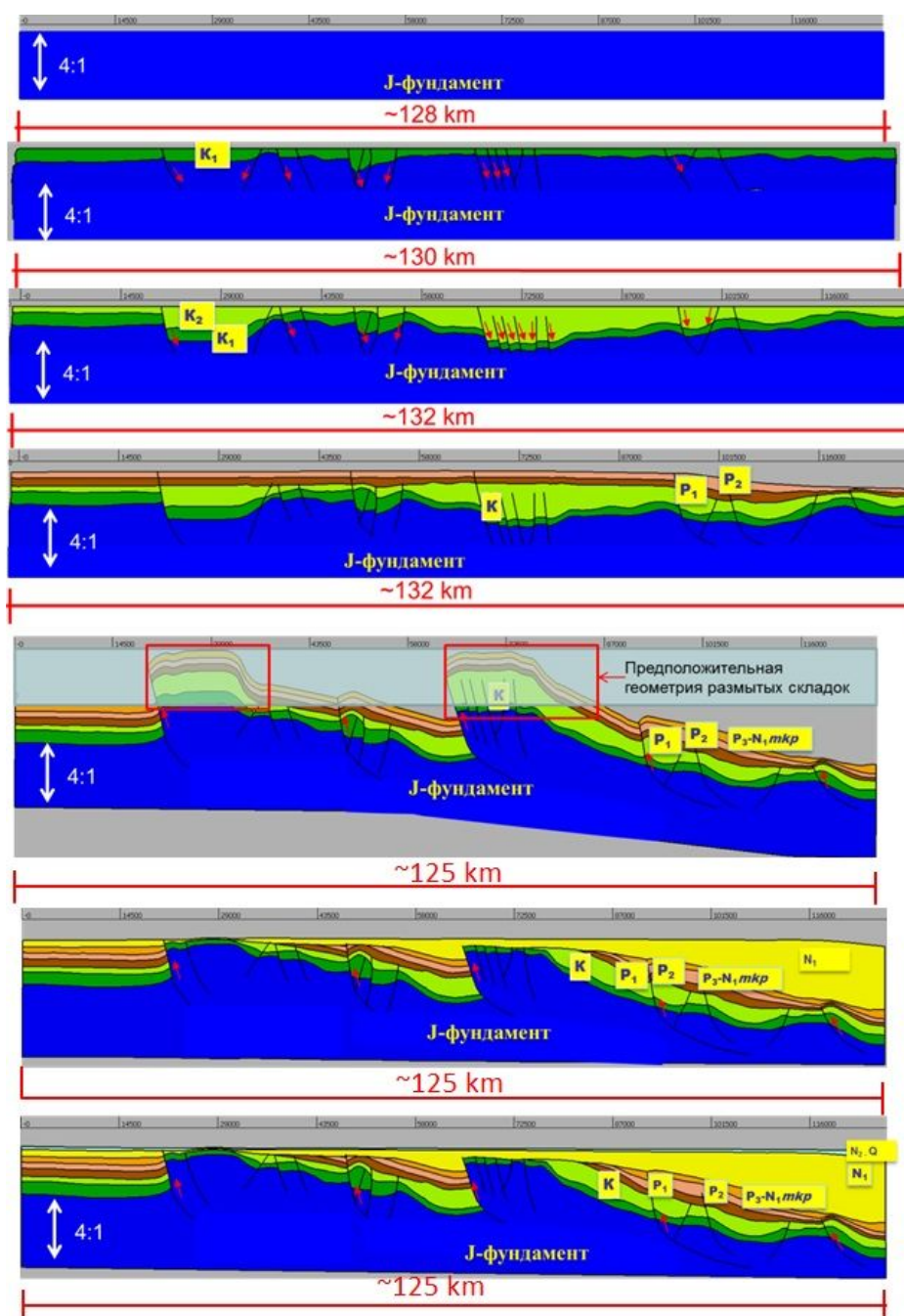


Рис. 5. Тектонические реконструкции сейсмического профиля Б-Б' (шельфовая часть)

Положение разреза показано на рис. 1.

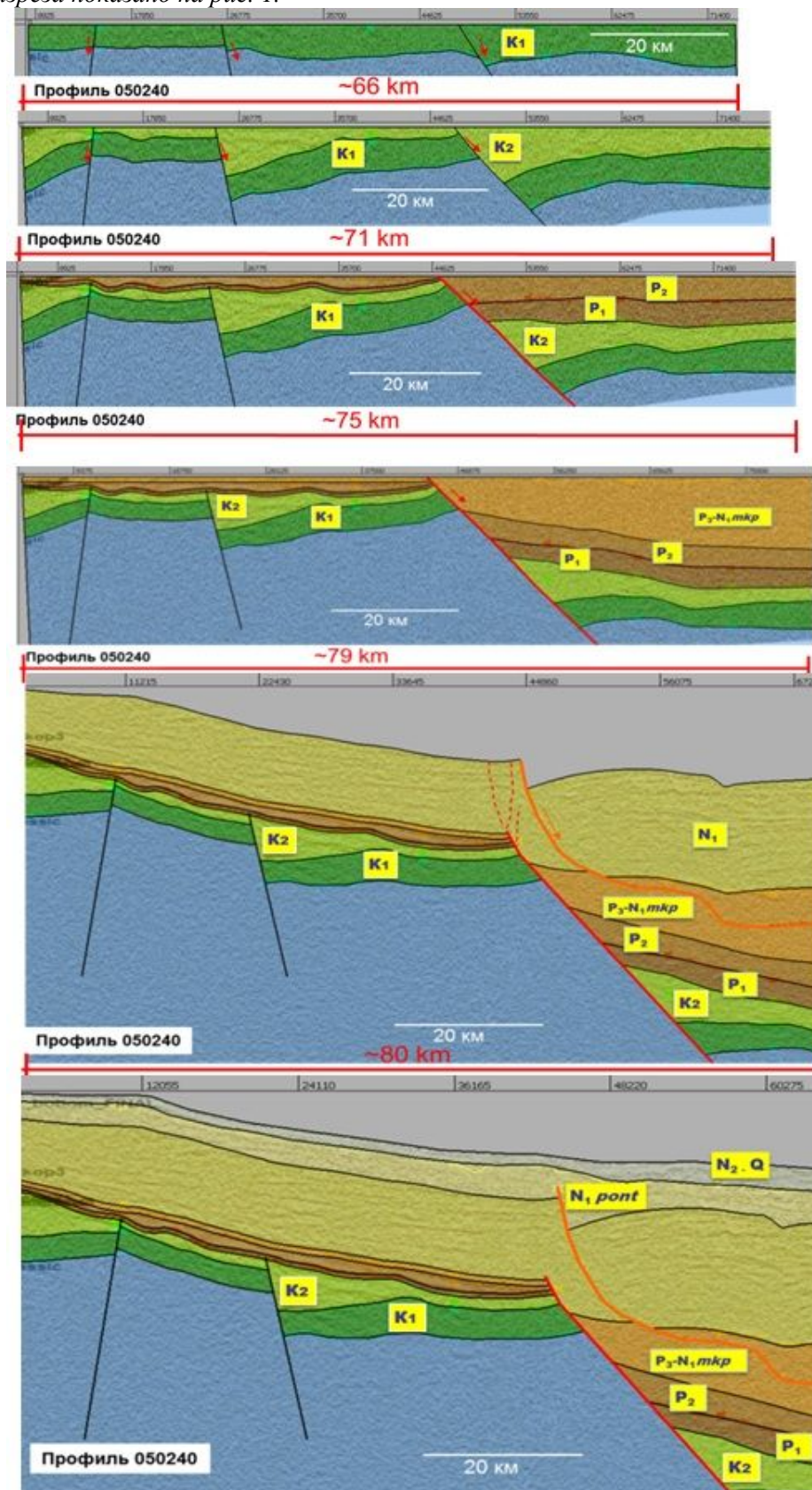


Рис. 6. Тектонические реконструкции сейсмического профиля Б-Б' (бассейновая часть)
Положение разреза показано на рис. 1

Пост-рифтовый (палеоцен-эоцен). На данном этапе тектонического развития происходило термальное прогибание, активизировавшееся главным образом на территории современной ЗЧВ, о чем свидетельствует увеличенные здесь, в сравнении с шельфовой зоной, толщины осадков.

Предполагается, по одному из существовавших ранее рифтовых разломов, расположенному вблизи края современной шельфовой зоны, произошли значительные сбросовые движения (см. рис. 3, 6). Дальнейшее развитие прогибания и смещение по данному разлому определило зарождение и первичное формирование бассейна ЗЧВ. Возможно уже в этот период сформировалась седиментационная емкость глубокого моря ЗЧВ, которая заполнялась осадками вплоть до настоящего времени.

На палеореконструкциях заложение «главного» Краевого (Северо-Эвскинского) разлома продемонстрировано на профиле, проходящем через ЗЧВ (см. рис. 6). Растяжение территории по профилю в результате активности Северо-Эвскинского разлома на пост-рифтовом этапе составило около 4 км.

Инверсионный или син-орогенный (олигоцен – ранний миоцен). На данном этапе, в результате значительных региональных сжатий со стороны Понтида, на шельфе произошла инверсия сформировавшихся ранее рифтовых структур (полуграбенов). Структуры были инвертированы, когда по разломам, определявшим главные борта полуграбенов, произошли значительные взбросовые смещения, в результате чего сформировалась серия крупных антиклинальных складок разделенных прогибами. Предполагается, что данные складки стали подвергаться значительной эрозии за счет их быстрого тектонического роста с олигоценового времени.

Инверсионные складки были проинтерпретированы по данным сейсмической интерпретации и затем восстановлены. Укорочение территории в активную фазу складчатости, на син-орогенном этапе, составляет около 7-8 км по району Одесского шельфа (см. рис. 5). Существующая структурная интерпретация предлагает наиболее простую геометрию складок – складки продвижения разлома (fault propagation fold). Вполне вероятно складки имели более сложную геометрию и, следовательно, территория подвергалась более сильному укорочению за счет процессов тангенциального сжатия.

На данном этапе формировались антиклинальные ловушки углеводородов (УВ) на «шельфе», приуроченные к взбросо-надвиговым складкам, например, залежь месторождения Олимпийское.

В это же время в бассейновой части (ЗЧВ), вероятно, продолжалось прогибание и развитие Северо-Эвскинского разлома, с растяжением по реконструированному профилю около 4 км (см. рис. 6).

Пост-инверсионный (миоцен – настоящее время). Данный этап характеризуется накоплением значительных толщ осадков в ЗЧВ с депоцентром во впадине Истрия и флексурным прогибанием Западно-Черноморского бассейна.

Аккумуляция больших объемов осадков сопровождалась активными процессами гравитационной тектоники с формированием разломов роста и оползневых комплексов. Это обусловило развитие достаточно крупных антиклинальных структур в районе континентального склона и в ЗЧВ.

В эпоху активного прогибания бассейна и накопления мощных толщ миоценовых осадков, в зоне активности главного разлома, проявляется гравитационная тектоника с образованием листрических сбросов в зоне Краевого разлома и с компенсирующими их гравитационными надвигами типа toe-thrust в бассейновой части (см. рис. 6). Подобные структуры в зарубежной литературе получили название гравитационных складчатых поясов – gravitational fold belts. Подобные гравитационные складчатые системы поддаются процедуре геометрической балансировки, что предполагает их геологическую достоверность.

В результате флексурного прогибания ЗЧВ, и, связанным с этим развитием и гравитационных процессов, относительное растяжение по разрезу составило порядка 1-1,5 км.

На данном этапе формировались антиклинальные ловушки УВ приуроченные к так называемым областям гравитационной складчатости. При чем ловушки могут быть как в присбросовой антиклинали (rolloveranticline), так и в надвиговой части гравитационного комплекса. В мировой практике открытия залежей УВ в подобного рода структурных объектах далеко не редкость (рис. 7).

Заключение

Проведение структурно-тектонического анализа позволило создать непротиворечивую модель структурообразования и истории тектонического развития региона. Данная модель легла в основу структурной интерпретации по всем профилям 2D, что позволило значительно снизить ее неоднозначность. Проведение процедур восстановления и балансировки разрезов подтвердило геометрическую достоверность структурных построений.

В зонах растяжения, где происходит отрыв оползневых масс, это присбросовые антиклинальные складки (roll-over anticlines), которые могут быть дополнительно осложнены разломами. В зонах сжатия ловушки могут образовываться в принадвиговых складках (toe-thrust anticlines). Геометрическая достоверность таких структур определяется сбалансированностью разрезов. Дополнительные перспективы могут представлять собой

зоны стратиграфических выклиниваний и экранирования в глубоководных и склоновых фациях.

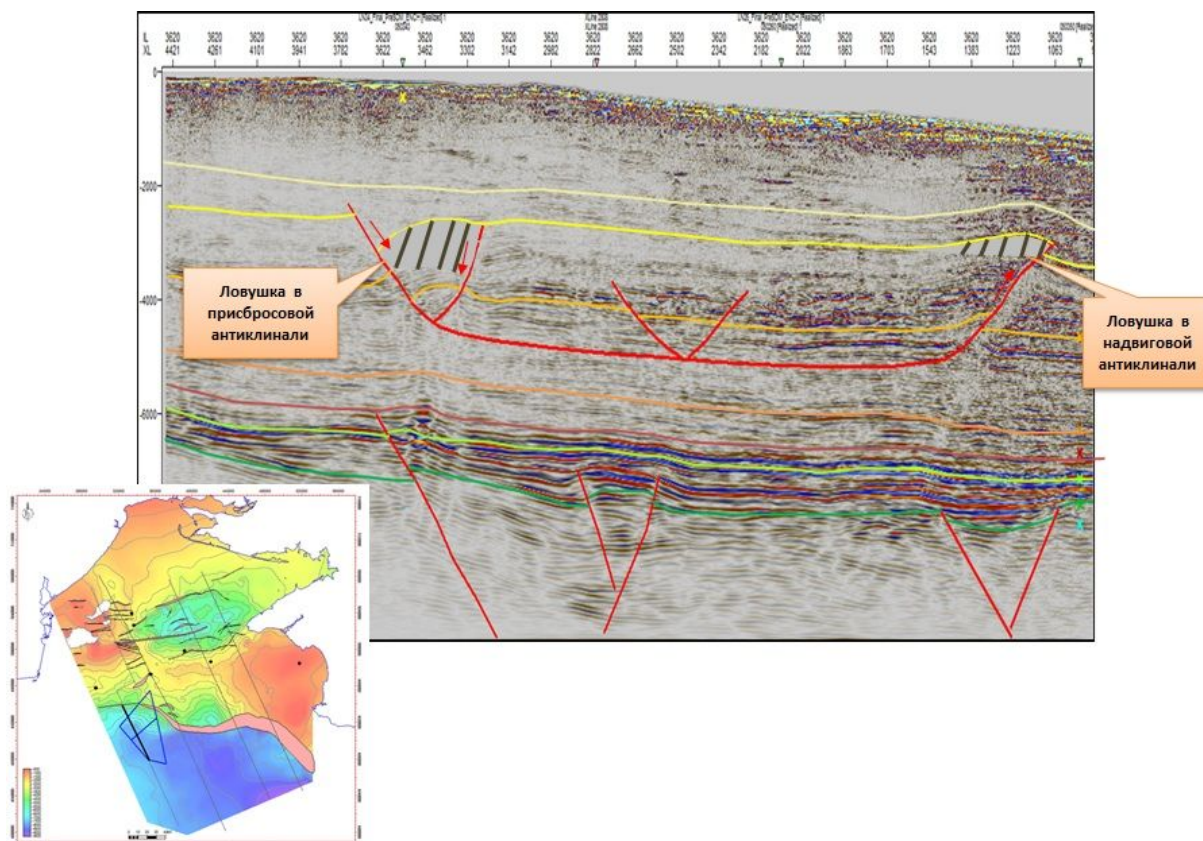


Рис.7. Концептуальная схема возможных структурных ловушек в гравитационных поясах складчатости

Изучение мировых аналогов показало, что пояса гравитационной складчатости (gravitational fold belts) в глубоководных зонах являются весьма перспективным типом объектов для поиска и разведки залежей нефти и газа [Rowanand, Peel, Vendeville, 2004]. За последнее десятилетие поисковые работы, нацеленные на такого рода объекты значительно активизировались в связи с развитием технологий бурения и добычи в глубоководье. Представляется, что подобные объекты должны представлять значительные перспективы для поисковых работ в Черном море, в том числе и за пределами исследованного участка.

Литература

Афанасенков А.П., Никишин А.М., Обухов А.Н. Геологическое строение и углеводородный потенциал Восточно-Черноморского региона. - М.: Научный мир. - 2007. - 172 с.

Гожик П.Ф., Маслун Н.В., Плотникова Л.Ф., Іванік М.М., Якушин Л.М., Іщенко І.І. Стратиграфія мезокайнозойських відкладів північно-західного шельфу Чорного моря. К.: Інститут геологічних наук НАН України. - 2006. - 171 с.

Dinu C., Wong H.K., Tambrea D., Matenco L. Stratigraphic and structural characteristics of the Romanian Black Sea shelf // *Tectonophysics*. - 2005. - No. 410. - P. 417-435.

Rowan M.G., Peel F.J., and Vendeville B.C. Gravity-driven fold belts on passive margins, in *Thrust tectonics and hydrocarbon systems* edited by K.R. McClay // *AAPG Memoir*. - 2004. – Vol. 82. - P. 157–182.

Pinus O.V., Aseev A.A.

Schlumberger, Moscow, Russia, OPinous@slb.com, AAseev@slb.com

Koloskov V.N.

LLC «Lukoil Engineering», Moscow, Russia, Vasily.Koloskov@lukoil.com

Khipeli R.V.

Moscow branch «Lukoil Overseas Service B.V.», Moscow, Russia, Roman.Khipeli@lukoil-overseas.com

Nadezhkin D.V.

LLC «Lukoil Engineering», Moscow, Russia, Dmitry.Nadezhkin@lukoil.com

INTERPRETATION OF TECTONIC STRUCTURE OF NORTHWESTERN OFFSHORE OF THE BLACK SEA FOR EVALUATION OF PETROLEUM POTENTIAL PROSPECTS

The main challenge for regions with complex tectonics and structure where exploration activities are associated with high risk for geometrization of possible promising objects is to obtain a consistent structural interpretation of geological and geophysical data.

A comprehensive structural-tectonic interpretation of geological structure of the northwestern part of the Black Sea is presented. Such interpretation includes not only mapping of layers and faults, but also performing of paleoreconstructions and checking the balance of a conceptual model.

The main tectonic and stratigraphic stages of development of the northwestern part of the Black Sea are determined; the risks associated with the structural interpretation are reduced significantly by creating of geometrically consistent structural-tectonic model, the age of deformations is clarified and estimated shortening / stretching of the area for one or another stage of geological evolution are calculated.

Keywords: structural interpretation, the Black Sea, tectonics, inversion, paleoreconstruction, structure development.

References

Afanasenkov A.P., Nikishin A.M., Obukhov A.N. *Geologicheskoe stroenie i uglevodorodnyy potentsial Vostochno-Chernomorskogo regiona* [Geological structure and hydrocarbon potential of the Eastern Black Sea region]. Moscow: Nauchnyy mir, 2007, 172 p.

Dinu C., Wong H.K., Tambrea D., Matenco L. Stratigraphic and structural characteristics of the Romanian Black Sea shelf. *Tectonophysics*, 2005, no. 410, p. 417-435.

Gozhik P.F., Maslun N.V., Plotnikova L.F., Ivanik M.M., Yakushin L.M., Ishchenko I.I. *Stratigrafiya mezokaynozoy's'kikh vidkladiv pivnichno-zakhidnogo shel'fu Chornogo morya* [Stratigraphy of Mesozoic-Cenozoic deposits of the northwestern Black Sea shelf]. Kiev: Institut geologichnikh nauk NAN Ukraïni, 2006, 171 p.

Rowan M.G., Peel F.J., Vendeville B.C. Gravity-driven fold belts on passive margins, in *Thrust tectonics and hydrocarbon systems* edited by K.R. McClay. AAPG Memoir, 2004, vol. 82, p. 157–182.