

Зона разуплотнения термобарического типа в кристаллической коре северо-западного шельфа Черного моря — потенциальный региональный коллектор абиогенного метана

В. А. Корчин, О. М. Русаков, 2019

Институт геофизики им. С. И. Субботина НАН Украины, Киев, Украина
Поступила 28 ноября 2018 г.

Сейсмичні дослідження північно-західного шельфу Чорного моря виявили зони низьких швидкостей (ЗНШ) у кристалічній корі на глибинах 6—16 км. Уперше описано новий термобаричний механізм їх утворення. На його користь свідчать активний температурний режим літосфери і глибинні геодинамічні процеси регіону. ЗНШ в основному зумовлені термічним розуцільненням гірських порід, яке не компенсується відповідним геостатичним тиском. Породи таких зон характеризуються підвищеними значеннями тріщинуватості й пористості та зниженими густиною, пружними параметрами і теплопровідністю. Оскільки породи проникні й гігроскопічні, вони можуть більш вільно трансформувати, поглинати і локалізувати мантійні вуглеводневі флюїди, які, в свою чергу, додатково руйнують гірське середовище. В межах ЗНШ локалізація вуглеводнів підтверджується наявністю близько 3200 активних газових виходів й 8 газових і газоконденсатних родовищ, 6 з яких пов'язані з трубою дегазації мантійного метану. Причому вперше встановлено просторовий зв'язок між ЗНШ і трубою дегазації, до якої тяжіють родовища вуглеводнів.

ЗНШ слід розглядати як новий критерій пошуку термобаричних пасток вуглеводнів. Сприятливі умови для накопичення абиогенного метану існують на глибині 6—16 км, що може істотно розширити вуглеводневий потенціал шельфу при використанні сучасної технології буріння.

Ключові слова: Чорне море, північно-західний шельф, верхня кристалічна кора, зони малої сейсмичної швидкості, термобарична модель розуцільнення кристалічних порід, регіональна пастка абиогенного метану.

Введение. Черное море является самым большим в мире резервуаром растворенного метана, где его количество глубже 150—200 м оценивается в 96 Тг [Reeburgh et al., 1991]. Этот объем почти в 1,6 раза превышает подтвержденные запасы всех месторождений газа на шельфе Турции, Болгарии, Румынии и Украины [Русаков, Кутас, 2014]. Количественные расчеты показали, что деятельность микроорганизмов не может обеспечить существующую концентрацию метана в Черном море. Ежегодный привнос органического вещества максимально обеспечивает образование только 0,25 Тг метана [Reeburgh

et al., 1991]. Поэтому потребовалось бы почти 400 лет для заполнения метаном акватории, что невозможно, поскольку время существования метана в Черном море составляет максимум 20 лет [Reeburgh et al., 1991]. По данным Иванова и Лейн [Ivanov, Lein, 2006], в Черном море редуцированием метаногенами диоксида углерода ежегодно производится 9,96 Тг метана, который, однако, полностью расходуется в процессе анаэробного окисления.

Несмотря на то, что бурению 11 скважин на шельфе, склоне и в глубоководной котловине в экономических зонах Румынии, Болгарии и Турции предшествовали 2D и

3D сейсмическая разведка МОГТ современной аппаратурой и новейшей технологии обработки результатов наблюдений на мощных компьютерных системах, его коэффициент успешности близок к нулю. Об этом свидетельствует тот факт, что 10 скважин были заглушены из-за непромышленных запасов углеводородов или их отсутствия, а оценка перспектив одной из них скрыта под покровом коммерческой тайны [Русаков, Кутас, 2014]. Низкая эффективность поисков углеводородов в Черном море обусловлена только тем, что их стратегия базировалась на догматах органической концепции происхождения метана. Во всех случаях поисково-разведочные работы были традиционно направлены на выявление антиклинальных структур, где, по мнению сторонников биологической концепции, должны залежать углеводороды. Фатальной ошибкой при решении о разворачивании широкомасштабной поисково-разведочной компании было игнорирование того фундаментального факта, что Черное море с момента своего образования было замкнутым бассейном. В таких условиях деятельность бактерий обусловила интенсивную сульфатредукцию и массивное сероводородное заражение из-за растворенных в воде сульфатов, в результате чего катастрофически уменьшилось содержание органического вещества уже на стадии седиментогенеза [Баженова и др., 2003]. К обоснованному выводу о слабой способности майкопской свиты генерировать углеводороды в промышленном масштабе в Черном море [Русаков, Кутас, 2014] существенно приблизилась точка зрения ортодоксальных сторонников абиогенной концепции. В крупной монографии единомышленников в обобщенном виде она сформулирована достаточно четко: «майкопская свита и ее эквиваленты не могут быть высококачественной нефтегазоматеринской породой в Черном море, как это часто предполагается» [Simmons et al., 2018].

Приведенная информация убедительно свидетельствует о том, что длительная беспрецедентная концентрация метана

в водах Черного моря может поддерживаться только мощной дегазацией земных недр. Ее различные механизмы всесторонне проанализированы в обширных обзорах [Каракин и др., 2003; Павленкова, 1973; Kuchеров, Krayushkin, 2010; Etiop, Sherwood Lollar, 2013]. Однако в них не рассмотрены зоны низких скоростей (ЗНС) в кристаллической коре в качестве промежуточных коллекторов мантийных углеводородов. Физические свойства образцов широкого спектра пород этих зон изучены в различных модельных одновременно действующих давлениях и температур, соответствующих различным горизонтам земной коры [Корчин, 2013; Корчин и др., 2013; Korchin, 2017].

В шельфовой зоне северо-западной части Черного моря методом глубинного сейсмического зондирования (ГСЗ) выявлены ЗНС на глубинах 6—16 км [Баранова и др., 2011]. Их происхождение недостаточно обосновано лишь трещиноватостью пород глубинных разломов, так как на скоростных разрезах ГСЗ отсутствуют какие-либо тектонические нарушения, в которых могли бы концентрироваться углеводороды. Причем не были учтены температуры и давления, которые обуславливают образование этих ЗНС [Русаков, Корчин, 2015].

Цель настоящих исследований — разработать всеобъемлющий механизм образования ЗНС как зон разуплотнения горных пород, пригодных для локализации неорганического метана в кристаллической коре северо-западной акватории Черного моря. Для этого использован метод петрофизического термобарического моделирования (ПТБМ) вдоль профилей ГСЗ-25 и ГСЗ-26 [Корчин и др., 2013; Korchin, 2017], поскольку он дает возможность учитывать информацию о скоростных разрезах ГСЗ, тектонике, геотермии района исследований и петрофизики высоких давлений и температур. Основным элементом моделирования вещественного состава литосферы является сопоставление материалов ГСЗ с данными экспериментального изучения скоростных параметров горных пород при высоких давлениях и темпера-

турах. Сравнительный анализ геофизических наблюдений и лабораторных исследований физических параметров горных пород при моделировании оправдан наличием соответствующих критериев подобия для обоих наборов данных [Корчин и др., 2013; Korchin, 2017].

Материалы и методы. На рис. 1 представлена информация для изучения ЗНС исследуемой области [Старостенко и др., 2010; Кутас, 2011; Баранова и др., 2012; Козленко, Козленко, 2014; Starostenko et al., 2015; Rusakov, Kutas, 2018], где Каркинитский прогиб и Каламитский вал являются основными тектоническими единицами Скифской платформы. Разломы разных порядков выделены по комплексу геолого-

геофизических данных.

Северный фланг Каркинитского прогиба ограничен эшелоноподобной зоной разломов, обозначающей южную окраину Восточно-Европейской платформы. Наиболее заметным тектоническим нарушением является Одесская зона разлома мантийного происхождения, ширина которой составляет около 100 км. Она состоит из второстепенных разломов северо-востока—юго-запада, которые часто ортогонально смещаются относительно друг друга в направлении на юго-восток.

Профиль ГСЗ-25 северо-восточного—юго-западного направления пересекает Каркинитский прогиб (см. рис. 1, 2). На профиле в пределах ПК 320—500 выявле-

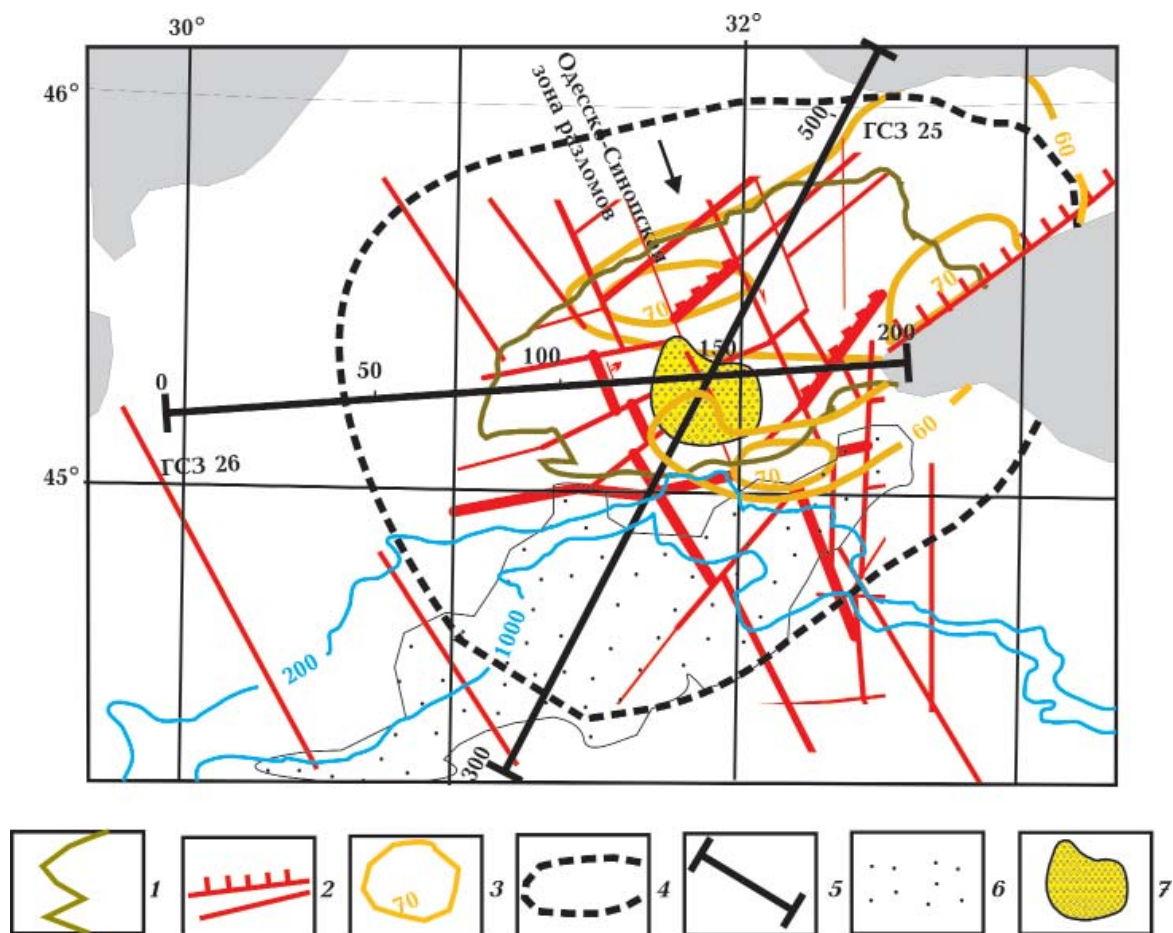


Рис. 1. Геолого-геофизическая обстановка района исследований северо-западной акватории Черного моря: 1 — контур Каркинитского прогиба; 2 — разломы кристаллической коры; 3 — максимумы тепловых потоков, мВт/м²; 4 — проекция ЗНС на земную поверхность; 5 — профили ГСЗ; 6 — газовые выходы со дна моря; 7 — диапир; синие линии—изобаты, м [Старостенко и др., 2010; Кутас, 2011; Баранова и др., 2012; Козленко, Козленко, 2014; Starostenko et al., 2015; Rusakov, Kutas, 2018].

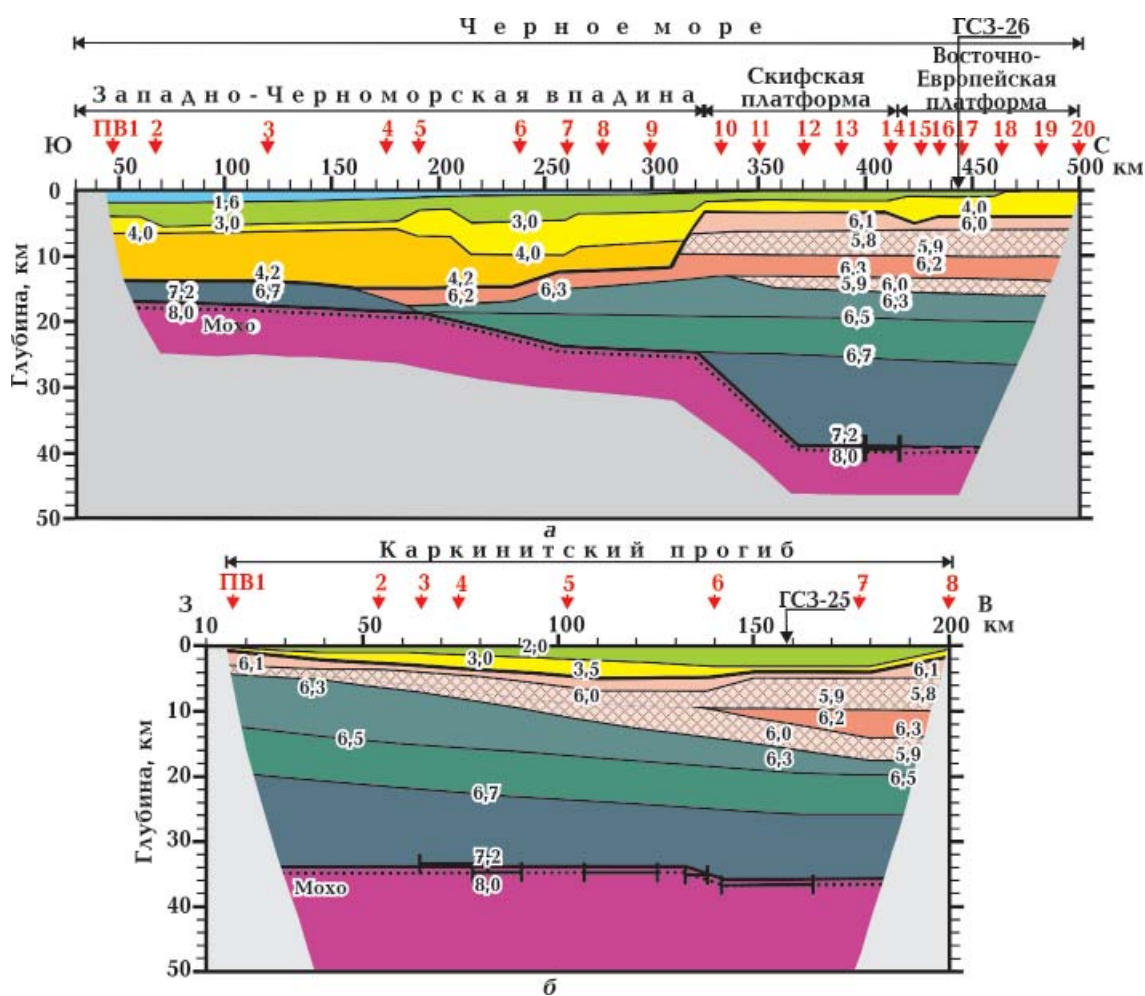


Рис. 2. Скоростные разрезы (V_p , км/с) вдоль профилей ГСЗ-25 (а) и ГСЗ-26 (б) [Баранова и др., 2011]. ЗНС заштрихованы.



Рис. 3. Тепловые потоки и геотермическая модель земной коры вдоль профиля ГСЗ-25 [Кутас, 2011].

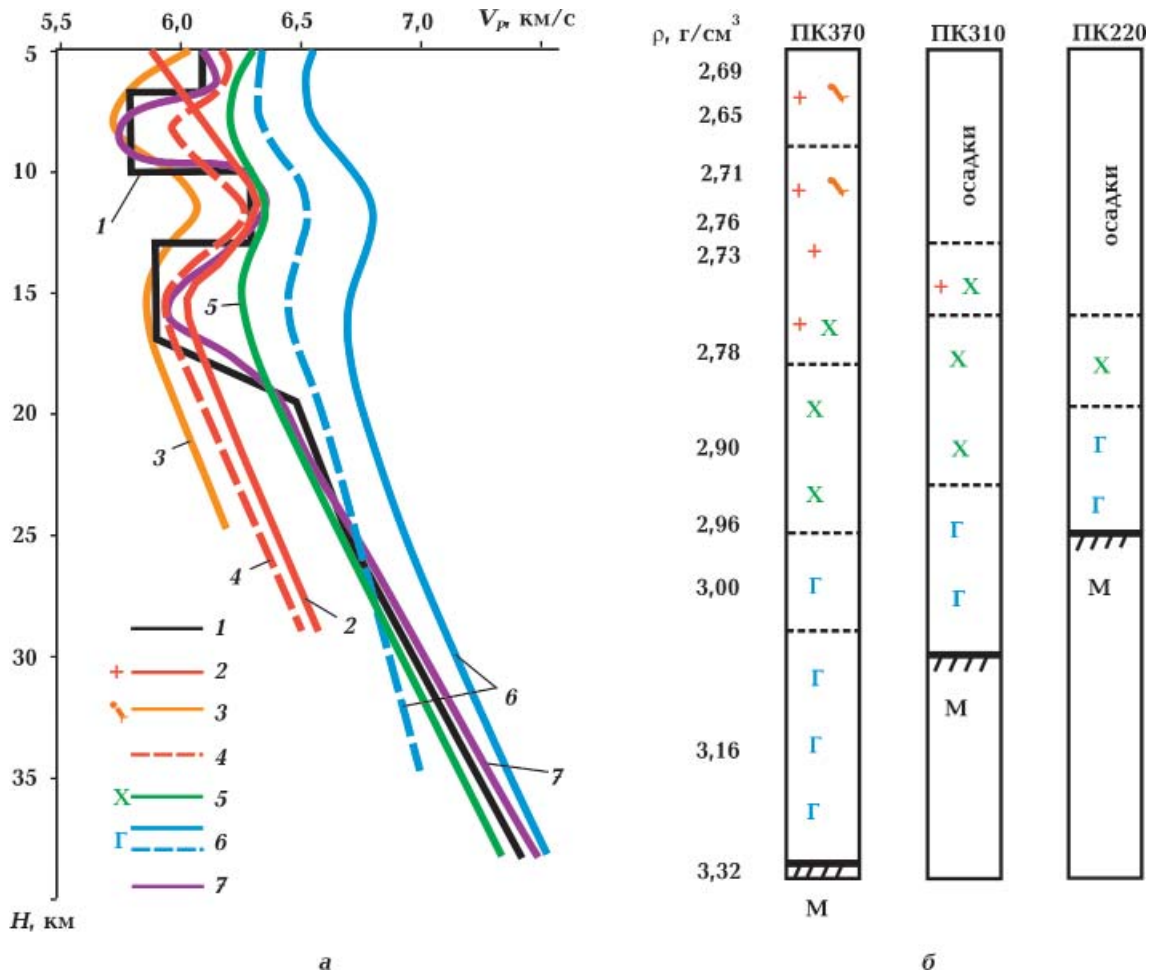


Рис. 4. Сопоставление экспериментальных значений $V_p=f(PT)=f(H)$ для различных пород с данными ГСЗ (а) и модели распределения пород с глубиной на пикетах профиля ГСЗ-25 (б): 1 — скорости по данным ГСЗ, V_p , км/с; 2 — граниты; 3 — гнейсы; 4 — гранитогнейсы; 5 — диориты; 6 — габбро, габбро-нориты; 7 — пироксениты.

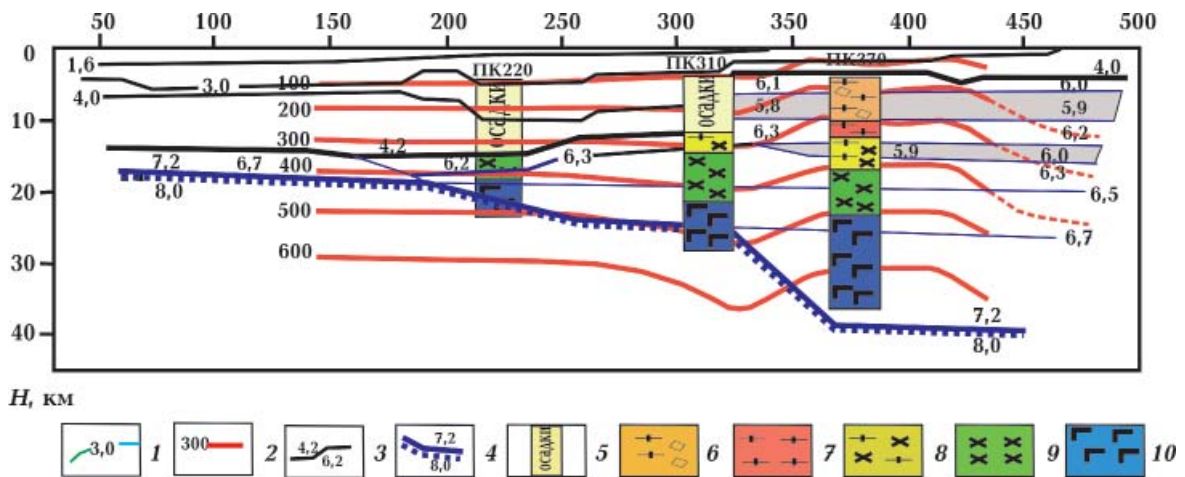


Рис. 5. Сейсмический профиль ГСЗ-25, дополненный колонками вещественного состава и значениями температур на различных глубинах: 1 — изолинии скоростей, км/с; 2 — изотермы, °С; 3 — кристаллический фундамент; 4 — граница М; 5 — осадки; 6 — гранитогнейсы; 7 — граниты; 8 — гранодиориты; 9 — диориты; 10 — габброиды. ЗНС заштрихованы серым цветом.

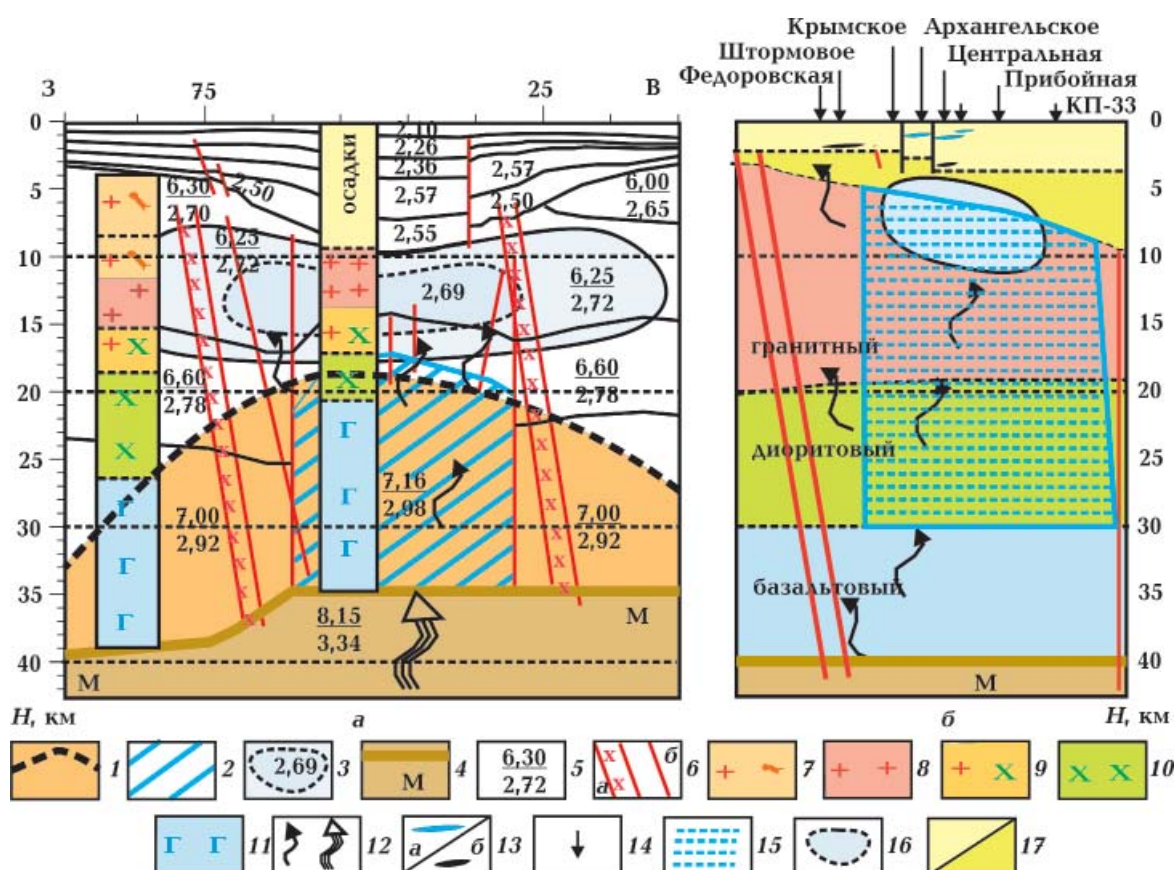


Рис. 6. Фрагмент профиля DOBRE-5 [Starostenko et al., 2015] в районе Каркинитского прогиба (а) и схема «трубы» дегазации в развитие концепции П. Н. Кропоткина и А. Е. Лукина (б) [Старостенко и др., 2015]: 1 — диапир; 2 — ядро диапира (гравитационное моделирование) [Козленко, Козленко, 2014]; 3 — зона термобарического разуплотнения; 4 — граница Мохо; 5 — скорости/плотности; 6 — Одесская зона разломов (а), разломы кристаллической коры и осадочного чехла (б); 7 — гранитогнейсы; 8 — граниты; 9 — гранодиориты; 10 — диориты; 11 — габброиды; 12 — направление движения флюидов; 13 — месторождения: газа (а) и газоконденсата (б); 14 — указатель месторождений углеводородов и перспективных структур; 15 — проницаемое тело пониженной плотности, обусловленное вещественно-структурными преобразованиями, возникшими под влиянием глубинных флюидов; 16 — термобарически разуплотненная кристаллическая кора, перспективная зона на скопление углеводородов в кристаллическом фундаменте; 17 — осадочные породы.

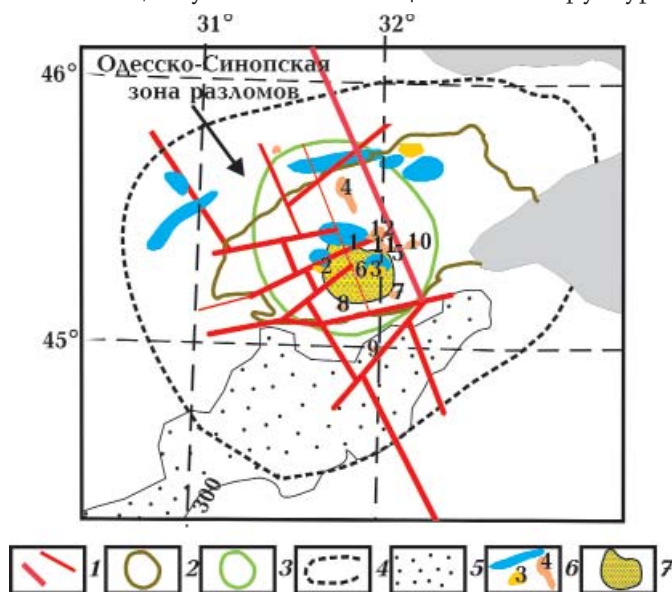


Рис. 7. Связь месторождений углеводородов с особенностями глубинного строения северо-западного шельфа Черного моря: 1 — разломы кристаллической коры различного порядка; 2 — граница Каркинитского прогиба; 3 — труба дегазации; 4 — проекция ЗНС на земную поверхность; 5 — выходы газов; 6 — газовые и газоконденсатные месторождения; 7 — фрагмент древней рифтогенной структуры.

ны ЗНС (скоростью 5,8—6,0 км/с), состоящие из двух отдельных инверсионных горизонтов. Верхний из них располагается на глубине 6—10 км, а нижний — на 14—16 км. Они разделены на глубине 10—14 км межинверсионным слоем со скоростью 6,2—6,3 км/с. Подинверсионная часть разреза характеризуется монотонным нарастанием скорости от 6,3 до 7,2 км/с на подошве коры. Вдоль профиля граница М расположена на глубине 39 км.

Профиль ГСЗ-26 длиной 185 км субширотного простирания пересекает Каркинитский прогиб (см. рис. 1, 2). На профиле (ПК 20—35) закартированы слои ЗНС на глубине 3—4 км со скоростями 6,0 км/с и волновод в районе пересечения с профилем ГСЗ 25 на глубинах 4—18 км, со скоростью 5,8—5,9 км/с (см. рис. 1, 2). Зону подстилают породы со скоростями на верхней кромке 6,0—6,1 и 6,3 км/с на подошве. Зона инверсии (ПК 135—200), толщина которой 4 км, разделена клинообразным слоем со скоростью 6,2—6,3 км/с. Глубина до границы М равна 34 км.

ЗНС (горизонты разуплотнения) земной коры, как показало ПТБМ, прежде всего связаны с геотермической обстановкой на различных глубинах изучаемого района [Корчин и др., 2013; Korchin, 2017]. Поэтому первым этапом изучения северо-западного шельфа Черного моря был анализ распределения температуры в коре с глубиной [Кутас, 1978, 2011].

Вдоль профиля ГСЗ-25 изотерма 100 °С находится на глубине 2—2,5 км (рис. 3). Наиболее приподнятое ее положение в Каркинитском прогибе и его бортах. На глубине 5 км температура изменяется от 100—120 °С на склоне древней платформы до 170—180 °С в Каркинитском прогибе. На Скифской плите температура 140—160 °С, а в переходной зоне к Западно-Черноморской впадине 150—160 °С. На глубине 10 км температура на склоне древней платформы повышается до 160—170 °С, в Каркинитском прогибе до 270—300 °С, в переходной зоне до 230—260 °С и в Западно-Черноморской впадине до 260—290 °С. На глубине 20 км

температуры достигают 270—300, 440—460, 420—450 и 490—520 °С соответственно. Особенности пространственного изменения температур использованы при петрофизическом моделировании.

Район исследований расположен на Скифской плите, непосредственно примыкающей к юго-западному склону Украинского щита (УЩ), причем на границе между ними отсутствует резкое изменение скорости и температуры (см. рис. 2, а, 3). Отсюда следует, что в структурах разного возраста и происхождения физические свойства пород и их изменения с глубиной близки, о чем ранее было показано экспериментальными исследованиями пород однотипного минерального состава геологических объектов УЩ и рифтогенных зон [Корчин и др., 2013; Korchin, 2017]. Поэтому для ПТБМ была подобрана коллекция пород из скважин и обнажений южного склона УЩ. Они представлены гранитогнейсами, диоритами, габброидами, упругие характеристики которых детально изучены при *PT*-условиях опытов в программных высокотемпературных режимах юго-западного склона УЩ.

На распределение температуры в земных недрах существенно влияют величина мантийного теплового потока, радиогенные источники тепла земной коры, теплопроводность среды. На изучаемой площади под действием интенсивного теплового потока поддерживается высокая температура в верхних горизонтах земной коры. Аномальные мантийные тепловые потоки связаны с геодинамическими процессами, сопровождающимися изменением структуры литосферы. Высокие мантийные потоки в Каркинитском прогибе подтверждают их рифтовую природу и молодой возраст [Кутас, 2011]. В связи с существенно высокой температурой изучаемого района по сравнению со склоном УЩ на глубинах ниже 10 км в зависимости $V_{P,S}=f(PT)=f(H)$ были внесены необходимые поправки в изменения скоростей по данным изобар и изотерм. При расчете поправок учтено, что для шельфа характерно более низкое давление с увеличением глубины, нежели

расчетные для моделей УЩ, обусловленное влиянием значительной толщи осадков.

До 8—10 км распределение давлений и температур с глубиной для склона УЩ и шельфа Черного моря достаточно близки [Корчин и др., 2013; Кутас, 1978, 2011]. Как видно из модельных построений (рис. 4), зоны низких скоростей в основном приурочены к горизонтам гранитогнейсов до глубин 10—12 км. Ниже они расположены в области перехода кислых пород к образованиям среднего состава.

Породы среднего состава подстилаются габбро-норитами. Ниже 20 км с высокой вероятностью расположены габброиды, которые с удалением от склона УЩ замещают диориты и габбро-нориты (рис. 4, 5).

Аналогичная петрофизическая термобарическая модель была построена вдоль профиля ГСЗ-26.

Обсуждение результатов. В кристаллической коре породы испытывают сжатие, разогрев, разного рода структурные, а иногда и вещественные превращения, определяемые действием давлений и температур, нагрев сопровождается увеличением их объема. Коэффициент объемного теплового расширения пород: $2 \cdot 10^{-6}—4 \cdot 10^{-4} \text{K}^{-1}$; среднее $3 \cdot 10^{-5} \text{K}^{-1}$. При их разогреве на $300 \text{ }^\circ\text{C}$ наблюдаем увеличение объема минерального вещества на 1—1,5% и соответственное уменьшение плотности [Корчин и др., 2013, 2018]. Действие высокого давления, как правило, приводит к сжатию вещества, величина которого определяется сжимаемостью или коэффициентом всестороннего сжатия. На глубине 5—10 км в коре давление ($P=2,5\div 3,0$ кбар) способно увеличить плотность кристаллических пород не более чем на ~0,5%. Таким образом, на глубинах от 3 до 10 км в земной коре будут преобладать термодинамические силы, способствующие развитию локальных высоких микронапряжений, обуславливающие объемные разрушения структурной целостности пород, что приводит к образованию на этих глубинах разуплотнения минерального вещества земной коры.

В этом интервале P и T в кристаллических породах происходит разуплотнение вещества за счет внутренних разноориентированных напряжений, которые достигают в локальных минеральных контактах значений, превышающих прочность отдельных минералов, что приводит к хрупкому на микроуровне разрушению среды [Корчин, 2013, 2014; Корчин и др., 2013, 2018]. Возрастает количество магистральных микротрещин (разрыхление). Одновременно активизируется в межзерновом пространстве миграция свободной жидкости и газа из-за микронарушения минералов и межзерновых контактов, разрушая породу и образуя в ней вторичные поры и каверны. Этот процесс ключевой для движения глубинных флюидов через породы в ЗНС в естественных условиях их залегания. В ЗНС наблюдается увеличение пористости на 10—25% по сравнению со значениями на глубинах 3—5 км [Корчин 2013, 2014, Korchin 2017].

Глубина залегания ЗНС на северо-западе Черного моря (см. рис. 1, 2, 4, 5) $H=4\div 16$ км по PT -параметрам. Температура выше $250 \text{ }^\circ\text{C}$, давление около 2—3 кбар, что дает право уверенно отнести ЗНС шельфа к термобарическим областям разуплотнения минерального вещества, поскольку оптимальные экспериментальные термодинамические условия зон низких скоростей на глубинах $H=4\div 16$ км, $P=1,5\div 3$ кбар, $T=150\div 350 \text{ }^\circ\text{C}$ [Корчин и др., 2013].

С использованием материалов модельных построений и геофизических данных была выделена площадь на изучаемом участке северо-запада Черного моря, где в кристаллической коре могут быть расположены зоны термобарического разуплотнения минерального вещества на глубинах 4—16 км (см. рис. 1, 4). Она в основном приурочена к гранитогнейсам, гранитам и их контактам с диоритами. Эта группа пород с приближением к Черноморской впадине значительно уменьшается, при этом исчезает ЗНС.

Двухмерное гравитационное моделирование показало, что в основании Каркинитского прогиба лежит шток (диапир)

вулканического происхождения размером 32÷40 км (см. рис. 1, 4 и рис. 6, 1, 2) [Козленко, Козленко, 2014]. Предполагается, что этот диапир сформирован многократными рифтогенными преобразованиями региона и сложен породами повышенной трещиноватости.

По данным обобщения геофизических наблюдений и результатов ПТБМ построена комплексная глубинная модель земной коры Каркинитского прогиба (см. рис. 6). На рис. 6, б приведена также схема «трубы» дегазации в развитие концепции П. Н. Кропоткина и А. Е. Лукина [Старостенко и др., 2015], дополненная нами разуплотненной областью термобарической природы. Разуплотнение минерального вещества земной коры способствует активному транзиту восходящих и нисходящих флюидов, абсорбции и формированию скоплений abiогенных углеводородов [Павленкова, 1973; Каракин и др., 2003; Kucherov, Krayushkin 2010; Etiope, Sherwood Lollar, 2013; Корчин, 2014; Korchin 2017]. Здесь пониженная плотность связана также с серией разломов кристаллической коры и зоной Одесского мантийного разлома (см. рис. 1, 7 и рис. 6, а, б) [Старостенко и др., 2010, 2015, Starostenko et al., 2015]. Породы повышенной трещиноватости вместе с разломами образуют миграционные каналы (трубы дегазации) мантийных флюидов к термобарическим зонам разуплотнения в кристаллической коре, образующими промежуточный резервуар abiогенных углеводородов.

Большинство бассейнов с промышленной нефтегазоносностью на глубинах 5—10 км и более, имеющих пластовые температуры 250—300 °С и высокие давления, приурочены к наиболее глубоким палеозойским, мезозойским и кайнозойским прогибам, депрессиям, формирующимся над суперплюмами в разуплотненных массивах пород кристаллического фундамента [Павленкова, 1973; Чебаненко и др., 2002; Тимурзиев, 2007; Корчин и др., 2013; Старостенко и др., 2015; Лукин, Шестопалов, 2018]. Именно такая ситуация обнаружена на северо-западном шельфе Черного

моря (см. рис. 1, 6). Здесь есть плюмтектонический объект, труба дегазации (трещиноватые породы диапира в окружении разломов) и обширная область разуплотненных пород термобарической природы на глубине 6—16 км, которые перекрыты сверху значительной толщей осадочных пород с пониженной проницаемостью, сохраняющих высокую температуру и давление. Эти зоны могут быть резервуарами abiогенных флюидов в кристаллической коре и природными ловушками мантийной дегазации углеводородов [Корчин, 2013]. Термобарические зоны разуплотнения пород в кристаллической коре, регистрируемые в виде ЗНС, являются новым элементом в теории труб дегазации и скоплений углеводородов (УВ).

Наличие УВ в районе исследований подтверждается существованием около 3200 выходов метана со дна моря и 8 месторождений УВ (рис. 7). В зоне пониженной плотности возможны энергетически выгодные процессы массопереноса, миграции газовой-жидких флюидов, в том числе углеводородов глубинного происхождения или образовавшихся в результате декрепитации минералов пород в верхах кристаллической коры под воздействием газовой-жидких включений при термодинамических условиях горизонтов ЗНС. Здесь происходит активная миграция и локальное накопление газовой-жидких флюидов, в том числе углеводородов, а при определенных условиях (высоком давлении, декомпрессии) — проникновение их в осадочный чехол, где уже по известным законам формируются месторождения УВ. Зоны термобарического структурного разуплотнения наиболее доступны для изучения различными геолого-геофизическими методами, в том числе глубоким бурением, что способствует их наиболее детальному и перспективному изучению с целью поисков углеводородов.

В результате анализа рис. 6, 7 установлены необходимые условия для скопления углеводородов abiогенного генезиса в шельфовой зоне северо-западной части Черного моря, доступных к эксплуата-

ции. Ее элементы включают зону разломов (рифтогены), пересечение разломных структур мантийного заложения, глубинный магматоген (диапир), высокую температуру, пологозалегающие зоны дизъюнктивной дислоцированности метаморфических и изверженных пород (ЗНС и областей пониженной плотности термобарической природы), значительные толщи осадочных пород, перекрывающих ЗНС.

Выводы. Предложен новый термобарический механизм формирования слоев высокой проницаемости горных пород в кристаллической коре шельфа Черного моря, образующих промежуточный резервуар скопления глубинных углеводородов;

– наличие на шельфе глубинных диапиров, мантийных разломов, нарушений

кристаллической коры, зон разрыхления минерального вещества (ЗНС), пространственно связанных с трубой мантийной дегазации в коре, создает благоприятные условия для накопления abiогенных углеводородов и формирования их месторождений, пригодных для коммерческой эксплуатации;

– ЗНС могут служить в качестве нового эффективного поискового критерия разведки углеводородов и объекта существенного расширения углеводородного потенциала шельфа с учетом возможности современной технологии бурения.

Авторы выражают благодарность профессору Р. И. Кутасу за ценные советы, которые существенно улучшили начальный вариант рукописи.

Список литературы

- Баженова О. К., Фадеева Н. П., Сент-Жермес М. Л., Тихомирова Е. Е. Условия осадконакопления в восточном океане Паратетис в олигоцене—раннем миоцене. *Вестн. Моск. ун-та. Сер. Геология*. 2003. № 6. С. 12—19.
- Баранова Е. П., Егорова Т. П., Омельченко В. Д. Обнаружение волновода в фундаменте северо-западного шельфа Черного моря по результатам переинтерпретации материалов ГСЗ профилей 26 и 25. *Геофиз. журн.* 2011. Т. 33. № 6. С. 15—29. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v33i6.2011.116790>.
- Каракин А. В., Курьянов Ю. А., Павленкова Н. И. Разломы, трещиноватые зоны и волноводы в верхних слоях земной оболочки. Москва: Государственный научный центр Российской Федерации, ВНИИгеосистем, 2003, 222 с.
- Козленко М. В., Козленко Ю. В. Структура и эволюция верхней части земной коры северо-западной части шельфа Черного моря. *Геофиз. журн.* 2014. Т. 36. № 4. С. 65—74. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v36i4.2014.116025>.
- Корчин В. А. Термодинамика коровых зон низких сейсмических скоростей (новая научная гипотеза). Саарбрюккен: LAP Lambert Academic Publishing, 2013, 280 с.
- Корчин В. А. Термобарическое моделирование аномалий повышенной пористости в горных породах земной коры — горизонтов возможной миграции и локализации глубинных углеводородов. *Электронный журнал «Глубинная нефть»*. 2014. Т. 2. № 9. С. 1434—1448.
- Корчин В. А., Буртный П. А., Карнаухова Е. Е. Разуплотнение метаморфических пород в термодинамических условиях земной коры (экспериментальные данные). *Геофиз. журн.* 2018. 40. № 4. С. 107—130. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v40i4.2018.140612>.
- Корчин В. А., Буртный П. А., Коболев В. П. Термобарическое петрофизическое моделирование в геофизике. Киев: Наук. думка, 2013, 312 с.
- Кутас Р. И. Геотермические разрезы земной коры и верхней мантии Черного моря и его северного обрамления. *Геофиз. журн.* 2011. Т. 33. № 6. С. 50—67. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v33i6.2011.116792>.
- Кутас Р. И. Поле тепловых потоков и теоретическая модель земной коры. Киев: Наук. думка, 1978, 140 с.
- Лукин А. Е., Шестопапов В. М. От новой геологической парадигмы к задачам региональ-

- ных геолого-геофизических исследований. *Геофиз. журн.* 2018. Т. 40. № 4. С. 3—72. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v40i4.2018.140610>.
- Павленкова Н. И. Волновые поля и модели земной коры (континентального типа). Киев: Наук. думка, 1973, 129 с.
- Русаков О. М., Корчин В. А. Происхождение и локализация абиогенного метана в кристаллической коре северо-западной части Черного моря. *Материалы Всероссийской конференции по глубинному генезису нефти «4-е Кургявцевские чтения»*. Москва: ЦГЭ, 2015, CD-ROM.
- Русаков О. М., Кутас Р. И. Фата моргана биогенной доктрины углеводородов в Черном море. *Геофиз. журн.* 2014. Т. 36. № 2. С. 3—17. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v36i2.2014.116113>.
- Старостенко В. И., Макаренко И. Б., Русаков О. М., Пашкевич И. К., Кутас Р. И., Легостаева О. В. Геофизические неоднородности литосферы мегавпадины Черного моря. *Геофиз. журн.* 2010. Т. 32. № 5. С. 3—20. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v32i5.2010.117496>.
- Старостенко В. И., Лукин А. Е, Русаков О. М., Пашкевич И. К., Лебедь Т. В. Углеводородный сквозьформационный флюидоподводящий канал на северо-западном шельфе Черного моря по данным трехмерного магнитного моделирования. *Геология и полезные ископаемые Мирового океана*. 2015. № 2. С. 147—158.
- Тимурзиев А. И. К созданию новой парадигмы нефтегазовой геологии на основе глубоко—фильтрационной модели нефтегазобразования и нефтегазонакопления. *Геофизика*. 2007. № 4. С. 49—60.
- Чебаненко И. И., Краюшкин В. А., Клочко В. П. и др. Нефтегазоперспективные объекты Украины. Нефтегазоносность фундамента осадочных бассейнов. Киев: Наук. думка, 2002, 296 с.
- Etioppe, G., & Sherwood Lollar, B. (2013). Abiogenic methane on Earth. *Reviews of Geophysics*, 51, 276—299. doi: 10.1002/rog.20011.
- Ivanov, M. K., & Lein, A. Yu. (2006). Fractionation of stable isotopes of carbon and sulfur during biological processes in the Black Sea. In: L. N. Neretin (Ed.), *Past and present water column anoxia* (pp. 373—417). Dordrecht: Springer. https://doi.org/10.1007/1-4020-4297-3_15.
- Korchin, V. Anomalies of low density in the crystalline crust of thermobaric origin: a new insight into migration and localization of hydrocarbons. Monograph 72: Oil and Gas Exploration: Methods and Application. American Geophysical Union, Wiley, 2017, pp. 237—257.
- Kucherov, V. G., & Kravushkin, V. A. (2010). Deep-seated abiogenic origin of petroleum: From geological assessment to physical theory. *Reviews of Geophysics*, 48(1), RG1001. doi:10.1029/2008RG000270.
- Reeburgh, W. S., Ward, B. B., Whalen, S. C., Sandbeck, K. A., Kilpatrick, K. A., & Kerkhof, L. J. (1991). Black-sea methane geochemistry. *Deep-Sea Research Part A. Oceanographic Research Papers*, 38, S1189—S1210. [https://doi.org/10.1016/S0198-0149\(10\)80030-5](https://doi.org/10.1016/S0198-0149(10)80030-5).
- Rusakov, O. M., & Kutas, R. I. (2018). Mantle origin of methane in the Black Sea. *Геофиз. журн.*, 40(5), 191—207. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v40i5.2018.147482>.
- Simmons, M. D., Tari, G. C., & Okay, A. I. (Eds.). (2018). *Petroleum Geology of the Black Sea. Introduction*. Geological Society, London, Special Publication, 464, 1—18. <https://doi.org/10.1144/SP464.15>.
- Starostenko, V., Janik, T., Yegorova, T., Farfuliak, L., Czuba, W., Środa, P., Thybo, H., Artemieva, I., Sosson, M., Volfman, Y., Kolomyets, K., Lysynchuk, D., Omelchenko, V., Gryn, D., Guterch, A., Komminaho, K., Legostaeva, O., Tiira, T., & Tolkunov, A. (2015). Seismic model of the crust and upper mantle in the Scythian Platform: the DOBRE-5 profile across the western Black Sea and the Crimea Peninsula. *Geophysical Journal International*, 201(1), 406—428. <https://doi.org/10.1093/gji/ggv018>.

A thermobaric mechanism for the formation of low velocity zones in the crystalline crust of the northwestern Black Sea shelf: a new type of traps for abiogenic methane

V. A. Korchin, O. M. Rusakov, 2019

Seismic studies of the NW Black Sea shelf have delineated low-velocity zones (LVZs) in the crystalline crust at depths of 6—16 km. For the first time, this paper presents a novel thermodynamic mechanism for their formation. The active temperature regime and deep geodynamic processes of the region provide evidence in favour of this mechanism. The LVZs are mainly associated with the thermal decompaction of rocks, which is not compensated by deep pressures. The rocks of such zones are characterized by an increase in fracturing and porosity and decrease in density, elastic parameters and thermal conductivity. As the rocks are permeable and hygroscopic they are able to more freely transform, absorb and localize mantle hydrocarbon-bearing fluids which, in turn, further destroy rock matter. Within the LVZs the existence of hydrocarbons is confirmed by the occurrence about 3200 active gas seeps and 8 gas and gas condensate fields. For the first time, the spatial coexistence was revealed between LVZs and a degassing tube to which hydrocarbon fields are related.

LVZs zones should be considered as a new search criteria for thermobaric traps. Favourable conditions exist for the accumulation of abiogenic methane at a depth of 6—16 km that can substantially expand the hydrocarbon potential of the shelf in usage modern drilling technology.

Key words: NW Black Sea shelf, upper crystalline crust, low velocity zones, petrophysical thermobaric model, regional abiogenic methane trap.

References

- Bazhenova, O. K., Fadeeva, N. P., Saint-Germes, M. L., & Tikhomirova, E. E. (2003). Sedimentation conditions in the Eastern Paratethis Ocean in the Oligocene—Early Miocene. *Vestnik Moskovskogo universiteta, Ser. Geologiya*, (6), 12—19 (in Russian).
- Baranova, E. P., Yegorova, T. P., & Omelchenko, V. D. (2011). Detection of a waveguide in the basement of the northwestern shelf of the Black Sea according to the results of reinterpretation of the DSS materials of profiles 26 and 25. *Geofizicheskiy zhurnal*, 33(6), 15—29. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v33i6.2011.116790> (in Russian).
- Karakin, A. V., Kuryanov, Yu. A., & Pavlenkova, N. I. (2003). *Fractures, fractured zones and waveguides in the upper layers of the earth envelope*. Moscow: State Scientific Center of the Russian Federation, VNIIGeosystem, 222 p. (in Russian).
- Kozlenko, M. V., & Kozlenko, Yu. V. (2014). The structure and evolution of lithosphere of the central part of the northwestern shelf of the Black Sea. *Geofizicheskiy zhurnal*, 36(4), 65—74. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v36i4.2014.116025> (in Russian).
- Korchin, V. A. (2013). *Thermodynamics of crustal zones of low seismic velocities (new scientific hypothesis)*. Saarbrücken: LAP Lambert Academic Publishing, 280 p. (in Russian).
- Korchin, V. A. (2014). Thermobaric modeling of anomalies of increased porosity in the rocks of the Earth's crust — horizons of possible migration and localization of deep hydrocarbons. *Electronic magazine «Glubinnaya neft»*, 2(9), 1434—1448 (in Russian).
- Korchin, V. A., Burtny, P. A., & Karnaukhova, E. E. (2018). Decompaction of metamorphic rocks under thermodynamic conditions of the Earth's crust (experimental data). *Geofizicheskiy zhurnal*, 40(4), 107—130. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v40i4.2018.140612> (in Russian).
- Korchin, V. A., Burtny, P. A., & Kobolev, V. P. (2013). *Thermobaric petrophysical modeling in geophysics*. Kiev: Naukova Dumka, 312 p. (in Russian).
- Kutas, R. I. (2011). Geothermal sections of the

- Earth's crust and upper mantle of the Black Sea and its northern border. *Geofizicheskiy zhurnal*, 33(6), 50—67. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v33i6.2011.116792> (in Russian).
- Kutas, R. I. (1978). *Thermal flux field and a theoretical model of the Earth's crust*. Kiev: Naukova Dumka, 140 p. (in Russian).
- Lukin, A. Ye., & Shestopalov, V. M. (2018). From new geological paradigm to the problems of regional geological and geophysical survey. *Geofizicheskiy zhurnal*, 40(4), 3—72. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v40i4.2018.140610> (in Russian).
- Pavlenkova, N. I. (1973). *Wave fields and models of the Earth's crust (continental type)*. Kiev: Naukova Dumka, 129 p. (in Russian).
- Rusakov, O. M., & Korchin, V. A. (2015). The origin and localization of abiogenic methane in the crystalline crust of the northwestern part of the Black Sea. *Materials of the All-Russian Conference on the Deep Genesis of Oil «4th Kudryavtsev Readings»*. Moscow: JSC «Central Geophysical Expedition», CD (in Russian).
- Rusakov, O. M., & Kutas, R. I. (2014). Fata morgana of biogenic doctrine of hydrocarbons in the Black Sea. *Geofizicheskiy zhurnal*, 36(2), 3—17. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v36i2.2014.116113> (in Russian).
- Startostenko, V. I., Makarenko, I. B., Rusakov, O. M., Pashkevich, I. K., Kutas, R. I., & Legostaeva, O. V. (2010). Geophysical heterogeneity of the lithosphere of the megabasin of the Black Sea. *Geofizicheskiy zhurnal*, 32(5), 3—20. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v32i5.2010.117496> (in Russian).
- Starostenko, V. I., Lukin, A. E., Rusakov, O. M., Pashkevich, I. K., & Lebed, T. V. (2015). Hydrocarbon through a fluid-carrying channel on the northwestern Black Sea shelf from three dimensional magnetic modelling. *Geologiya i poleznyye iskopyayemye Mirovogo okeana*, (2), 147—158 (in Russian).
- Timurziev, A. I. (2007). To the creation of a new paradigm of oil and gas geology based on a deep-filtration model of oil and gas formation and oil and gas accumulation. *Geofizika*, (4), 49—60 (in Russian).
- Chebanenko, I. I., Krayushkin, V. A., & Klochko, V. P. (2002). *Oil and Gas Perspective Objects of Ukraine. Oil and gas basement*. Kiev: Naukova Dumka, 296 p. (in Russian).
- Etioppe, G., & Sherwood Lollar, B. (2013). Abiotic methane on Earth. *Reviews of Geophysics*, 51, 276—299. doi: 10.1002/rog.20011.
- Ivanov, M. K., & Lein, A. Yu. (2006). Fractionation of stable isotopes of carbon and sulfur during biological processes in the Black Sea. In: L. N. Neretin (Ed.), *Past and present water column anoxia* (pp. 373—417). Dordrecht: Springer. https://doi.org/10.1007/1-4020-4297-3_15.
- Korchin, V. Anomalies of low density in the crystalline crust of thermobaric origin: a new insight into migration and localization of hydrocarbons. Monograph 72: Oil and Gas Exploration: Methods and Application. American Geophysical Union, Wiley, 2017, pp. 237—257.
- Kucherov, V. G., & Krayushkin, V. A. (2010). Deep-seated abiogenic origin of petroleum: From geological assessment to physical theory. *Reviews of Geophysics*, 48(1), RG1001. doi:10.1029/2008RG000270.
- Reeburgh, W. S., Ward, B. B., Whalen, S. C., Sandbeck, K. A., Kilpatrick, K. A., & Kerkhof, L. J. (1991). Black-sea methane geochemistry. *Deep-Sea Research Part A. Oceanographic Research Papers*, 38, S1189—S1210. [https://doi.org/10.1016/S0198-0149\(10\)80030-5](https://doi.org/10.1016/S0198-0149(10)80030-5).
- Rusakov, O. M., & Kutas, R. I. (2018). Mantle origin of methane in the Black Sea. *Geofizicheskiy zhurnal*, 40(5), 191—207. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v40i5.2018.147482>.
- Simmons, M. D., Tari, G. C., & Okay, A. I. (Eds.). (2018). *Petroleum Geology of the Black Sea. Introduction*. Geological Society, London, Special Publication, 464, 1—18. <https://doi.org/10.1144/SP464.15>.
- Starostenko, V. Janik, T., Yegorova, T., Farfuliak, L., Czuba, W., Środa, P., Thybo, H., Artemieva, I., Sosson, M., Volfman, Y., Kolomiyets, K., Lysynchuk, D., Omelchenko, V., Gryn, D., Guterch, A., Komminaho, K., Legostaeva, O., Tiira, T., & Tolkunov, A. (2015). Seismic model of the crust and upper mantle in the Scythian Platform: the DOBRE-5 profile across the western Black Sea and the Crimea Peninsula. *Geophysical Journal International*, 201(1), 406—428. <https://doi.org/10.1093/gji/ggv018>.