

СТРУКТУРНО-ТЕКТОНИЧЕСКИЕ И ФЛЮИДО-ДИНАМИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ГЛУБИННОЙ ДЕГАЗАЦИИ МЕГАВПАДИНЫ ЧЕРНОГО МОРЯ

В. Коболев^{1*}

¹Отдел петромагнетизма и морской геофизики, Институт геофизики им. С.И. Субботина НАН Украины, Киев, Украина

*Ответственный автор: e-mail kobol@igph.kiev.ua, тел. +380444242152

STRUCTURAL, TECTONIC AND FLUID-DYNAMIC ASPECTS OF DEEP DEGASSING OF THE BLACK SEA MEGATRENCH

V. Kobolev^{1*}

¹Petromagnetism and Marine Geophysics Department, Institute of Geophysics named after S.I. Subbotin of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

*Corresponding author: e-mail kobol@igph.kiev.ua, tel. +380444242152

ABSTRACT

Purpose. The problematical and controversial issues related to active gassing, deep structure, formation and evolution of the Black Sea are discussed.

Methods. Geological and geophysical data (sonar, seismic and seismological research, involving potential fields' modelling results), obtained in recent years in the Azov-Black Sea region, were subjected to complex interpretation.

Findings. It is proved that there is a significant difference in the formation mechanisms of the main structural units of the Black Sea megatrench – the Western and Eastern trenches. Thermodynamic conditions, a limited amount of biomass in the sedimentary filling of the Black Sea megatrench and the confinedness of the gas seeps to the consolidated crust split testify to the abiogenic nature of methane. Interaction of powerful rising hydrocarbon flow with different structures of the sedimentary mantle and basement led to the formation of numerous hydrocarbon deposits in the Black Sea megatrench.

Originality. Analysis of the plume-tectonic mechanism of deep degassing made it possible to assess the role of geodynamic factors related both to the evolution of the Black Sea megatrench and the genesis of hydrocarbons from a new perspective.

Practical implications. Analysis of deep fluids migration routes and deep energy unloading zones will allow to develop a new strategy for oil and gas deposits exploration and to work out a non-standard approach to the evaluation of hydrocarbon reserves in the Black Sea oil and gas megabasin.

Keywords: Black Sea megatrench, gassing, deep structure, formation, evolution, plume tectonics

1. ВВЕДЕНИЕ

В зоне тектонического взаимодействия южного края Восточно-Европейской платформы и северной ветви Альпийско-Гималайского горно-складчатого пояса расположен один из самых сложных в мире тектоно-геодинамических узлов – мегавпадина Черного моря. Изменение геодинамического режима в течение геологического времени не могло не отразиться на ее сложном, пока еще недостаточно изученном, глубинном строении. Необычная структурно-тектоническая геометрия, не соответствующая укоренившимся моделям континентального растяжения коры, до настоящего времени оставляет вопросы глубинного строения, происхождения и эволюции Черного моря предметом оживленной дискуссии (Graham, Kaumaksi, & Horn, 2013; Nikishin et al., 2015; Nikishin et al., 2015;

Glumov, Gulev, Senin, & Karnaukhov, 2014; Starostenko et al., 2015; Gintov, Tsvetkova, Bugaenko, & Murovskaaya, 2016; Yanovskaya, Gobarenko, & Egorova, 2016; Kobolev, 2016). В частности, остаются нерешенными вопросы о времени и механизме образования как самой мегавпадины Черного моря в целом, так и ее западной и восточной составляющих.

Учитывая огромные масштабы дегазации дна Черного моря, разрабатывать стратегию поисков залежей нефти и газа без изучения их генезиса, а также анализа путей миграции глубинных флюидов, зон разгрузки глубинной энергии представляется неэффективным. Решение этих задач позволит нестандартно подойти к поиску залежей нефти и газа и обосновать настоящие масштабы углеводородного потенциала Черноморского нефтегазоносного мегабассейна (Lukin, 2015).

При рассмотрении явления дегазации Земли, которое более 100 лет назад обосновал В.И. Вернадский, следует вести речь о ее двух формах. А именно, помимо извержения газов наземными и подводными вулканами, следует учитывать менее заметную, но, возможно, еще более масштабную – холодную форму дегазации недр.

Ярким свидетельством такой беспрецедентной по интенсивности холодной формы газовой разгрузки являются газовые сипы, факелы, фонтаны, обнаруженные на дне Черного моря (Egorov, Artemov, & Gulin, 2011; Shnyukov, Kobolev, & Pasynkov, 2013). Последние, наряду с грязевыми вулканами, представляют собой уникальную природную лабораторию для изучения средообразующего и ресурсного феномена Черноморского нефтегазоносного мегабассейна.

Анализ геолого-геофизических и геохимических данных по другим нефтегазоносным бассейнам мира однозначно свидетельствуют о том, “что главным фактором формирования нефтяных и газовых месторождений являются не древние геологически длительные катагенетические процессы “капельной” первичной миграции при тектоническом погружении обогащенных биогенной органикой осадочных толщ, а глубинная дегазация Земли”.

Что касается акватории Черного моря, то на сегодняшний день в достаточной мере обоснована непосредственная связь месторождений углеводородов с дизъюнктивными узлами – зонами пересечения глубинных разломов, активизированных в разные эпохи геологической истории. Нельзя не согласиться с А.Е. Лукиным, что происходившее в этих узлах мощное накопление углеводородов, наряду с интенсивной газовой разгрузкой дна, трудно удовлетворительно объяснить без привлечения глубинной составляющей (Lukin, 2015). Существенным является и тот факт, что максимальное проявление этого глобального явления связывается с плюм-тектоникой. Последнее обстоятельство явилось определяющим для привлечения процессов плюм-тектонической глубинной дегазации к истолкованию роли геодинамических факторов связанных как с эволюцией мегавадины Черного моря, так и с генезисом углеводородов.

Процессы генерация, миграции и аккумуляции углеводородов являются фундаментальными проблемами нефтегазовой геологии. Идея В.И. Вернадского о глобальном геохимическом круговороте вещества на нашей планете может служить объединяющим началом сближения биогенной и абиогенной гипотез генезиса месторождений нефти и газа. Так биогенная гипотеза объясняет роль механизма преобразования органического вещества в нефть и газ на нисходящей ветви круговорота, а абиогенная гипотеза – на восходящей. Таким образом, совокупность этих двух гипотез можно рассматривать как взаимодополняющие систему представлений, которые отражают два основных механизма формирования углеводородов в процессе глобального геохимического круговорота.

В настоящей статье обсуждаются структурно-тектонические и флюидодинамические аспекты активного газовой выделения, глубинного строения и плюм-тектонического истолкования роли флюидодинамических факторов связанных как с эволюцией Черноморской мегавадины, так с генезисом углеводородов.

2. ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

2.1. Явление активного газовой выделения со дна Черного моря

Явление активного газовой выделения со дна Черного моря известно достаточно давно. Во время Крымского землетрясения 11 сентября 1927 года известный советский геолог, профессор С.П. Попов наблюдал между Севастополем и мысом Лукулл серию огромных вспышек огня. Их причиной явились выбросы метана в результате тектонических нарушений земной коры, которые вызвали это катастрофическое событие.

Вместе с тем факт существования дискретных газопроявлений со дна Черного моря впервые стал достоянием научной общественности только через 60 лет в 1989 году (Polikarpov & Yehogov, 1989). За прошедшие с тех пор более четверти века в результате проведения гидроакустических наблюдений в Черном море удалось обнаружить около четырех тысяч газовых проявлений в виде многочисленных сипов, факелов и фонтанов (Egorov, Artemov, & Gulin, 2011; Shnyukov, Kobolev, & Pasynkov, 2013).

Газовые выходы зафиксированы практически по всему периметру Черного моря (Рис. 1) и приурочены в основном к внешнему шельфу и верхней части материкового склона на глубинах 50 – 800 м (Рис. 2).

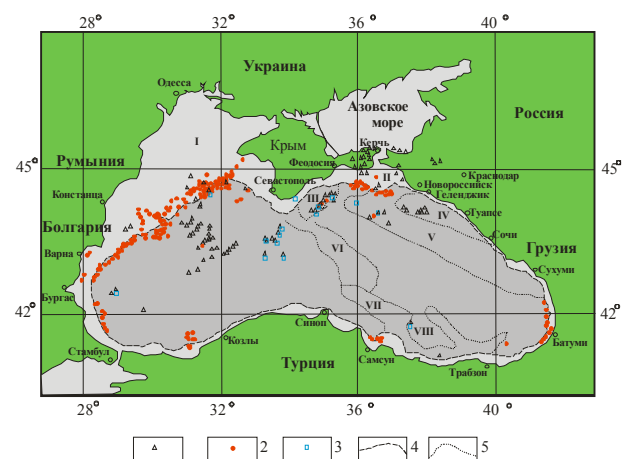


Рисунок 1. Распределение грязевых вулканов (1), газовых сипов (2) и газогидратов (3) в акватории Черного моря (Shnyukov, Kobolev, & Pasynkov, 2013): 4 – граница шельфа; 5 – границы тектонических структур: I – Северо-западный шельф; II – Керченско-Таманский прогиб; III – прогиб Сорокина; IV – Туапсинский прогиб; V – поднятие Шатского; VI – хребт Андрусова; VII – хребт Архангельского; VIII – Гиресунская впадина

Следует отметить, что используемые в настоящее время термины форм газовой выделений со дна Черного моря, как в отечественных, так и зарубежных научных публикациях, приводят к их различному толкованию. В этой связи представляется целесообразным упорядочить терминологию и систематизировать различные формы газопроявлений на морском дне. Подобно передачи тепловой энергии из недр в виде рассеянного (кондуктивного) и сосредоточенного (конвективного) потока, представляется логичным выделить две принципиально подобные формы газовой выделений со дна морей и океанов.

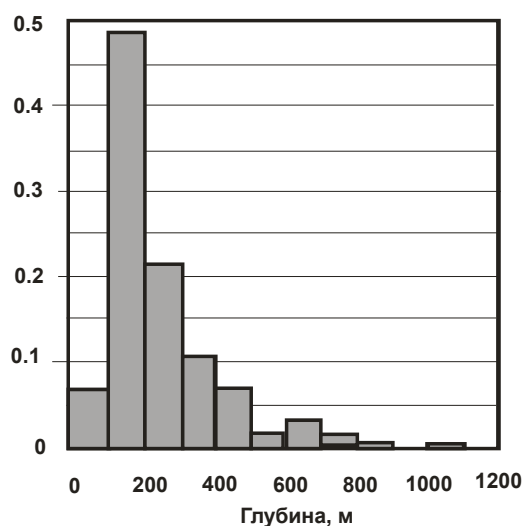


Рисунок 2. Распределение сипов по глубине (Egorov, Artemov, & Gulin, 2011)

В первом случае рассеянная форма газоотдачи дна реализуется в виде пузырьковых струй, которые имеют непрерывный или пульсирующий характер, количество которых может достигать до 20 на квадратном метре дна моря. О ее значимости свидетельствуют результаты экспериментальных исследований, полученные на Болгарском шельфе, где с 1 м² поверхности дна из осадков выделяется от 21 до 167 см³ метана в год (Trotskyuk, 1982).

Ко второй сосредоточенной (конвективной) форме газовых выходов со дна Черного моря относятся дискретные струйные проявления в виде (по мере увеличения мощности) сипов, факелов и фонтанов грязевых вулканов (Рис. 3).

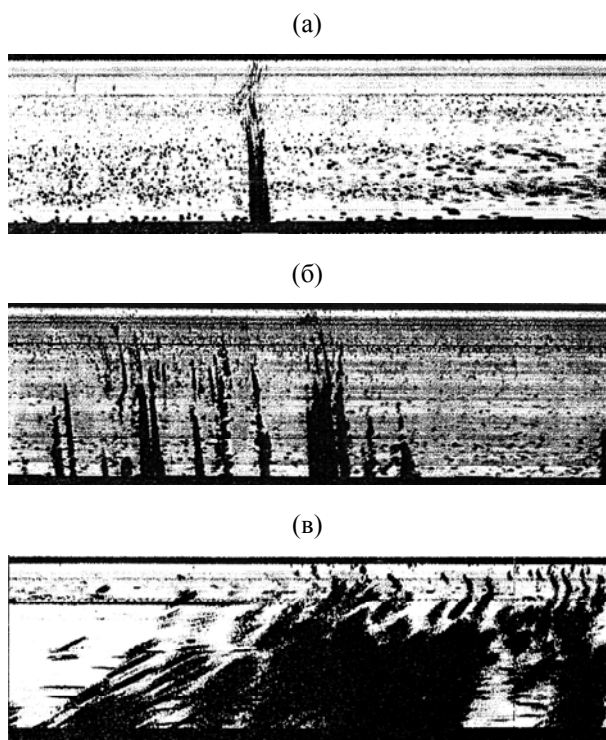


Рисунок 3. Газовые проявления: (а) одиночный сип; (б) группа газовых факелов; (в) мощный газовый фонтан

В большинстве наблюдаемые газовые струи маломощные, высота их достигает 100 – 130 м, но чаще всего не превышает 50 – 70 м (Рис. 3а, б). В то же время были зафиксированы отдельные большие фонтаны высотой до 250 – 300 м, а иногда даже до 400 – 500 м (Рис. 3в) (Shnyukov, Kobolev, & Pasynkov, 2013). Как правило, струйные метановые газовыделения приурочены к палеодельтам рек, свалу глубин и геодинамическим узлам различного масштаба. С глубин до 250 м метан может достигать поверхности моря и поступать в атмосферу (Рис. 4). С больших глубин струи метана растворяются в водной толще.

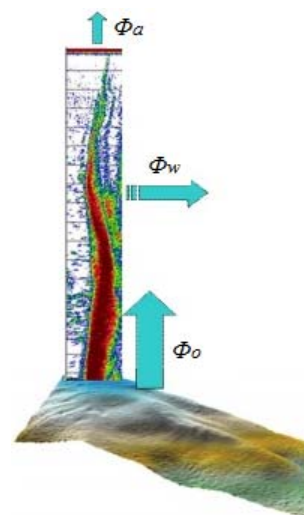


Рисунок 4. Составляющие потока метана струйного газовыделения $\Phi_o = \Phi_w + \Phi_a$, где Φ_o – начальный поток; Φ_w – поток растворенного метана в водной толще; Φ_a – поток газообразного метана в атмосферу по (Egorov, Artemov, & Gulin, 2011) с изменениями

Струйные газовые проявления на дне моря – не единственные источники выделения метана. Интенсивные, нередко взрывные фонтанные выходы газа фиксируются в грязевых вулканах. К настоящему времени в Черном море задокументировано более 60 грязевых вулканов, представляющие собой своеобразное проявление диапировой тектоники (Shnyukov, Stupina, & Rybak, 2015). Транспортировка грязевого материала осуществляется газо-флюидной смесью, вырывающейся под большим давлением со значительных глубин (Shnyukov & Netrebskaya, 2016). Над вершинами большинства глубоководных грязевых вулканов обнаружены признаки активности в виде периодических в межгодовом масштабе газовых фонтанов, которые по высоте превышали 1000 м.

Большая часть грязевых вулканов (20) приурочена к прогибу Сорокина. В восточной части Черного моря грязевые вулканы зафиксированы на акватории Керченско-Таманского прогиба (3), в пределах Туапсинской (8) и Гиресунской (5) впадин и на Валу Шатского (7) (Shnyukov, Stupina, & Rybak, 2015). Следует подчеркнуть, что в если центральной части Западно-Черноморской впадины открыто 11 грязевых вулканов, то непосредственно в пределах Восточно-Черноморской впадины подобных проявлений до сих пор не зафиксировано.

Существенный интерес представляют интегральные оценки газовой разгрузки дна. Однако используемые с этой целью методы баланса и моделирования обременены погрешностями и поэтому должны тестироваться дополнительными критериями. Известно, что при поступлении в поверхностный слой моря более 30 л/с газа теряется плавучесть судов, а при поступлении в атмосферу 150 л/с метана – возможно его возгорание. Поэтому при полученной сомнительной оценке газовой разгрузки дна в 900 м³/с и поступления в атмосферу потока метана в 390 м³/с (Ol'shtynskiy, 2006) следовало бы ожидать потопление судов по типу аварий в Бермудском треугольнике или регистрации фактов “горения” Черного моря. К счастью, таких аномальных событий в Черном море с 1927 года не наблюдается.

С другой стороны, при газовой разгрузке дна в 900 м³/с, годовой поток метана в морскую среду составит около 28 млрд м³, что превышает годовую добычу метана Украиной. Можно предположить, что разработка технологии добычи такого факельного газа могла бы избавить нашу страну от его импорта. Однако для обоснования эффективности материальных затрат при разработке такой технологии, газовая производительность факелов не должна вызывать сомнений.

Нельзя не остановиться на экзотических карбонатных постройках, связанных с газовой разгрузкой дна. Интенсивные подводные наблюдения с использованием подводных аппаратов и дистанционно управляемых телероботов позволили выявить новую для Черного моря форму жизни. Это симбиотическое сообщество анаэробных метаноокислительных архей и сульфатредуцирующих бактерий, способных утилизировать значительную часть метана, выходящего из морского дна и депонировать его в виде массивных карбонатных сооружений. Последние играют роль своеобразного биогеохимического барьера, препятствующего поступлению парникового газа в водную толщу и атмосферу фонтанов (Egorov, Artemov, & Gulin, 2011).

Карбонатные образования выявлены практически во всем диапазоне глубин сероводородной зоны Черного моря, в том числе ниже зоны стабильности газогидратов. В районе газовых сипов глубоководной части палеорусл Днепра вблизи верхней границы зоны стабильности газогидратов (глубина моря около 730 м) обнаружено поле карбонатных сооружений (Рис. 5) (Egorov, Artemov, & Gulin, 2011). Они представляют здесь особый интерес в связи с неустойчивым состоянием газогидратов на этой глубине и зависимости их дегазации от колебаний гидростатического давления, плотности, солености и температуры придонного слоя воды, обусловленных вариативностью уровня моря, сезонными и климатическими условиями.

2.2. Генезис газовых проявлений

В настоящее время существует две точки зрения на генезис газовыделений в Черном море. С одной стороны они связываются с разгрузкой глубинных источников термального газа, а с другой – с биохимическим окислением органического вещества донных отложений Черноморской мегавпадины.



Рисунок 5. Поле карбонатных сооружений, обнаруженное в районе газовых сипов глубоководной части палеорусл Днепра вблизи верхней границы зоны стабильности газогидратов (глубина около 730 м) (фотографии сделаны с помощью телеробота) (Egorov, Artemov, & Gulin, 2011)

В зависимости от генезиса метан может иметь различное соотношение стабильных изотопов ¹²C и ¹³C. В природе среднее содержание ¹²C составляет 98.892%, а ¹³C – 1.108% соответственно. Однако в результате метаболизма микроорганизмов за счет изотопного эффекта происходит фракционирование изотопов в сторону обеднения метана его тяжелым стабильным изотопом. Для характеристики этого соотношения используется показатель δ¹³ (Leyn & Ivanov, 2009). Величина последнего до уровня –50...–60% соответствует термогенному метану, а в пределах от –60 до –80% указывает на биогенное происхождение метана. Диаграмма изотопного состава углерода метана для различных биогеохимических и геологических структур Черноморской мегавпадины приведена на Рисунке 6 (Leyn & Ivanov, 2009).

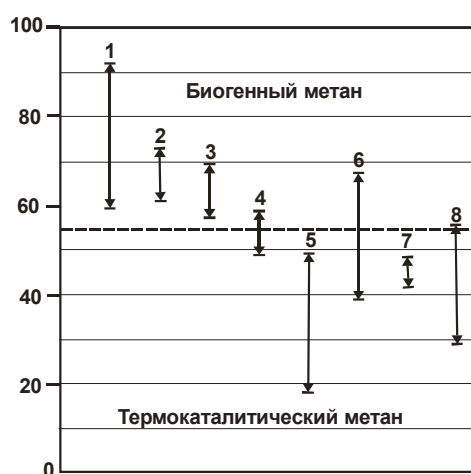


Рисунок 6. Изотопный состав углерода метана Черноморской мегавпадины (Leyn & Ivanov, 2009): 1 – метан с верхнеголоценовых осадков; 2 – растворенный метан холодных сипов; 3 – пузырьковый метан газовых струй; 4 – растворенный метан анаэробной водной толщи; 5 – растворенный метан водной толщи в зоне хемоклина; 6 – растворенный метан кислородной водной толщи; 7 – растворенный каталитический метан; 8 – метан грязевых вулканов

Как следует из диаграммы, метан из верхнеголоценовых осадков 1, а также растворенный метан холодных сипов 2 и пузырьковый метан газовых струй 3 по соотношению легкого и тяжелого стабильных изотопов углерода (δ¹³) имеют биогенный генезис. С этим

трудно не согласиться. Вместе с тем правая сторона приведенной диаграммы показывает, что растворенный метан анаэробной водной толщи 4, водной толщи в зоне хемоклина 5, кислородной водной толщи 6, растворенный каталитический метан 7 и метан грязевых вулканов 8 соответствует термогенному метану.

Имеющиеся изотопно-геохимические данные свидетельствуют о преобладании в Черном море термогенного метана. Термогенный метан обнаружен в разных геоморфологических структурах – на шельфе, на континентальном склоне и в прогибе. Он всегда присутствует в ассоциации с биогенным метаном в различных пропорциях. Общее распространение можно объяснить только в том случае, если биогенный метан является вторичным, который образовался за счет термогенного, благодаря активности метаноокисных и сульфатредуцирующих бактерий (Lukin, 2003).

Рассеянный по площади и редко образующий большие сконцентрированные скопления газ, скорее всего, является результатом биохимической бактериальной трансформации органического вещества. По результатам сейсмоакустических исследований было установлено, что в толще подстилающих осадков под холодными сипами с метаном смешанного или термогенного генезиса, как правило, располагаются неотектонические нарушения, представляющие собой каналы поступления глубинного газа. И, наоборот, под сипами с биогенным метаном таких каналов не обнаружено, что может свидетельствовать об их принадлежности к рассеянной форме газового потока.

Следует также подчеркнуть, что наличие струйных газовыделений в пределах глубин 900 – 1000 м и более 1800 м не может быть объяснено в рамках биогенной концепции генезиса углеводородов. На таких глубинах при температуре придонного слоя воды около +9°C, и солёности более 22.5% в метан может существовать только в газогидратной форме. Наличие холодных сипов в зоне неустойчивости газообразной формы метана на глубинах более 750 м свидетельствует о существовании здесь в донных отложениях и водной среде нестационарных *PT*-условий.

По расчетам (McGinnis et al., 2004), в водах Черного моря растворено огромное количество метана (от 54 до 96 Tg), однако скорость его анаэробного окисления составляет 30 Tg в год. Отсюда следует, что за несколько лет метан водной толщи полностью обновляется и для его компенсации требуется мощный подток с нижележащих горизонтов. Более того, воды Черного моря постоянно обновляются за счет поставки пресной воды реками с окружающей суши и соленой воды из Средиземного моря через Босфор, которая не содержит метан. По данным разных авторов, полный цикл замены воды длится от 410 до 2000 лет.

Глубинная природа метана подтверждается также газовыми выходами над кристаллическими породами Ломоносовского подводного массива южнее Крыма, а также изотопным и химическим составом карбонатных образований в северо-западной части моря (Shnyukov, Kobolev, & Pasyukov, 2013).

Результаты радиоизотопного определения возраста карбонатных образований Черного моря показывают, что утечка газа из дна началась не менее 29200 – 36500 лет назад (Egorov, Artemov, & Gulin,

2011). Таким образом, с момента появления газовых выходов вода в Черном море обновлялась, по крайней мере, 15 раз. Итак, баланс метана в воде может поддерживаться только за счет мощной глубинной дегазации. Термодинамический режим, ограниченное количество биомассы в осадочной толще Черного моря и приуроченность газовых выходов к разломам консолидированной коры и верхней мантии свидетельствуют в пользу абиогенной природы метана. Таким образом, есть все основания считать, что микробного метагенеза в осадочной толще недостаточно для обеспечения такой мощной газовой разгрузки дна Черного моря. По мере проведения исследований все больше аргументов свидетельствуют в пользу глубинной концепции.

2.3. Глубинное строение мегавпадины Черного моря

Геологическому строению и тектонике акваторий Азово-Черноморского бассейна и прилегающих континентальных районов посвящены десятки монографий и сотни статей, которые отражают материалы, накопленные более чем за полувековую историю различных морских и полевых геофизических исследований. Представления о глубинной структуре Черноморской мегавпадины базируются на анализе потенциальных геофизических полей: магнитных, гравитационных, тепловых, а также материалов сейсмических и сейсмотомографических исследований. Однако основной фактологической базой изучения глубинного строения Черного моря являются материалы региональных сейсмических исследований. Среди них следует выделить три основных этапа.

Первый этап связан с глубинными сейсмическими зондированиями (ГСЗ), которые были выполнены в период с 1957 по 1968 годы с использованием взрывных источников. В результате были выяснены основные черты глубинного строения земной коры Черного моря, получены первые данные о топографии поверхности Мохоревичича (Мохо), мощности консолидированной коры, и было высказано предположение об отсутствии в Западно-Черноморской впадине (ЗЧВ) и Восточно-Черноморской впадине (ВЧВ) геофизического гранитного слоя (Goncharov, Neprochnov, & Neprochnova, 1972).

На втором этапе (1978 – 1985 годы) были выполнены сейсмические наблюдения методом общей глубинной точки (МОГТ) по сети региональных профилей, перекрывающих всю акваторию Черного моря. В широко известной монографии (Gorshkov, Meysner, Solov'yev, Tugolesov, & Khakhalev, 1985) изложены фундаментальные положения о структуре осадочного чехла Черноморской мегавпадины и кайнозойском этапе ее развития, которые остаются актуальными до настоящего времени. Впервые были построены структурные карты мощностей кайнозойских отложений Черного моря в масштабе 1:1500000 (Tugolesov, 1989).

И наконец, третий этап ознаменован проведением в 2011 году Международной ассоциацией “Геология без границ” широкомасштабных региональных сейсмических исследований МОГТ по редкой сети со средним расстоянием между профилями 100 км (Senin, Nikishin, & Amelin, 2012; Whaley, 2012). Ис-

следования выполнялись с целью разработки новой структурно-геодинамической модели Черного моря, изучения строения и эволюции земной коры и осадочного заполнения с акцентом на докайнозойские этапы ее эволюции. По результатам этих исследований была проведена интерпретация полученных материалов (Graham, Kaymakci, & Horn, 2013; Glumov, Gulev, Senin, & Karnaukhov, 2014; Nikishin et al., 2015; Nikishin et al., 2015), которая позволила существенно обновить представления о кайнозойской структуре, геодинамике и эволюции региона и впервые для всего бассейна в целом получить представления о более древних этапах его развития. Необходимо подчеркнуть, что для принципиального пересмотра общей концепции структурно-тектонического районирования и эволюции Азово-Черноморского бассейна, заложенной еще в 1960 – 1980-е годы (Goncharov, Neprochnov, & Neprochnova, 1972; Gorshkov, Meysner, Solov'yev, Tugolesov, & Khakhalev, 1985), полученные результаты не дают достаточных оснований. Тем не менее, материалы последних региональных сейсмических исследований позволили выявить ряд новых характерных особенностей геологического строения мегавпадина Черного моря, которые будут рассмотрены ниже.

В результате комплексной интерпретации потенциальных полей получены новые модельные представления о плотностной, магнитной, термальной и сейсмической неоднородностях литосферы мегавпадины Черного моря (Starostenko et al., 2015). В частности, выявлены фундаментальные различия в строении и геофизических параметрах коры и литосферы Западной и Восточной впадин, а также определена ключевая роль Одесско-Синопской разломной зоны в раскрытии и развитии Черноморской мегавпадины. На основании новой информации показано, что Западная и Восточная впадины сформировались в разное время на двух различных крупных блоках континентальной коры с независимым пострифтовым их развитием.

Здесь уместно подчеркнуть существенное различие в определениях Западной и Восточной области и непосредственно двух самостоятельных структурных единиц – одноименных впадин, которые четко фиксируются по поверхности консолидированной коры в фундаменте их центральных частей.

Западная и Восточная области Черного моря существенно отличаются своими размерами, различной мощностью осадочной толщи, концентрацией и направлением основных тектонических элементов (Рис. 7). В западной области, где фундамент, частично имеющий проблематичную субконтинентальную или субокеаническую природу, отчетливая морфологическая дифференциация структуры наблюдается лишь в прибрежных зонах. В восточной области отмечается значительно более существенная дифференциация ее структуры, и выделяются такие крупнейшие системы поднятий как Центрально-Черноморская, с валами Архангельского и Андрусова, Черноморско-Грузинская, включающая вал Шатского и Гудаутский (Сухумский) массив, а также крупные депрессионные зоны Туапсинского прогиба и собственно Восточно-Черноморской впадины (Tugolesov, 1989; Gorshkov, Meysner, Solov'yev, Tugolesov, & Khakhalev, 1985).

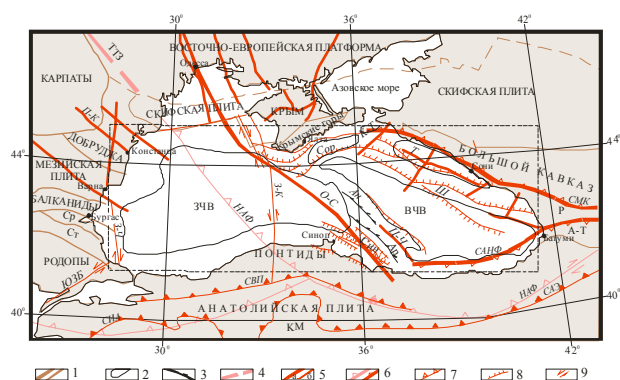


Рисунок 7. Тектоническое районирование и структура Азово-Черноморского бассейна (Starostenko et al., 2015): 1 – границы смежных тектонических элементов; 2 – основные структуры впадины Черного моря; 3 – оси поднятий Андрусова (Ан) и Архангельского (Ар); 4 – предполагаемое юго-восточное окончание зоны Тейс-сёре-Торнквиста (ТТЗ); 5 – разломы первого (а) и второго (б) порядка; 6 – сuture; 7 – надвиги; 8 – сбросы; 9 – относительные смещения вдоль разломов; сокращения: структуры: Ср – Среднегорье; Ст – Странджа; Р – Рионская впадина; А – Т – Аджаро-Триалетская складчатая система; КМ – массив Киришехир; ЗЧВ – Западно-Черноморская впадина; ВЧВ – Восточно-Черноморская впадина; Сор – впадина Сорокина; К – Т – Керченско-Таманский прогиб; Т – Туапсинская впадина; Син – Синопская впадина; ЦЧ – Центрально-Черноморское поднятие; Ш – поднятие Шатского; разломы: П – К – Печеняга-Камена; ЮЗБ – Юго-Западных Балкан; 3 – Ч – Западно-Черноморский; 3 – К – Западно-Крымский; О – С – Одесско-Синопский; сuture: СМК – Малого Кавказа; СВП – Внутренних Понтий; САЕ – Анкара-Эрзинкан; СИА – Измир-Анкара; НАФ – неоальпийский фронт надвигов

С целью устранения этого разночтения был предложен термин “мегавпадина” Черного моря как состоящая из двух областей (Западной и Восточной), ключевыми структурными подразделениями которых являются Западно- и Восточно-Черноморская впадины (соответственно ЗЧВ и ВЧВ) (Kobolev, 2003).

Наиболее эффективным инструментом изучения глубинных неоднородностей мантийной литосферы являются методы сейсмической томографии, конечным продуктом которых есть скоростные модели в пределах принятых физико-математических представлений. Среди различных сейсмо-томографических построений, непосредственно посвященных Азово-Черноморскому региону, выделим, представляющие для нас интерес, их локальные и региональные модификации.

К первым следует отнести цикл работ последователей В.С. Гейко, успешно использующих разработанный им метод тейлоровского приближения в решении задач лучевой сейсмической томографии с целью изучения строения мантии на базе данных времен прихода первых вступлений *P*-волн от землетрясений на станции мировой сети (Geyko, Bugaenko, Shumlyanskaya, Zaets & Tsvetkova, 2007; Bugaenko,

Shumlyanskaya, Zaets & Tsvetkova, 2008; Bugaenko, Zaets, & Tsvetkova, 2015). Особый интерес представляют сейсмотомографические построения *P*-скоростных моделей Восточного Средиземноморья, приведенные в работе (Gintov, Tsvetkova, Bugaenko, & Murovskaya, 2016). Методика локальной трехмерной лучевой томографии основана на предположении о гладкости латеральных вариаций скорости, с использованием данных о временах пробега продольных волн от землетрясений внутри и вокруг Черного моря с целью восстановления трехмерного распределения скорости в литосферной части верхней мантии региона. Эти исследования позволили установить две высокоскоростные аномалии под ЗЧВ и ВЧВ и неоднородную сложную конфигурацию структуры литосферы под мегавпадиной Черного моря в целом (Yanovskaya, Gobarenko, & Egorova, 2016).

На основании обобщения приведенного выше и видимо далеко не полного перечня результатов выполненных в последние годы исследований, остановимся фрагментарно на отдельных структурно-тектонических проблемных вопросах строения и глубин-

ной структуры континентальной окраины и непосредственно мегавпадины Черного моря.

Глубинная часть ЗЧВ и ВЧВ характеризуется наиболее глубоко погруженным фундаментом и обширной утоненной земной корой, субконтинентальный или субокеанический тип которой обусловлен отсутствием “гранитно-метаморфического” слоя (Egorova, Gobarenko, Yanovskaya, & Baranova, 2012; Nikishin et al., 2015; Nikishin et al., 2015; Starostenko et al., 2015). Выделение под ЗЧВ и ВЧВ подстилающей океанической коры над границей Мохо, на наш взгляд, является проблематичным. Зона перехода между континентальной и океанической корой здесь несколько отличается от подобных зон в других регионах мира.

На сводном временном разрезе по материалам региональных сейсмических исследований МОГТ (Рис. 8) четко фиксируются структурный план поверхности фундамента и осадочного заполнения мегавпадины Черного моря (Graham, Kaymakci, & Horn, 2013). Изобилие вертикальных разломов (сбросов и их систем) отражает тектонические процессы, произошедшие на рубеже триаса и юры, а также в постмеловое время.

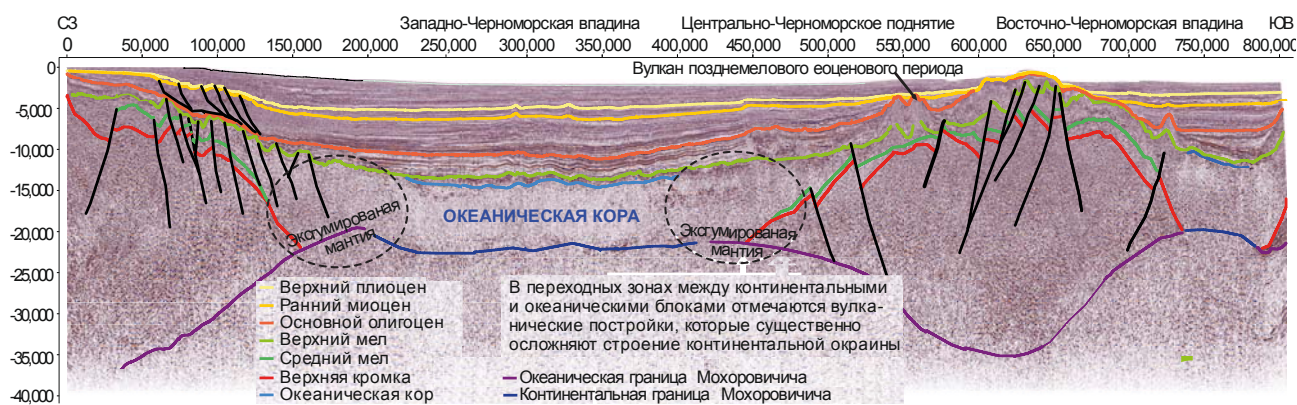


Рисунок 8. Сводный временной сейсмический разрез через Черноморскую мегавпадину (Graham, Kaymakci, & Horn, 2013)

Отдельного внимания заслуживает вопрос о природе границы между глубоководной впадиной и континентальным склоном. Ранее, основываясь на результатах сейсмических работ МОГТ, переходную зону трактовали как флексурный перегиб, не сопровождающийся крупными нарушениями и относительными перемещениями блоков земной коры (Gorshkov, Meysner, Solov'yev, Tugolesov, & Khakhalev, 1985).

Затем рядом исследователей (Chekunov, 1987; Banks & Robinson, 1997; Kobolev, 2003) было показано, что эта граница имеет явно тектонический характер и представляет собой глубинный разлом, по которому произошло значительное смещение фундамента и раздела Мохо, резкое изменение мощности, структуры земной коры и дислоцированности глубоководных осадков. Свидетельством этому являются результаты переинтерпретации материалов ГСЗ по 25 профилю, которые показали к югу от Крымского полуострова существование высокоамплитудного сброса, по которому фундамент на шельфе резко (до 8 км) погружается (Baranova, Egorova, & Omel'chenko, 2008). Этот вывод нашел также свое подтверждение

и в результатах последних региональных сейсмических исследований МОГТ (Senin, Nikishin, & Amelin, 2012; Graham, Kaymakci, & Horn, 2013; Nikishin et al., 2015; Nikishin et al., 2015). При этом принципиально новым на наш взгляд, является тот факт, что ЗЧВ и ВЧВ в меловое время были ограничены сбросами и их системами (Рис. 8). Это свидетельствует, по мнению авторов (Graham, Kaymakci, & Horn, 2013), об их рифтовом происхождении в ходе растяжения коры, предположительно в меловое время, на чем мы остановимся ниже.

На наш взгляд зона перехода от континентального склона к глубоководной впадине представляет собою долгоживущую Циркумчерноморскую зону разломов, осложненную по периметру депрессией переменной ширины, вдоль которой произошло формирование глубоководных котловин Черного моря (Kobolev, 2003; Kobolev, 2016). Эти разломы сохраняют активность и в настоящее время, что подтверждается их сейсмичностью, строением консолидированной коры и осадочной толщи, формами рельефа дна и др. Такие активные разломы прослеживаются вдоль Крым-

ского, Кавказского и Анатолийского побережий. Об этом, в частности, косвенно может свидетельствовать сосредоточенность газовых проявлений по периметру глубоководной впадины Черного моря (Рис. 1).

Существенное влияние на формирование Азово-Черноморского региона оказали глубинные разломные зоны мантийного заложения, выходящие далеко за пределы мегавпадины и разделяющие крупные тектонические блоки земной коры. К ним, в первую очередь, относится Одесско-Синопская разломная зона, которая выделяется параллельно оси Центрально-Черноморского поднятия (ЦЧП) с Восточно-Европейской платформой до Понтида (Рис. 7, 9) на основании повышенных градиентов мантийной составляющей гравитационного поля (Starostenko et al., 2015). Зафиксированные в западном основании фундамента ЦЧП два разлома (Рис. 8) возможно являются восточным ответвлением этой ключевой трансрегиональной тектонической структуры, которая сыграла большую роль в развитии мегавпадины Черного моря.

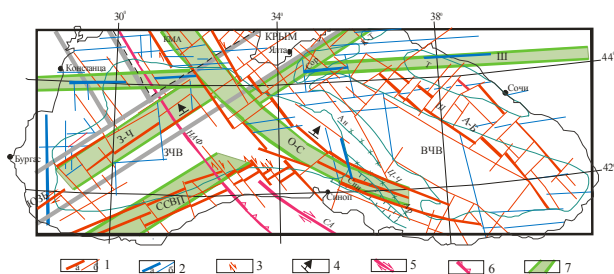


Рисунок 9. Схема разломной тектоники консолидированной коры (Starostenko et al., 2015): 1 – разломы диагональной системы первого (а) и второго (б) порядка; 2 – разломы ортогональной системы первого (а) и второго (б) порядка; 3 – направление сдвигов; 4 – предполагаемое направление падения; 5 – Северо-Анатолийский (СА) разлом; 6 – неогальпийский фронт надвигов; 7 – зоны повышенных градиентов мантийной составляющей гравитационного поля; зоны разломов: О – С – Одесско-Синопская; А – Б – Алуштинско-Батумская; 3 – Ч – Западно-Черноморская; ССВП – субпараллельная сутура Внутренних Понтидов; Ш – Широтная

ЦЧП, соединяющее Горный Крым со структурами Восточного Понта, представляет собой протяженную пологую структуру – поднятие Андрусова на севере и хребет Архангельского на юге (Рис. 7). Существенным результатом последних региональных сейсмических исследований является выделенная между ними граница в виде грабенообразной депрессии, которую предлагается интерпретировать как грабен растяжения, или как зону сдвига-растяжения типа пулл-апарт (Senin, Nikishin, & Amelin, 2012).

По результатам 3D гравитационного анализа и локальной сейсмической томографии установлено, что морфология рельефа раздела Мохо полностью сопоставима с положительными аномалиями силы тяжести ЗЧВ и ВЧВ и с тектоническим рисунком кровли их меловых отложений (Egorova, Gobarenko, Yanovskaya, & Baranova, 2012; Yegorova, Gobarenko,

& Yanovskaya, 2013). Однако обе эти поверхности находятся в инверсионной зависимости. Если поверхность раздела Мохо образует своды, то располагающиеся над ними осадки представляют собой депрессию с глубиной погружения 15 – 16 км в ЗЧВ и 12 – 13 км в ВЧВ (Рис. 10).

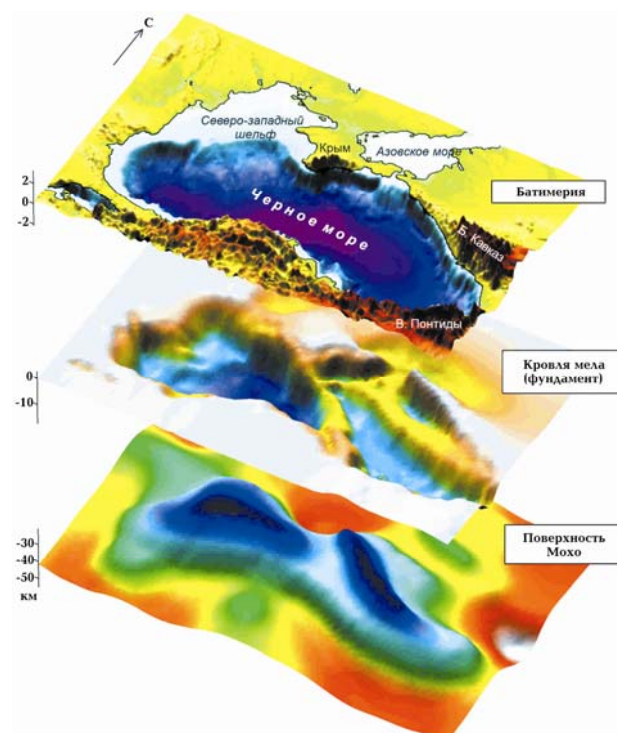


Рисунок 10. 3D диаграмма основных поверхностей модели коры Черного моря (Egorova, Gobarenko, Yanovskaya, & Baranova, 2012)

Такое инверсионное залегание тектонических структур с одной стороны говорит об их разном возрасте, а с другой свидетельствует об образовании депрессий, синхронных погружению сводов основания коры. Иными словами, ранее образовавшиеся своды по поверхности М в силу каких-то определенных причин (о них будет сказано ниже) испытали погружения, что повлекло за собой формирование прогибов вышележащих мезокайнозойских пород.

Результаты нового сейсмотомографического исследования мантийной литосферы Черноморского бассейна представлены в (Yanovskaya, Gobarenko, & Egorova, 2016). Привлечение большего объема сейсмологических данных позволило получить уточненную скоростную модель литосферы мегавпадины Черного моря, которая представляет существенный интерес для геодинамических построений. На Рисунке 11 приведены скоростные разрезы вдоль профилей, пересекающих Черноморскую впадину в субширотном и меридиональном направлениях.

На разрезе по профилю АА' видно существенное отличие в распределении скоростных характеристик под ЗЧВ и ВЧВ. А именно, верхние горизонты мантии ЗЧВ характеризуется более низкими скоростями по сравнению с ВЧВ и, наоборот, на глубинах 60 – 70 км – более высокими.

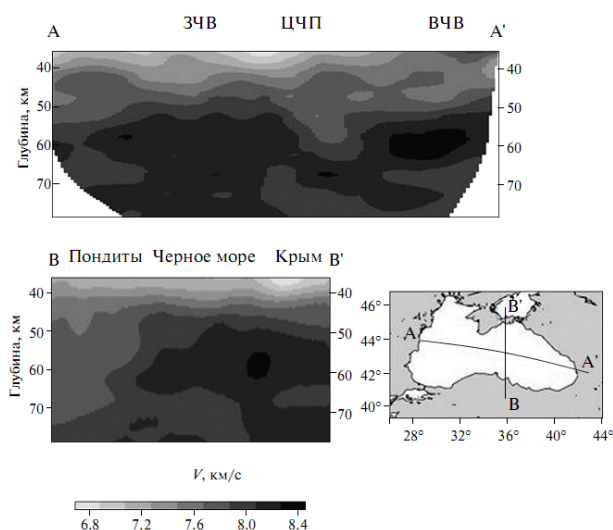


Рисунок 11. Вертикальные скоростные разрезы вдоль профилей AA' и BB' (расположение профилей показано в нижней правой части рисунка) (Yanovskaya, Gobarenko, & Egorova, 2016)

Таким образом, структуру литосферы под ЗЧВ и ВЧВ можно представить как состоящую из высокоскоростных мантийных внедрений, расположенных на разной глубине – под ЗЧВ центр внедрения располагается на глубинах 55 – 70 км, тогда как под ВЧВ на глубинах – 45 – 55 км.

У авторов рассмотренного выше сейсмотомаграфического исследования (Yanovskaya, Gobarenko, & Egorova, 2016) возникает логичный вопрос, "...каким образом могла образоваться тонкая высокоскоростная кора, которая обычно считалась океанической, над высокоскоростной континентальной мантийной литосферой Черного моря с повышенными плотностями и реологическими свойствами, близкими к докембрийской Восточно-Европейской платформы?".

Следует согласиться, что полученные результаты не позволяют такую кору считать океанической, аналогичной образовавшейся в зонах океанического спрединга. Такая кора могла образоваться в результате очень сильного растяжения (hyper-extension) континентальной коры, при рифтогенезе, который не привел к сильным изменениям подстилающей мантии.

Во многих работах, в частности в (Razvalyaev, 1988) отмечается определенная унаследованность общего простирания рифтовых систем ориентировке внутренней структуры фундамента, на котором они закладывались. Сложность и многофазность в развитии земной коры Черноморской мегавпадины четко прослеживаются в ее структуре. Субмеридиональный структурный план, характерный для Украинского щита и Восточно-Европейской платформы, присущ ВЧВ. И наоборот, наложенный субширотный план молодых тектонических элементов Скифской плиты, характерен для ЗЧВ. В этой связи обращает на себя внимание приведенная в (Yanovskaya, Gobarenko, & Egorova, 2016) топография раздела Мохо, на которой ЗЧВ в отличие от ВЧВ характеризуются грубоугольной формой. Проведя по подошве коры (поверхности Мохо) через вершины треугольников прямые линии, найдем место их пересечения в виде ха-

рактерного тройного сочленения в центре глубоководной котловины (Рис. 12). При этом западная сторона треугольника параллельна Западно-Черноморской зоне разломов, восточная – Одесско-Синопской, и наконец, южная – граничит с субпараллельной сутурой Внутренних Понтид (Рис. 8).

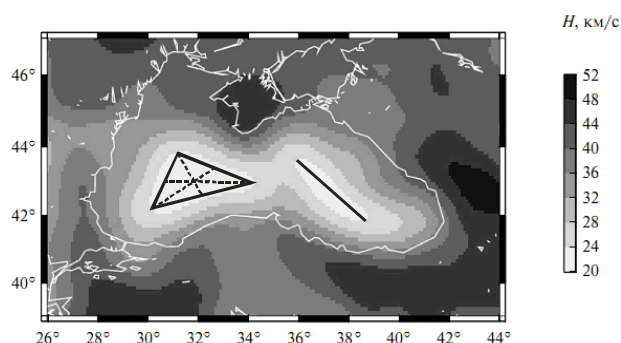


Рисунок 12. Карта подошвы коры (поверхности Мохо) с дополнениями по (Yanovskaya, Gobarenko, & Egorova, 2016)

Известно, что трехлучевые (рифтогенные) формы растяжения земной коры возникают над поднятием подкорового вещества и сопровождаются сводообразованием (Grachev, 2000), как, например, в Афарском рифте в Эфиопии, представляющем собой треугольную область со сторонами 700, 700 и 500 км.

В таком же тройном сочленении находятся рифты Северного моря – Викинг, Морей-Ферт и Центральный с их триас-юрским вулканизмом (Mirlin, 1985). Аналогично соотносятся между собой рифейские палеорифты Балтийского моря, его Ботнического и Финского заливов. Здесь раздел М имеет высокое стояние – 40 против 45 км в прилегающих территориях (Valeev, 1978). Более масштабная картина наблюдается в центре древней Восточно-Европейской платформы, где Вольно-Оршанский, Пачелмский и Среднерусский палеорифты встречаются в аналогичном тройном сочленении (Orovetskiy & Kobolev, 2006). Подобные примеры не единичны. К ним относятся также тройные сочленения Исландии (Helmberger & Ding, 1998) и Азорских островов (Pushcharovskiy, 2000) в Атлантическом океане, а также Пасхи в Тихом океане (Kindsley & Shilling, 1998) и др.

Не является исключением и ЗЧВ. Согласно сейсмическим и гравитационным данным, раздел Мохо под ней имеет высокое стояние – 19 км, погружаясь к периферии максимум до 44 км. Таким образом, раздел Мохо образует под ЗЧВ свод с довольно крутыми (до 25°) бортами. Лучи этого тройного сочленения в итоге переходят в ранг рифтогенных структур. Это может служить подтверждением ранее полученных выводов о том, что ЗЧВ возникла за счет раскола континентальной коры (литосферы) и рифтогенеза Скифской платформы (Hippolyte, 2002).

Совершенно иная картина наблюдается в пределах ВЧВ, где наиболее высокое стояние раздела М имеет узколинейную субмеридиональную форму северо-западного простирания (Рис. 12), параллельную расположенным с запада Центрально-Черноморскому поднятию и Одесско-Синопской разломной зоне ман-

тийного заложения. С северо-востока Восточно-Черноморская впадина граничит с валом Шатского и Туапсинским прогибом. Последний заполнен кайнозойскими отложениями, смятыми в линейные складки, параллельные простиранию оси раздела Мохо. Это соответствует представлениям (Kaz'min et al., 2000) о том, что ВЧВ возникла в результате раздвига между валами Шатского и Андрусова на Эвксинской субконтинентальной плите в результате мощных деструктивных процессов, которые привели к разрушению плитной структуры в этой части бассейна и образованию в осевой зоне рифтогенной впадины.

Приведенные выше новые фактические данные о глубинном рифтовом строении мегавпадины Черного моря дают основание предположить существенное различие в механизмах образования ее главных структурных единиц – западной и восточной впадин. А именно, первопричиной рифтогенеза ЗЧВ является подъем астеносферного диапира, приводящий к развиту вертикальных смещений литосферы, которые в свою очередь приводят к трехлучевому растяжению отдельных участков земной коры Скифской плиты. Механизм образования ВЧВ предусматривает раздвиг, т.е. разрыв сплошности маломощной редуцированной литосферы Эвксинской субконтинентальной плиты. В этом случае образование диапира – явление вторичное, связанное с декомпрессией астеносферы под раздвигом.

2.4. Сценарий плюм-тектонической обусловленности формирования и эволюции Черноморской мегавпадины

Анализ моделей формирования и эволюции Черноморской мегавпадины свидетельствует о наличии у разных групп исследователей различий, как в понимании механизмов ее формирования, так и в определении времени их проявления и роли в развитии тех или иных форм ее внутренней структуры.

Основой построения любой геодинамической модели, несущей черты эволюционизма, являются не

только исследования эволюции минерального вещества и установление возрастных границ этой эволюции, но также изучение тектонических особенностей перемещения самого вещества, что составляет основы геодинамики. Обобщение и комплексный подход к анализу современных геолого-геофизических данных, принятый в настоящей статье, позволил синтезировать разностороннюю информацию, которая может пролить свет на геодинамическое развитие региона. Ее характеристику следует начать с фактов, которые инвариантны в любой геодинамической модели Черноморской мегавпадины.

Прежде всего это касается мощности и скорости накопления осадков в мегавпадине Черного моря. Осадочный чехол ЗЧВ и ВЧВ представлен преимущественно глинистыми глубоководными отложениями кайнозойского возраста. Приведенные в (Chekunov, 1987) скорости осадконакопления в Черноморской мегавпадине находятся в пределах 150 – 200 м/млн лет, т.е. погружение носило катастрофический характер. Однако результаты одномерного моделирования скорости осадконакопления для отдельных временных интервалов показали в два и более раза их меньшие величины (Afanasenko, Nikishin, & Obukhov, 2007).

При этом выделены три стадии погружения мегавпадины, различающиеся скоростью погружений. Первая, соответствующая позднему мелу-эоцену со скоростью погружения 70 – 80 м/млн лет, вторая (майкопский век) – до 20 – 30 м/млн лет и третья (плиоцен-четвертичное время) – 85 м/млн лет.

Как было показано выше структуры западной и восточной областей мегавпадины Черного моря являются следствием различных механизмов образования. Учитывая это обстоятельство, а также существенный разброс величин скоростей осадконакопления у различных групп исследователей, были выполнены их оценки для отдельных стадий кайнозойского этапа развития западной и восточной впадин (Табл. 1) (Kobolev, 2016).

Таблица 1. Мощности и скорости осадконакопления для кайнозойского этапа развития Западно- и Восточно-Черноморской впадин (Kobolev, 2016)

Эпоха	Стадии	Продолжительность, млн лет	Мощность осадочных комплексов, м						Скорость осадконакопления, м/млн лет					
			Впадины Черного моря											
			Западная			Восточная			Западная			Восточная		
			макс.	мин.	сред.	макс.	мин.	сред.	макс.	мин.	сред.	макс.	мин.	сред.
Средний миоцен-голоцен	Позднерифтовая	16.6	4794	2300	3547	6155	1300	3677	289	136	214	371	78	221
			Олигоцен-ранний миоцен	Ранняя	17.1	6000	3000	4500	6800	3500	5150	350	175	263
Палеоэоцен	Рифтовая	32.7				8554	4000	6227	4000	3000	3500	262	122	190

Следуя исследованиям А.В. Чекунова, историю развития Черноморской мегавпадины разделяют на три основных стадии:

- дорифтовую эпиконтинентальную (поздний мел);
- рифтовую (палеоцен-эоцен);
- послерифтовую, молассово-орогенную (олигоцен-антропоген), включающую две подстадии: раннюю – дифференцированных опусканий (олигоцен-ранний миоцен-майкопский век) и позднюю – формирования единого бассейна (средний миоцен-антропоген) (Chekunov, 1987).

Расчеты выполнены на основании экстраполяции приведенных в отчете (Senin, Nikishin, & Amelin, 2012) карт мощностей кайнозойских осадочных комплексов мегавпадины Черного моря по опорным сейсмическим горизонтам (Рис. 13). Их латеральное распределение, соответствующее отдельным стадиям кайнозойского этапа формирования мегавпадины Черного моря, свидетельствует о различной и сложной динамике развития ее западной и восточной областей.

Обращает на себя внимание существенное различие в мощностях глубоководных осадков западной и восточной впадин и соответственно в скоростях их накопления (Рис. 13д). Прежде всего это касается рифтового палеоцен-эоценового комплекса, мощность которого в ЗЧВ в два с половиной раза превышает мощность аналогичных отложений ВЧВ (Табл. 1).

Это самый мощный терригенно-карбонатный комплекс, отражающий специфику осадконакопления в условиях глубоководного морского бассейна. На Рисунке 14 приведены графики темпов осадконакопления для различных временных интервалов кайнозоя ЗЧВ и ВЧВ. Как видно скорости осадконакопления палеоцен-эоценового комплекса существенно отличаются в двух впадинах. Нам представляется, что это различие можно объяснить различным временем начала погружения западной и восточной котловин. Принимая рассчитанную среднюю скорость осадконакопления в ЗЧВ (190 м/млн лет) и для ВЧВ, путем несложных расчетов получаем время начала погружения последней 54.7 млн лет назад, что соответствует началу эоцена. Таким образом, если начало рифтогенеза и формирование непосредственно ЗЧВ в условиях постоянного прогибания морского дна приходится на поздний мел, то погружение в зоне ВЧВ началось несколько позже в эоцене.

В майкопское время мощности и скорости накопления осадков в этих двух впадинах выравниваются (Рис. 13г, Табл. 1) и в миоцене-плиоцене мегавпадина Черного моря приобрела очертание, близкое к современному, превратившись в единую структуру (Рис. 13в).

Рассмотренные выше диапиры, с характерными геофизическими характеристиками, по сути, являются проявлениями мантийной мультиинтрузии, как структуры восходящего движения флюидного потока в виде плюма. Их сегменты, соответствующие апикальным частям плюма, с одной стороны характеризуются катагенезом и метагенезом в соответствии с фазами интенсивного прогибания бассейна. С другой стороны – гипогенно-алогенетическим метасоматозом центральных частей “безгранитной” коры ВЧВ и ЗЧВ, обусловленным магматической инъекцией и пластификацией ее вещества диапирами, производными Черноморского плюма.

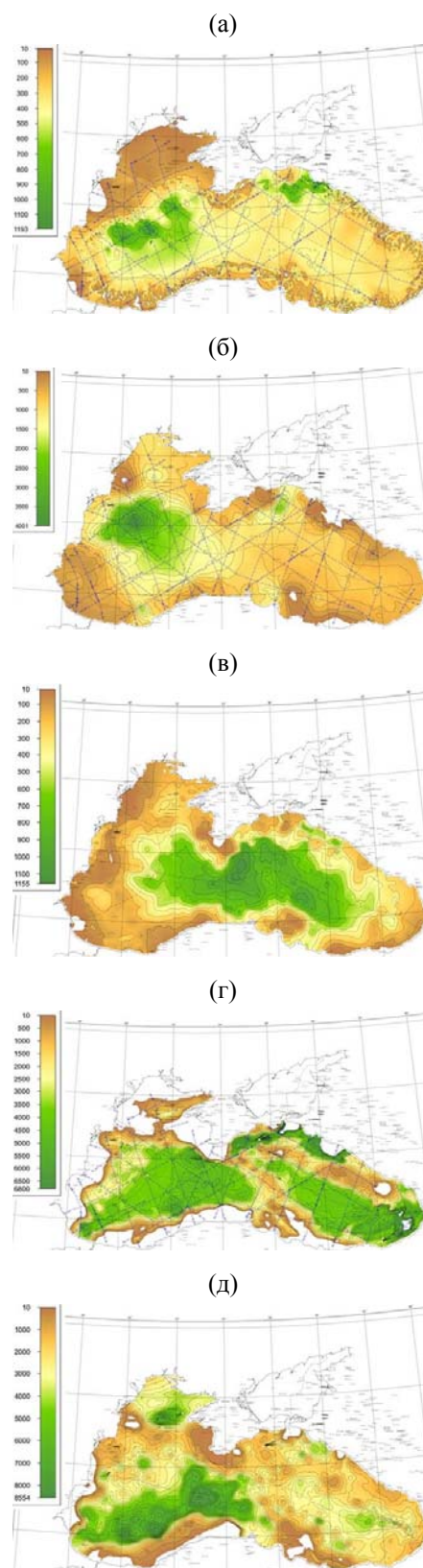


Рисунок 13. Мощности кайнозойских осадочных комплексов мегавпадины Черного моря по опорным сейсмическим горизонтам (Senin, Nikishin, & Amelin, 2012): (а) голоцен (дно – подошва голоцена); (б) плейстоцен (подошва голоцена – подошва четвертичных отложений); (в) плиоцен (подошва четвертичных отложений – кровля миоцена); (г) олигоцен – миоцен (майкоп); (д) палеоцен-эоцен (кровля эоцена – подошва верхней юры)

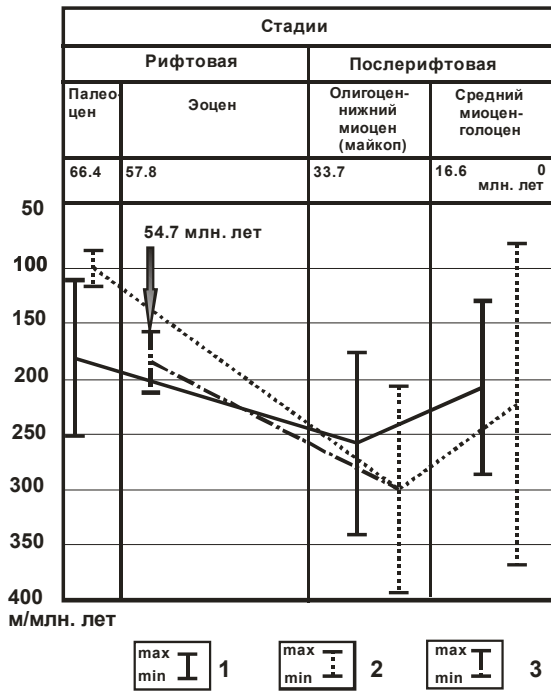


Рисунок 14. Графики темпа осадконакопления: 1 – для ЗЧВ; 2 – ВЧВ; 3 – расчетные скорости при условии начала прогибания ВЧВ в эоцене

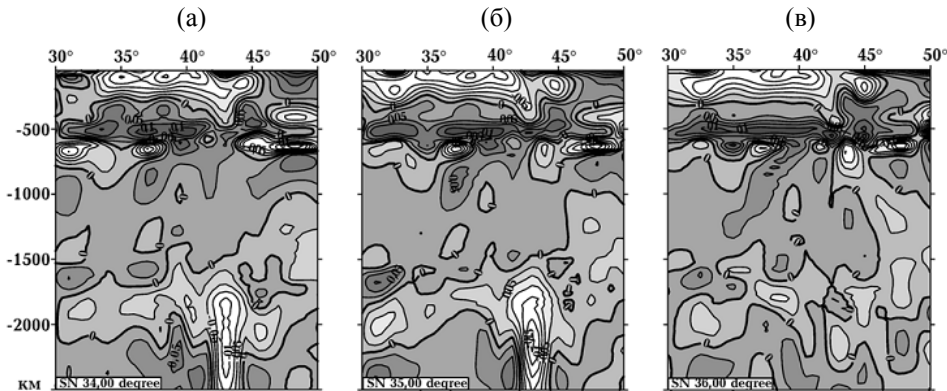


Рисунок 15. Вертикальные долготные сечения P -скоростной модели мантии под мегавпадиной Черного моря (Gintov, Tsvetkova, Bugaenko, & Murovskaya, 2016): (а) 34° в.д.; (б) 35° в.д.; (в) 36° в.д. (темно-серым и серым цветом показаны относительно высокоскоростные неоднородности, светло-серым и белым – относительно низкоскоростные)

На вертикальных долготных сечениях P -скоростной модели мантии непосредственно под ЗЧВ (Рис. 15а, б) на глубинах от 2500 до 1700 км четко фиксируется низкоскоростная неоднородность ($\Delta V_p \leq 0.175$ км/с), которую мы отождествляем с реликтом Черноморского плюма. В то же время, под ВЧВ (Рис. 13в) подобная аномальная зона отсутствует. В качестве иллюстрации объективности выполненных сейсмографических построений могут служить вертикальные широтные сечения ($41 - 45^\circ$ с.ш.) P -скоростной модели мантии под мегавпадиной Черного моря (Рис. 16). А именно, наличие указанных выше неоднородностей на широтных сечениях непосредственно под ЗЧВ (Рис. 16б, г) и их отсутствие на сечениях севернее и южнее мегавпадины Черного моря. Эти построения являются существенным подтверждением вышеприведенных соображений о существовании мантийной мультиинтрузии – Черноморского плюма

Большинство эндогенных режимов являются доказательством огромной роли адвекции глубинного вещества в качестве основного источника глобальной и региональной тектоники. Адвекция флюидов играет важную роль в плюм-тектонике. С плюмами связывают локальные выбросы глубинных флюидов в верхней мантии. Они являются источниками активной тектонической трансформации континентальной литосферы и несут признаки пульсирующей дегазации Земли.

Идея плюма, как элемента геодинамики, возникла сравнительно недавно. Это было вызвано, с одной стороны, несостоятельностью тектоники плит, т.к. она не находила объяснения внутриплитному вулканизму и магматизму и, с другой, – успехами сейсмологии, в частности, сейсмической томографии (Nolet, Karato, & Montelli, 2006).

В этой связи существенный интерес представляют сейсмотомографические построения P -скоростных моделей Восточного Средиземноморья, приведенные в работе (Gintov, Tsvetkova, Bugaenko, & Murovskaya, 2016). Оставляя за пределами обсуждения выводы авторов по их геодинамической интерпретации, остановимся на выявленных скоростных неоднородностях в мантии непосредственно под Черноморской мегавпадиной (Рис. 15, 16).

как структуры разгрузки глубинной энергии. Размещением последнего западнее Центрально-Черноморского поднятия можно объяснить различие в механизме образования главных структурных единиц – западной и восточной впадин Черноморской мегавпадины. В этой связи отмеченное выше отсутствие грязевых вулканов в ВЧВ и их достаточно широкое распространение в ЗЧВ получает свое объяснение.

Перемещение в литосферу таких значительных (в первые сотни тысяч куб. км) масс расплава создавало на глубине эквивалентный их дефицит. В результате происходило компенсационное обрушение и на поверхности Земли возникали соответствующие погружения. В настоящее время они в виде подвижных компенсационных структур Большого Кавказа, Восточного и Западного Понта, Крымской геосинклинали и Причерноморского прогиба располагаются по периферии Черноморской мегавпадины (Kobolev, 2003).

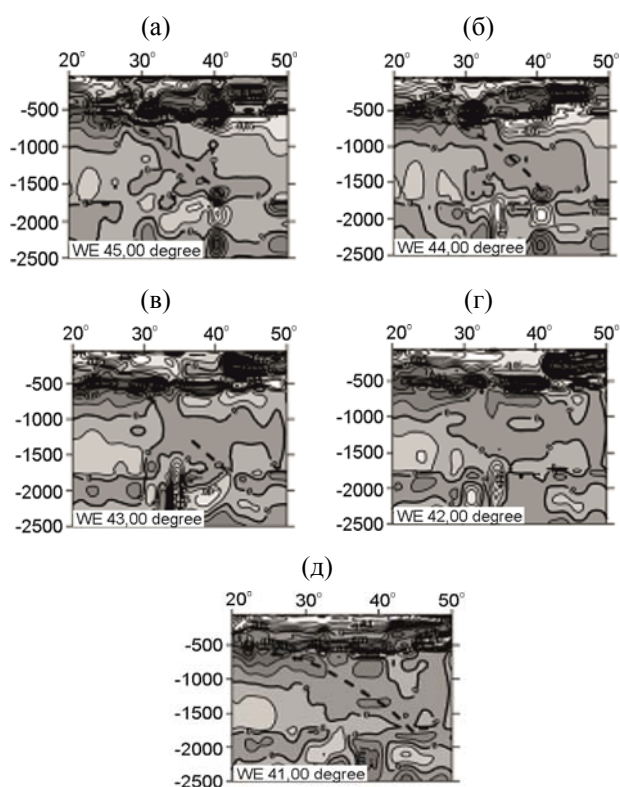


Рисунок 16. Вертикальные широтные сечения *P*-скоростной модели мантии под мегавпадиной Черного моря (Gintov, Tsvetkova, Bugaenko, & Mirovskaya, 2016): (а) 45° с.ш.; (б) 44° с.ш.; (в) 43° с.ш.; (г) 42° с.ш.; (д) 41° с.ш (условные обозначения см. на Рис. 15)

Таким образом, современная Черноморская мегавпадина претерпела в своем развитии две стадии. В прогрессивную стадию сформировался палеосвод, обусловленный подъемом Западного мантийного диапира. Судя по колоссальной мощности осадков в ЗЧВ, исчезновение свода завершилось к началу палеогена, и произошло внезапно в результате действия “пландж-принципа”. Его механизм кратко сводится к погружению изохимической, но существенно уплотненной при кристаллизации верхней “корки” мантийного диапира в подстилающий расплав, что влечет за собой погружение кровли и формирование глубоководной впадины (Kobolev, 2003; Orovetskiy & Kobolev, 2006).

Регрессивная стадия связывается с палеоценом, когда произошло резкое – по механизму “пландж-принципа” погружение Западного палеосвода во внутреннюю область мантийного диапира, которое спровоцировало раздвиг и последующий диапиризм в восточной части Черноморской мегавпадины.

Действие механизма “пландж-принципа” в обеих впадинах сопровождалось выдавливанием подстилающего расплава по периметру термической усадки в виде интрузий. Они известны по периметру Черноморской мегавпадины, где отражены в виде локальных положительных гравитационных аномалий, ввиду прерывистости их залегания были названы “пунктирными” (Starostenko, Kobolev, Orovetskiy, Bur’yanov, & Makarenko, 2000). Гравитационным моделированием установлен их ультраосновной состав, а залегание в кайнозойских отложениях указывает на

молодость магматизма. Наиболее древние осадки показали разное время начала внедрения диапиров: западного – в среднем палеозое, восточного – в конце палеозоя – начале мезозоя.

2.5. Флюидо-динамические аспекты глубинной дегазации

Планетарные катастрофы в биосфере обусловлены глубинной дегазацией, при этом корни глобальных геодинамических процессов сместились с уровня верхней мантии к ядру Земли. Каналы миграции флюидов связаны с дизъюнктивными деформациями и с инъекционными структурами разгрузки глубинной энергии в мантии – плюмами. Т.е., процессы дегазации Земли связаны с перемещением глубинных флюидов от внутренних геосферных оболочек к внешним, с учетом энергетических и динамических процессов.

В последние годы намечился существенный прогресс в термодинамическом моделировании состояния углеводородов в мантии и их трансформации на пути в литосферу. Остановимся вкратце на отдельных аспектах этой междисциплинарной проблемы.

В пределах литосферы при снижении температуры до 375°C отмечается формирование гидротермальных растворов. Восстановленный состав флюидов и наличие в них водорода и углерода обуславливают возможность минерального синтеза углеводородов (УВ) как в глубокозалегающих флюидизированных очагах (Valyaev, 1994), так и в пределах осадочного чехла, где происходит трансформация глубинных флюидов с формированием месторождений нефти и газа. Сопоставление полей устойчивости углеводородов с геотермальным градиентом земной коры позволило установить, что формирование тяжелых углеводородов происходит на глубинах, значительно превышающих 100 км. При этом следует отметить, что температуры поступления флюидов, определенные методом гомогенизации, в породах различных нефтегазоносных бассейнов (НГБ) на 50 – 100°C превышают температуры кондуктивного прогрева недр (Marakushev & Marakushev, 2008).

Диссипативность НГБ как системы определяется взаимодействием глубинных высокоэнергетических флюидных потоков с уже сформированными и (или) которые находятся в процессе формирования флюидопроводящими системами фундамента и осадочного чехла. Согласно А.Е. Лукину, изучение этих глубинных флюидов и механизмов их взаимодействия с литосферными субстратами должно стать главным направлением исследований нефтегазовой геологии XXI века (Lukin, 2014). При этом к первоочередным задачам следует отнести вопрос о природе высокоэнергетических флюидных потоков, которые, согласно современным данным, могут возникать в различных геосферах – от жидкого ядра и слоя D2 до верхней мантии, коромантийной смеси и волноводов земной коры (Lukin & Pikovskiy, 2004).

Рассмотрением эволюции осадочных бассейнов и их трансформацию в НГБ в отрыве от глубоких недр (мантия – ядро) сложно объяснить неисчерпаемость их углеводородных ресурсов. Именно длительной и многоэтапной активизацией плюмов до плиоцен-четвертичного времени можно объяснить широкий

стратиграфический диапазон и уникальное фазово-геохимическое разнообразие нафтидов, широкое распространение аномально высоких пластовых давлений, глубинную гидрогеологическую инверсию, с которой связано формирование продуктивных залежей (Letnikov, 1992; Lukin, 2014).

Наиболее существенным аспектом функциональной характеристики плюмов с точки зрения эндогенного рудообразования и нафтидогенеза является их рассмотрение как труб дегазации. Такая трактовка позволяет объединить практически все основные аспекты плюмтектоники. При этом на разных этапах эволюции, плюм может контролировать как “горячую” (включая магматическую инъекцию и пластификацию вещества земной коры и гидротермальный рудогенез), так и “холодную” (включая нафтидогенез) дегазацию. Трубы дегазации следует рассматривать как парагенетические пространственно-временные системы ловушек, которые могут включать в себя значительные залежи углеводородов, приуроченные к разуплотненным массивам пород кристаллического фундамента и промежуточного комплекса, черносланцевых и рифогенно-карбонатных формаций (Lukin, 2014). Поэтому картирование труб дегазации по комплексу геофизических и геохимических аномалий приобретает особое значение.

3. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В осадочной толще Черноморской мегавпадины существуют сотни грязевулканических каналов, а возможно, и других путей – тектонических нарушений, по которым мощные потоки глубинных газов поступают к поверхности. Если к этому добавить бесчисленные разрывные нарушения различных уровней, то будет понятна схема существования своеобразной “кровеносной системы” осадочного чехла, в котором циркулируют флюиды. В качестве иллюстрации вышесказанного на Рисунке 17 приведен пример геологической интерпретации временно-сейсмического разреза по субмеридиональному профилю, пересекающему западную часть Черного моря от северо-западного шельфа до ЗЧВ.

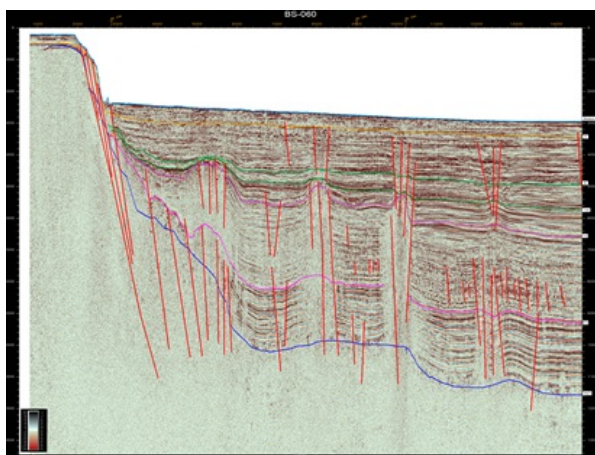


Рисунок 17. Пример геологической интерпретации временно-сейсмического разреза по субмеридиональному профилю от северо-западного шельфа до ЗЧВ по (Senin, Nikishin, & Amelin, 2012)

Обилие тектонических нарушений, которые корнями уходят в фундамент, является ярким свидетельством взаимодействия флюидных потоков с осадочным чехлом.

Как показывают сейсмические материалы, корни грязевых вулканов уходят в мантию. Для одного из грязевых вулканов Черного моря (Рис. 18) был обнаружен канал дегазации – корни вулкана, расположенные ниже поверхности Мохо (21 км от поверхности дна).

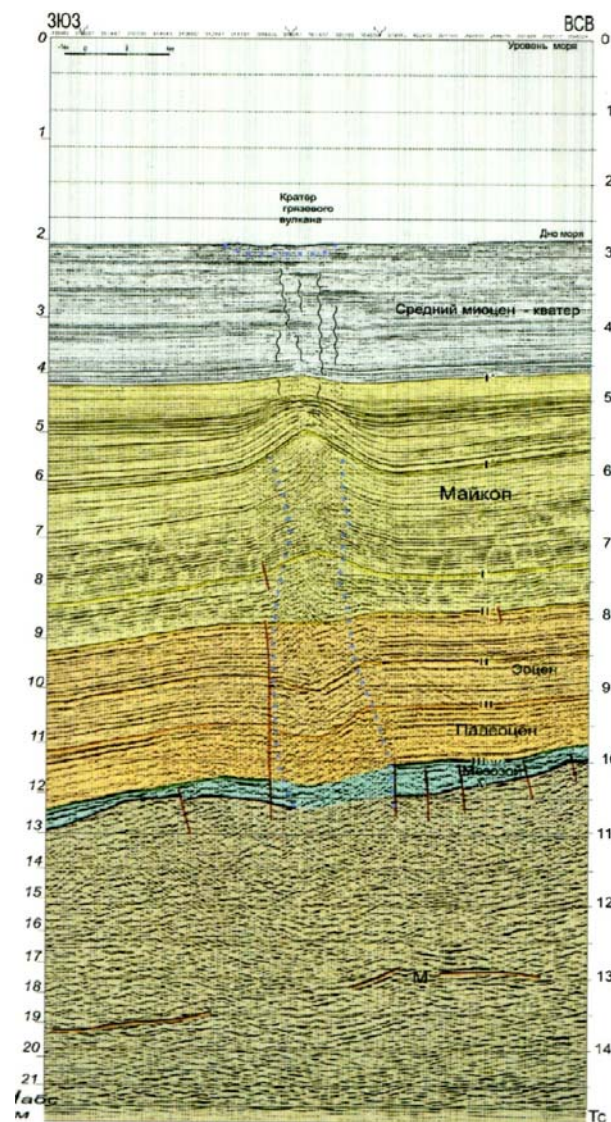


Рисунок 18. Фрагмент временно-сейсмического разреза в зоне грязевого вулкана с координатами 43°39.9' и 33°09.29' (Shnyukov, Koblev, & Pasyukov, 2013)

Можно предположить, что мощный поток флюидов, вырываясь из мантии, как бы ослабляет в своем прохождении всю осадочную толщу и способствует возникновению диапировых структур в майкопских отложениях. Другими словами, не диапиры в майкопских глинах создают грязевые вулканы, а, наоборот, флюидный локализованный поток способствует их возникновению. Об этом свидетельствует существование положительных структур на всем пути флюидного потока – во всей разновозрастной осадочной толще (Рис. 18).

С позиции существования “трубы дегазации” становится понятной роль мощной майкопской толщи глинистых пород, которая как бы одеялом покрывает и удерживают флюиды, поступающие из недр. И только прорывы этой толщи мощными глубинными потоками сфокусированных углеводородов, локализованными в грязевых вулканах, дают возможность вырваться этим флюидам на поверхность дна, создавая поверхностные проявления грязевых вулканов (конусы, брекчии, сипы).

Характерной особенностью мегавпадины Черного моря является редукция “гранитного” слоя, верхняя аккреционная часть которого в виде разновозрастного кристаллического фундамента может, наряду с осадочным чехлом, рассматриваться как самостоятельный нефтегазоносный горизонт (Areshev, Gavrilov, & Pospelov, 1997; Lukin, 2011).

Принципиальным для оценки перспектив “гранитного” слоя является открытие зоны интенсивного нефтегазоаккумуляции в разновозрастном (верхний палеозой – мезозой) фундаменте юго-вьетнамского шельфа. В частности, мощный нефтегазоносный потенциал гранитного фундамента проявился в гигантском месторождении Белый Тигр и его преобладание над углеводородным потенциалом осадочного чехла не вызывает сомнения (Lukin, Dontsov, Burlin, & Gladun, 2005; Dontsov & Lukin, 2006).

В этой связи, большого внимания заслуживают различные признаки зонального и локального

разуплотнения в пределах фундамента мегавпадины Черного моря. В частности, особый интерес представляет обнаружение волновода в фундаменте северо-западного шельфа Черного моря по результатам переинтерпретации материалов ГСЗ профилей 26 и 25 (Baranova, Egorova, & Omel'chenko, 2008; Yegorova & Gobarenko, 2010; Yegorova, Baranova, & Omelchenko, 2010).

Как известно, наличие волноводов (зон пониженных скоростей в консолидированной земной коре) связано с зонами глубинных разломов различной геодинамической природы и морфологии. В данном случае основным фактором формирования волновода является рассмотренный выше высокоамплитудный сброс, который отделяет континентальный блок шельфовой зоны от глубоководной впадины (Baranova, Egorova, & Omel'chenko, 2008).

Предпосылками для формирования месторождений углеводородов в краевой части шельфа и на континентальном склоне Черного моря являются установленные по сейсмическим данным признаки существования больших выступов, вероятно разуплотненных кристаллических и метаосадочных пород. Обнаруженная в западной глубоководной части Черного моря кольцевая морфоструктура пространственно расположена над одним из крупных выступов домелового фундамента, вероятно разуплотненных кристаллических и метаосадочных пород (Рис. 19).

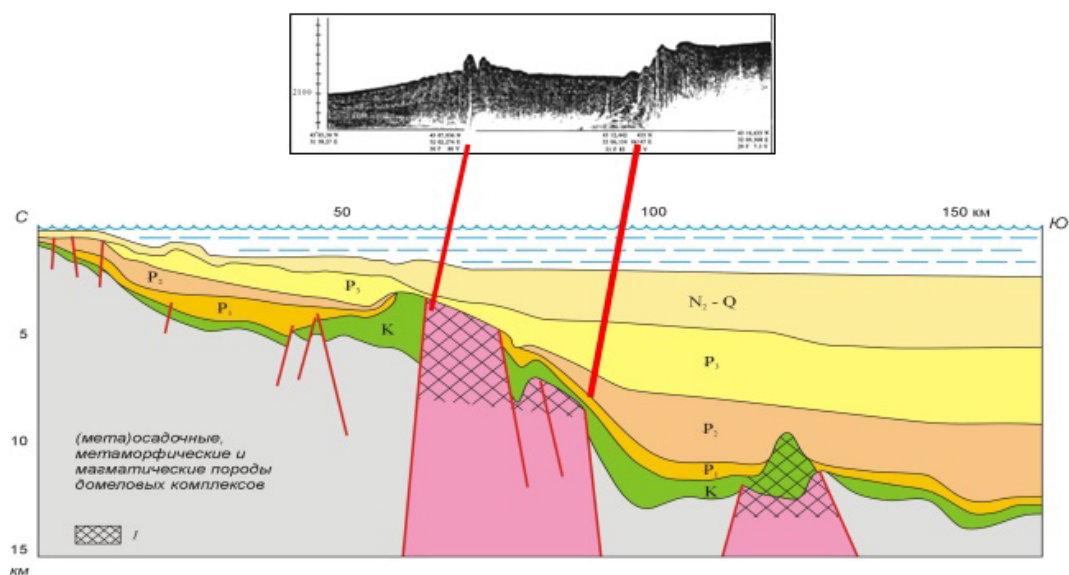


Рисунок 19. Морфология домеловых формаций в Западно-Черноморской впадине (Dontsov & Lukin, 2006) и эхограммах (вверху) кольцевой морфоструктуры дна: 1 – массивные залежи УВ в разуплотненных породных массивах

Следует отметить, что такие поднятия играют особую роль как в локализации биогенно-карбонатных сооружений и обломочно-карбонатных аккумулятивных тел, так и в их вторичных преобразованиях (перекристаллизация, доломитизация и др.) с образованием дополнительной пористости (Lukin, 1997; Starostenko et al., 2012).

Особенности формирования и геодинамической эволюции Черноморской мегавпадины позволяют предполагать развитие таких разуплотненных зон в

ее фундаменте, связанных с зонами рифтогенных разломов. Перспективной в этом отношении представляется область в пределах трансчерноморской Одесско-Синопского разломной зоны, где домеловые отложения образуют поднятия, осложненные серией разрывных нарушений, над которыми зафиксированы десятки грязевых вулканов. Мощные грязевулканические процессы являются результатом струйной миграции мантийных флюидов в разуплотненные зоны кристаллического фундамента вдоль разломов различного

масштаба. В зависимости от конкретных структурно-тектонических и формационных условий, эти потоки сопровождаются тем или иным признаками их взаимодействия с осадочным чехлом (грязевой вулканизм и различные проявления грязевого диапиризма, формирования газогидратных скоплений и др.).

На локальном уровне такие зоны могут быть связаны с проявлениями термоусадки и тектоно-кессонного эффекта, обусловленного тектоническим поднятием отдельных блоков фундамента и формированием интрузий (Lukin, 1997). Именно проявления термоусадки и тектоно-кессонного эффекта являются следствием формирования в вышележащих постмеловых отложениях своеобразных концентрических каналов. Нам представляется, что совокупность таких концентрических каналов образует более крупную Черноморскую трубу дегазации. Пожалуй, внешним ее ограничением является Циркумчерноморская система разномасштабных разломов с ее тектоническим оперением, которая непосредственно связана с субвертикальными зонами деструкции горных пород – зонами напряжения, разуплотнения и ослабления, которые были каналами миграции глубинных флюидов и газообразных углеводородов.

4. ВЫВОДЫ

Беспрецедентная интенсивность газовой разгрузки дна Черного моря (газовые проявления, газогидратные скопления, продукты микробиогенной минерализации), наряду с сероводородным заражением, представляют собой уникальный средообразующий, экологический и ресурсный феномен этого нефтегазоносного мегабассейна. Многочисленные геологические, геохимические и геофизические данные свидетельствуют в пользу термогенного происхождения метана.

Выполнена систематизация и упорядочена терминология различных форм газопроявлений морского дна. Подобно передаче тепловой энергии из недр в виде рассеянного (кондуктивного) и сосредоточенного (конвективного) потока, выделены две принципиально подобные формы газовых проявлений со дна морей и океанов.

На основе анализа потенциальных полей и сейсмической томографии обосновано рифтовое строение мегавпадины Черного моря, предусматривающее существенное различие в механизмах образования ее главных структурных единиц – западной и восточной впадин. Современная Черноморская мегавпадина претерпела в своем развитии две стадии. В прогрессивную стадию сформировался палеосвод, обусловленный подъемом Западного мантийного диапира. Регрессивная стадия связывается с палеоэоценом, когда произошло резкое, по механизму пландж-принципа погружение Западного палеосвода во внутреннюю область мантийного диапира, которое спровоцировало раздвиг и последующий диапиризм в восточной части Черноморской мегавпадины.

Первопричиной рифтогенеза ЗЧВ является подъем астеносферного диапира, приводящий к развитию вертикальных смещений литосферы, которые в свою очередь приводят к трехлучевому растяжению отдельных участков земной коры Скифской плиты. Образование ВЧВ обусловлено раздвигом, т.е. разры-

вом сплошности маломощной редуцированной литосферы Эвксинской субконтинентальной плиты. При этом образование диапира – явление вторичное, связанное с декомпрессией астеносферы под раздвигом.

Указанные диапиры являются проявлениями мантийной мультиинтрузии как структуры восходящего движения флюидного потока в виде плюма. Их сегменты, соответствующие апикальным частям плюма, с одной стороны характеризуются катагенезом и метагенезом в соответствии с фазами интенсивного прогибания бассейна. С другой стороны – гипогенно-алогенетическим метасоматозом центральных частей “безгранитной” коры ВЧВ и ЗЧВ, обусловленным магматической иньекцией и пластификацией ее вещества.

Интенсивные длительно существующие нередко взрывные выходы углеводородов и других глубинных газов на поверхность фиксируются в грязевых вулканах. По сути, грязевые вулканы – это путепроводы углеводородсодержащих флюидов с достаточно больших глубин активных геодинамических зон. Транспорт грязевого материала, который мы наблюдаем в таких вулканах, осуществляется газофлюидной смесью, вырывающейся под большим давлением со значительных глубин.

Мегавпадина Черного моря – один из самых сложных в мире тектоно-геодинамических узлов с мощным восходящим углеводородным потоком, обусловленным внедрением мантийного плюма, который мы рассматриваем в качестве Черноморской трубы дегазации. Нам представляется, что ее внешним ограничением является Циркумчерноморская система разномасштабных разломов с ее тектоническим оперением, которая непосредственно связана с субвертикальными зонами деструкции горных пород – зонами напряжения, разуплотнения и ослабления, которые были каналами миграции глубинных флюидов и газообразных углеводородов.

Взаимодействие плюма с различными структурами осадочного чехла, промежуточного комплекса и фундамента обусловило формирование Черноморского нефтегазоносного мегабассейна с залежами в различных по морфологии ловушках (резервуарах). В частности, можно предположить формирование крупных залежей в рифогенно-карбонатных телах и разуплотненных массивах пород разновозрастного фундамента, связанных с зонами рифтогенных разломов.

Особенности формирования и геодинамической эволюции Черноморской мегавпадины позволяют рассматривать верхнюю аккреционную часть кристаллического фундамента, наряду с осадочным чехлом, в качестве самостоятельного нефтегазоносного этажа литосферы.

БЛАГОДАРНОСТЬ

Настоящая работа выполнена в рамках целевой комплексной программы научных исследований НАН Украины “Комплексный мониторинг, оценка и прогнозирование динамики состояния морской среды и ресурсной базы Азово-Черноморского бассейна в условиях растущей антропогенной нагрузки и климатических изменений” в тесном творческом сотрудничестве с академиками НАН Украины А.Е. Лукиным и Е.Ф. Шнюковым.

REFERENCES

- Afanasenkov, A.P., Nikishin, A.M., & Obukhov, A.N. (2007). *Geologicheskoe stroenie i uglevodorodnyy potentsial Vostochno-Chernomorskogo regiona*. Moskva: Nauchnyy mir.
- Areshev, E.G., Gavrillov, V.P., & Pospelov, V.P. (1997). Granitnyy sloy zemnoy kory kak novyy neftegazonosnyy etazh litosfery. *Geologiya, Geofizika i Razrabotka Neftyanykh Mestorozhdeniy*, (1), 11-13.
- Banks, C.J., & Robinson, A. (1997). Mesozoic Strike-Slip Back-Arc Basins of the Western Black Sea Region. *Regional and Petroleum Geology of the Black Sea and Surrounding Region*, (68), 53-62.
- Baranova, E.P., Egorova, T.P., & Omel'chenko, V.D. (2008). Pereinterpretatsiya seismicheskikh materialov GSZ i gravitatsionnoe modelirovanie po profilyam 25, 28 i 29 v Chernom i Azovskom moryakh. *Geofizicheskiy Zhurnal*, 30(5), 124-144.
- Bugaenko, I.V., Shumlyanskaya, L.A., Zaets, L.N., & Tsvetkova, T.A. (2008). Trekhmernaya R-skorostnaya model' mantii Chernogo morya i privileyushchey territorii. *Geofizicheskiy Zhurnal*, 30(5), 145-160.
- Bugaenko, I.V., Zaets, L.N., & Tsvetkova, T.A. (2015). Skorostnaya tipizatsiya sredney i nizhney mantii Evropy. *Geofizicheskiy Zhurnal*, 37(3), 88-101.
- Chekunov, A.V. (1987). Riftogenez i mekhanizm formirovaniya Chernomorskoy vpadiny. *Doklady AN USSR*, B(2), 25-28.
- Dontsov, V.V., & Lukin, A.E. (2006). Ob endogennykh faktorakh formirovaniya neftyanykh zalezhey v kristallicheskom fundamente Kyulonskoy vpadiny na shel'fe Yuzhnogo V'yetnama. *Doklady RAN*, 407(1), 64-67.
- Egorov, V.N., Artemov, Yu.G., & Gulin, S.B. (2011). *Metanovye sipy v Chernom more – sredobrazuyushchaya i ekologicheskaya rol'*. Sevastopol: NPTs "EKOSI-Gidrofizika".
- Egorova, T.P., Gobarenko, V.S., Yanovskaya, T.B., & Baranova, K.P. (2012). Stroenie litosfery Chernogo morya po rezul'tatam 3D gravitatsionnogo analiza i seismicheskoy tomografii. *Geofizicheskiy Zhurnal*, 34(5), 38-59.
- Geyko, V.S., Bugaenko, I.V., Shumlyanskaya, L.A., Zaets, L.N., & Tsvetkova, T.A. (2007). 3D R-skorostnoe stroenie verkhney mantii Vostochnogo Sredizemnomor'ya. *Geofizicheskiy Zhurnal*, 29(4), 13-30.
- Gintov, O.B., Tsvetkova, T.A., Bugaenko, I.V., & Murovskaya, A.V. (2016). Nekotorye osobennosti stroeniya mantii Vostochnogo Sredizemnomor'ya i ikh geodinamicheskaya interpretatsiya. *Geofizicheskiy Zhurnal*, 38(1), 17-29.
- Glumov, I.F., Gulev, V.L., Senin, B.V., & Karnaukhov, S.M. (2014). *Regional'naya geologiya i perspektivy neftegazonosnosti Chernomorskoy glubokovodnoy vpadiny i privileyushchikh shel'fovyykh zon*. Moskva: Nedra.
- Goncharov, V.P., Neprochnov, Yu.P., & Neprochnova, A.F. (1972). *Rel'yef dna i glubinnoe stroenie Chernomorskoy vpadiny*. Moskva: Nauka.
- Gorshkov, A.S., Meysner, L.B., Solov'yev, V.V., Tugolev, D.A., & Khakhalev, E.M. (1985). *Tektonika mezokaynozoykskikh otlozheniy Chernomorskoy vpadiny*. Moskva: Nedra.
- Grachev, A.F. (2000). Magmaticheskie plyумы i problemy geodinamiki. *Fizika Zemli*, (4), 3-37.
- Graham, R., Kaymakci, N., Horn, B.W. (2013). Revealing the Mysteries of the Black Sea. The Black Sea: Something Different? *GEO ExPro Magazine*, (October), 58-62.
- Helmberger, D.V., & Ding, L. (1998). Seismic Evidence That the Source of the Iceland Hotspot Lies At the Core – Mantle Boundary. *Nature*, 396(6708), 251-255.
- Hippolyte, J.-C. (2002). Geodynamics of Dobrogea (Romania): New Constraints on the Evolution of the Tornquist-Teisseyre Line, the Black Sea and the Carpathians. *Tectonophysics*, 357(1-4), 33-53. [https://doi.org/10.1016/S0040-1951\(02\)00361-X](https://doi.org/10.1016/S0040-1951(02)00361-X)
- Kaz'min, V.G., Shreyder, A.A., Finetti, I.I., Melikhov, V.R., Bulychev, A.A., Gilod, D.A., Andreeva, O.I., & Shreyder, A.A. (2000). Rannie stadii razvitiya Chernogo morya po seismicheskim dannym. *Geotektonika*, (1), 46-60.
- Kindsley, R.H., & Shilling, J.-G. (1998). Plum Ridge Interaction in the Easter-Sales and Gona Seamount Chain-Easter Microplate System: Pb Isotope Evidence. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 103(B10), 24159-24177. <https://doi.org/10.1029/98jb01496>
- Koblev, V.P. (2003). Geodinamicheskaya model' Chernomorskoy megavpadiny. *Geofizicheskiy Zhurnal*, 25(2), 15-35.
- Koblev, V.P. (2016). Plyum-tektonicheskiy aspekt riftogeneza i evolyutsii megavpadiny Chernogo morya. *Geologiya i Poleznye Iskopaemye Mirovogo Okeana*, (2), 16-36.
- Letnikov, F.A. (1992). *Sverkhglubinnye flyuidnye sistemy Zemli*. Novosibirsk: Nauka.
- Leyn, A.Yu., & Ivanov, M.V. (2009). *Biokhimicheskiy tsikl metana v okeane*. Moskva: Nauka.
- Lukin, A.E. (1997). *Litogeodinamicheskie faktory neftegazonakopleniya v avlakogennykh basseynakh*. Kyiv: Naukova dumka.
- Lukin, A.E. (2003). Izotopno-geokhimicheskie indikatory uglekisloy i uglevodorodnoy degazatsii v Azovo-Chernomorskoy regione. *Heolohichniy Zhurnal*, (1), 59-73.
- Lukin, A.E., & Pikovskiy, Yu.I. (2004). O roli glubinnykh i superglubinnykh flyuidov v protsessakh neftegazobrazovaniya. *Heolohichniy Zhurnal*, (2), 21-33.
- Lukin, A.E. (2011). Sozdanie ucheniya o neftegazonosnykh kristallicheskiykh massivakh – nasushchnaya problema geologii XXI veka. In *Degazatsiya Zemli i genezis neftegazovykh mestorozhdeniy (k 100-letiyu so dnya rozhdeniya akademika P.N. Kropotkina)* (pp. 405-441). Moskva: GEOS.
- Lukin, A.E. (2014). Uglevodorodnyy potentsial bol'shikh glubin i perspektivy ego osvoeniya v Ukraine. *Geofizicheskiy Zhurnal*, 36(4), 3-23.
- Lukin, A.E. (2015). Sistema "superplyum – glubokozalegayushchie segmenty neftegazonosnykh basseynov" – neisshchepaemyy istochnik uglevodorodov. *Heolohichniy Zhurnal*, (2), 7-20.
- Lukin, O.Yu., Dontsov, V.V., Burlin, Yu.K., & Gladun, V.V. (2005). Pro deiaki zakonimosti naftohazonosnosti kristallichnogo fundamentu. *Heolohichniy Zhurnal*, (3), 7-22.
- Marakushev, A.A., & Marakushev, S.A. (2008). Obrazovanie neftyanykh i gazovykh mestorozhdeniy. *Litologiya i Poleznye Iskopaemye*, (5), 505-521.
- McGinnis, D., Wüest, A., Schubert, C., Klauser, L., Lorke, A., & Kipfer, R. (2004). Upward Flux of Methane in the Black Sea. *Environmental Hydraulics and Sustainable Water Management*, (2), 423-429. <https://doi.org/10.1201/b16814-69>
- Mirlin, E.G. (1985). *Razdvizhenie litosfernykh plit i riftogenez*. Moskva: Nedra.
- Nikishin, A.M., Okay, A.I., Tüysüz, O., Demirel, A., Amelin, N., & Petrov, E. (2015). The Black Sea Basins Structure and History: New Model Based on New Deep Penetration Regional Seismic Data. Part 1: Basins Structure and Fill. *Marine and Petroleum Geology*, (59), 638-655. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2014.08.017>
- Nikishin, A.M., Wannier, M., Alekseev, A.S., Almendinger, O.A., Fokin, P.A., Gabdullin, R.R., & Rubtsova, E.V. (2015). *Mesozoic to Recent Geological History of Southern Crimea and the Eastern Black Sea Region*. London: Geological Society, Special Publications. <https://doi.org/10.1144/sp428.1>
- Nolet, G., Karato, S., & Montelli, R. (2006). Plume Fluxes From Seismic Tomography. *Earth and Planetary Science Letters*, 248(3-4), 685-699. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2006.06.011>

- Ol'shtynskiy, S.P. (2006). Emissiya gaza v atmosferu s poverkhnosti Chernogo morya. In *Fundamental'nye issledovaniya vazhneyshikh problem estestvennykh nauk na osnove integratsionnykh protsessov v obrazovanii i nauke* (pp. 69-71). Sevastopol: Morskoy gidrofizichesky institut NAN Ukrainy.
- Orovetskiy, Yu.P., & Kobolev, V.P. (2006). *Goryachie poyasa Zemli*. Kyiv: Naukova dumka.
- Polikarpov, H.H., & Yehorov, V.M. (1989). Vyivleno aktyvni hazovydilennia z dna Chornoho moria. *Visnyk AN USSR*, (10), 108-111.
- Pushcharovskiy, Yu.I. (2000). Tektonicheskie zony v strukture dna okeanov. *Geotektonika*, (3), 3-20.
- Razvalyaev, A.V. (1988). *Kontinental'nyy riftogenez i ego predystoriya*. Moskva: Nedra.
- Senin, B.V., Nikishin, A.M., & Amelin, N.V. (2012). *Izuchenie geologicheskogo stroeniya dokaynozoykskikh otlozheniy i glubinnoy struktury basseyna Chernogo morya*. Otchet po programme morskikh nauchnykh rabot. Gelendzhik: OAO "Soyuzmorgeo".
- Shnyukov, E.F., Kobolev, V.P., & Pasyukov, A.A. (2013). *Gazovyy vulkanizm Chernogo morya*. Kyiv: Lohos.
- Shnyukov, E.F., Stupina, L.V., Rybak, E.N. (2015). *Gryazevye vulkany Chernogo morya*. Kyiv: Lohos.
- Shnyukov, E.F., & Netrebskaya, E.Ya. (2016). O glubinnom stroenii eruptivnogo kanala gryazevykh vulkanov. *Geologiya i Poleznye Iskopaemye Mirovogo Okeana*, (4), 54-66.
- Starostenko, V.I., Kobolev, V.P., Orovetskiy, Yu.P., Bur'yanov, V.B., & Makarenko, I.B. (2000). Glubinnoe stroenie i geologicheskaya priroda Chernomorskoy vpadiny (rezul'taty izucheniya polya sily tyazhesti). *Geologiya Chernogo i Azovskogo morey*, 175-184.
- Starostenko, V.I., Lukin, A.E., Rusakov, O.M., Pashkevich, I.K., Kutas, R.I., Gladun, V.V., Lebed' T.V., Maksimchuk, P.Ya., Legostaeva, O.V., & Makarenko, I.B. (2012). O perspektivakh otkrytiya massivnykh zalezhey uglevodorodov v geterogennykh lovushkakh Chernogo morya. *Geofizicheskiy Zhurnal*, 34(5), 3-21.
- Starostenko, V.I., Rusakov, O.M., Pashkevich, I.K., Kutas, R.I., Makarenko, I.B., Legostaeva, O.V., Lebed, T.V., & Savchenko, A.S. (2015). Heterogeneous Structure of the Lithosphere in the Black Sea from a Multidisciplinary Analysis of Geophysical Fields. *Geofizicheskiy Zhurnal*, 37(2), 3-28.
- Trotsyuk, V.Ya. (1982). *Prognoz naftogazonosnosti akvatoriy*. Moskva: Nedra.
- Tugolesov, D.A. (1989). *Al'bom strukturnykh kart i kart mostchnostey kaynozoykskikh otlozheniy Chernomorskoy vpadiny*. Moskva: GUGK.
- Valeev, R.M. (1978). *Avlakogeny Vostochno-Evropeyskoy platformy*. Moskva: Nedra.
- Valyaev, B.M. (1994). Uglevodorodnaya degazatsiya Zemli: masshtaby i rol' v neftegazonakoplenii. *Geologiya Nefti i Gaza*, (9), 38-42.
- Whaley, J. (2012). *Cross Border Cooperation Leads To Better Geological Understanding*. GWL: GEOEx Pro.
- Yanovskaya, T.B., Gobarenko, V.S., & Egorova, T.P. (2016). Stroenie podkorovoy litosfery Chernomorskogo basseyna po seysmologicheskim dannym. *Fizika Zemli*, (1), 15-30.
- Yegorova, T., Baranova, E., & Omelchenko, V. (2010). The Crustal Structure of the Black Sea from the Reinterpretation of Deep Seismic Sounding Data Acquired in the 1960s. *Geological Society, London, Special Publications*, 340(1), 43-56. <https://doi.org/10.1144/sp340.4>
- Yegorova, T., & Gobarenko, V. (2010). Structure of the Earth's Crust and Upper Mantle of West- and East-Black Sea Basins Revealed from Geophysical Data and its Tectonic Implications. *Geological Society, London, Special Publications*, 340(1), 23-42. <https://doi.org/10.1144/sp340.3>
- Yegorova, T., Gobarenko, V., & Yanovskaya, T. (2013). Lithosphere Structure of the Black Sea from 3-D Gravity Analysis and Seismic Tomography. *Geophysical Journal International*, 193(1), 287-303. <https://doi.org/10.1093/gji/ggs098>

ABSTRACT (IN RUSSIAN)

Цель. Обсуждение проблемных и дискуссионных вопросов активного газовыделения, глубинного строения, формирования и эволюции Черного моря.

Методика. Комплексная интерпретация геолого-геофизических материалов (гидроакустических, сейсмических и сейсмологических исследований, с привлечением результатов моделирования потенциальных полей), полученных в последние годы в Азово-Черноморском регионе.

Результаты. Обосновано существенное различие в механизмах образования главных структурных единиц Черноморской мегавпадины – западной и восточной впадин. Термодинамический режим, ограниченное количество биомассы в осадочном выполнении мегавпадины Черного моря и приуроченность газовых выходов к разломам консолидированной коры свидетельствуют в пользу абиогенной природы метана. Взаимодействие мощного восходящего углеводородного потока с различными структурами осадочного чехла и фундамента обусловило формирование множества месторождений углеводородов Черноморской мегавпадины.

Научная новизна. Привлечение механизма плюм-тектонической глубинной дегазации позволило с новых позиций оценить роль геодинамических факторов, связанных как с эволюцией Черноморской мегавпадины, так и с генезисом углеводородов.

Практическая значимость. Анализ путей миграции глубинных флюидов, зон разгрузки глубинной энергии позволит разработать новую стратегию поиска залежей нефти и газа и нестандартно подойти к оценке запасов углеводородного сырья Черноморского нефтегазонасного мегабассейна.

Ключевые слова: Черноморская мегавпадина, газовыделения, глубинное строение, формирование, эволюция, плюм-тектоника

ABSTRACT (IN UKRAINIAN)

Мета. Обговорення проблемних та дискусійних питань активного газовиділення, глибинної будови, формування та еволюції Чорного моря.

Методика. Комплексна інтерпретація геолого-геофізичних матеріалів (гідроакустичних, сейсмічних і сейсмологічних досліджень із залученням результатів моделювання потенційних полів), отриманих останніми роками в Азово-Чорноморському регіоні.

Результати. Обґрунтована істотна відмінність у механізмах утворення головних структурних одиниць Чорноморської мегазападини – західної та східної западин. Термодинамічний режим, обмежена кількість біомаси в осадовому виконанні мегазападини Чорного моря й приуроченість газових виходів до розломів консолідованої кори свідчать на користь абіогенної природи метану. Взаємодія потужного висхідного вуглеводневого потоку з різними структурами осадового чохла і фундаменту зумовила формування безлічі родовищ вуглеводнів Чорноморської мегазападини.

Наукова новизна. Залучення механізму плюм-тектонічної глибинної дегазації дозволило з нових позицій оцінити роль геодинамічних факторів, пов'язаних як з еволюцією Чорноморської мегазападини, так і з генезисом вуглеводнів.

Практична значимість. Аналіз шляхів міграції глибинних флюїдів, зон розвантаження глибинної енергії дозволить розробити нову стратегію пошуку покладів нафти й газу та нестандартно підійти до оцінки запасів вуглеводневої сировини Чорноморського нафтогазоносного мегабасейну.

Ключові слова: Чорноморська мегазападина, газовиділення, глибинна будова, формування, еволюція, плюм-тектоніка

ARTICLE INFO

Received: 7 December 2016

Accepted: 30 January 2017

Available online: 30 March 2017

ABOUT AUTHORS

Volodymyr Kobolev, Doctor of Geological Sciences, Senior Researcher of the Petromagnetism and Marine Geophysics Department of the Institute, Institute of Geophysics named after S.I. Subbotin of the National Academy of Sciences of Ukraine, 32 Palladin Ave., 03142, Kyiv, Ukraine. E-mail: kobol@igph.kiev.ua