

От новой геологической парадигмы к задачам региональных геолого-геофизических исследований

А. Е. Лукин^{1,2}, В. М. Шестопапов^{1,3}, 2018

¹Институт геологических наук НАН Украины, Киев, Украина

²Украинский государственный геологоразведочный институт, Киев, Украина

³Научно-инженерный центр радиогидрогеоэкологических полигонных исследований

НАН Украины, Киев, Украина

Поступила 21 мая 2018 г.

Аналіз новітніх наукових досягнень у різних напрямках геолого-геофізичних досліджень показав, що вивчення процесів глибинної дегазації Землі від земного ядра до її поверхні і атмосфери набуває статусу магістрального напрямку наук про Землю. Виявлення енергетично найактивніших і найпотужніших субвертикальних висхідних кризьгеосферних і кризьформаційних процесів, які локалізуються у вигляді ієрархії труб дегазації різних розмірів, від базового плюму до елементарного приповерхневого каналу, має важливе фундаментальне і прикладне значення. Існування цієї системи забезпечується послідовними екзотермічними перетвореннями елементарних відновлюваних газів до окисних речовин, які внаслідок таких хімічних реакцій послідовно отримують нові порції енергії, достатньої для поступового висхідного прориву глибинної речовини мантії і кори. Тракткування мантійних плюмів як базових мегатруб дегазації дає змогу поєднати основні аспекти ендегенного рудоутворення, нафтидогенезу в літосфері та екологічних процесів у земній корі і атмосфері. Структурно-геологічною основою труб дегазації є кризьформаційні системи. Вони — основні концентратори висхідної міграції і накопичення нафтидів у багатоповерхових родовищах. Усе чіткіше прослідковується зв'язок діапїризму з похідними мегаплюмів — трубами дегазації. Енергетика дегазації — головний чинник діапїризму. На підставі аналізу геофізичних та інших ознак сучасної активізації вказаного процесу визначено місця можливої аномальної дегазації на території України. Припускають можливість отримання у деяких з них природного водню як природної корисної копалини. Розглянуто екологічні ризики глибинної дегазації Землі, зокрема катастрофічної через дію супервулканів, і можливі напрями протидії цим ризикам за умови цілеспрямованих зусиль передової частини людства. Назріла необхідність перегляду стратегії і методології подальшого розвитку геолого-геофізичних досліджень у цілому і таких важливих прикладних напрямів, як, зокрема, комплексна геологічна зйомка, картування, пошуки деяких корисних копалин, геоєкологія.

Ключові слова: плюм, глибинна дегазація Землі, труба дегазації, кризьформаційна система, зони активізації, екологічні наслідки глибинної дегазації.

Введение. На протяжении последних 50 лет в науках о Земле происходит смена парадигм, что выражается в появлении таких направлений, как нелинейная геофизика [Кузнецов, 1981], нелинейная металлоге-

ния [Щеглов, 1983], нелинейная геодинамика [Пушаровский, 1993], нелинейная нефтегазовая геология [Лукин, 2004]. Термин «нелинейный» в данном случае не столь строгий, как в математике — означает «на-

рушение прямых, линейных зависимостей между определенными геологическими явлениями (величинами)» [Щеглов, 1987]. К этому можно добавить и другие аспекты «нелинейной» металлогении — от наличия периодически повторяющихся в тектоносфере крупных латеральных неоднородностей типа магматогенных узлов до локальной дискретности типа «колчеданного шага», разнообразных нелинейных зависимостей локализации рудных тел относительно рудоконтролирующих разломов, приуроченности их к различным гипсометрическим уровням и т.п. (аналогичными закономерностями характеризуются солонность, угленосность, бокситоносность и т. д., а также нефтидогенез — нефтегазонакопление). К типичным проявлениям «нелинейности» в указанном относятся: глубинная гидрогеологическая инверсия (появление в глубоких нефтегазоносных бассейнах под литокатагенными рассолами хлоркальциевого типа термальных маломинерализованных гидрокарбонатных натриевых вод с повышенными концентрациями бора, ртути и других глубинно-геохимических индикаторов), разнообразные геохимические и геофизические аномалии, явление «просвечивания» сквозь осадочный чехол глубинных коровых и мантийных структур [Лукин, 1997]. Общеизвестно, что никакой линейный процесс, характеризующийся непрерывностью, постепенностью, количественным соответствием параметров на входе и выходе, не может привести к возникновению того или иного сложного геологического объекта (залежь, месторождение, геотекстура, бассейн и т. д.), характеризующегося признаками эмерджентности, иерархичности и структурности [Лукин, 1997]. В частности, первичная миграция (микро) нефти («капля за каплей») и/или газа («пузырек за пузырьком») не могут сформировать месторождение, зону нефтегазонакопления, нефтегазоносный бассейн.

Нелинейность геологических процессов (или ими обусловленных объектов) неразрывно связана с необратимостью, неравновесностью, а также некорректно-

стью соответствующих задач, решаемых в рамках геолого-геофизических наук [Блюман, 2001; Страхов, 2003; Лукин, 2004].

Работы И. Р. Пригожина, Р. Дефея, Т. Николиса, Г. Хаазе, Г. Хакена и других авторов по неравновесной термодинамике, диссипативным структурам и самоорганизации имели основополагающее значение для создания синергетики — возникшего около 50 лет назад направления научных исследований, суть которого состоит в изучении общих закономерностей самоорганизации динамически неравновесных систем [Хакен, 1985]. Большинство объектов исследований в геологических науках возникают и эволюционируют именно в результате геосинергетических процессов в открытых системах, далеких от равновесия, что сопровождается скачкообразными изменениями состояния (характеристик, параметров), разнообразными флуктуациями, кооперативными взаимодействиями, (квази) резонансными явлениями и другими проявлениями геосинергетики [Летников, 1992], которые и определяют нелинейный характер геологических процессов. Наиболее ярко это проявляется при взаимодействии восходящих потоков глубинных высокоэнтальпийных высоконапорных флюидов с различными флюидопородными системами земной коры. При этом интенсивность эффектов их кооперативного взаимодействия возрастает по мере увеличения геотермодинамической контрастности, достигая максимума в «гранитном слое» (с его верхней кромкой — кристаллическим фундаментом) [Леонов и др., 2000] и особенно в стратиферо.

Имплантиция указанных идей в тектонику и геодинамику, геофизику, геохимию, петрологию, металлогению и нефтегазовую геологию, гидрогеологию, инженерную геологию обуславливает кардинальные изменения в идеологии и методологии геонаучных исследований.

Смена парадигм уже коснулась прежде всего такого базового понятия наук о Земле, как тектоносфера. Ее соотношение с основными геосферами, как известно, трактуется по-разному. В работе [Толко-

вый..., 1979] тектоносфера фактически отождествляется с земной корой в объеме сиалического и симатического слоев, а в большинстве справочных руководств и работ по тектонике этот термин трактуется более широко — как геосфера, включающая в себя земную кору и верхнюю мантию [Геологический..., 1978; Словарь..., 1988 и др.] или, более конкретно, литосферу и астеносферу. Однако если понимать тектоносферу как геосферу, в пределах которой происходят тектонические движения, порождающие тектонические структуры (разломы, складки, разнообразные реологические скучивания и другие дислокационные и деформационные образования), то в свете современных сейсмотомографических данных объем тектоносферы следует резко расширить, включив туда практически всю мантию [Пущаровский, 1998, 2006]. Более того, в нее следует включить и «нижнюю астеносферу» [Хаин, 2003] в объеме слоя D' и внешнего (жидкого) ядра. Новейшие данные свидетельствуют о том, что внутреннее твердое ядро Земли, по общему выражению М. Л. Левина, «дирижирует сейсмической активностью», а говоря шире — импульсными тектоногеодинамическими и флюидодинамическими процессами. Последние контролируют вулканизм, рудообразование, нефтидогенез и нефтегазонакопление, разнообразные инверсионные явления (тектоническая адвекция, разные формы диапиризма, глубинная гидрогеологическая инверсия, различные геохимические и геофизические аномалии, глубинные литосферные и мантийные «метки» всех крупнейших месторождений — нефтяных, газовых и рудных гигантов) [Лукин, 2004]. Все указанное многообразие процессов и их конечных результатов — суть различные проявления глубинной дегазации Земли (ГДЗ), которые формировали атмо-, гидро- и литосферу и продолжают их трансформировать. Именно ГДЗ контролирует в конечном счете все указанные проявления тектоногеодинамической и флюидодинамической активности.

В свете этих представлений изучение процессов ГДЗ приобретает статус маги-

стрального направления наук о Земле. Особо следует подчеркнуть его значение для решения проблем нефтегазовой геологии, металлогении, гидрогеологии, инженерной геологии и геоэкологии. Назрела необходимость пересмотра идеологии и методологии наук о Земле и таких важнейших их прикладных направлений, как геологическая и геохимическая съемка, прямые поиски месторождений полезных ископаемых, мониторинг состояния окружающей среды. Эффекты, обусловленные процессами ГДЗ, необходимо учитывать при решении различных задач гидрогеологии, проектирования АЭС, газопроводов и других объектов, сооружение которых связано с инженерно-геологическими и геоэкологическими рисками.

Понятие о дегазации Земли (ДЗ) как глобальном процессе ее саморазвития было сформулировано В. И. Вернадским в 1911, 1912 гг., а затем в «Очерках геохимии» (1924), хотя представления о геологической роли глубинных флюидов высказывались Дж. Геттоном, А. Гумбольтом, Д. Дана, Э. Зюссом, Р. Дэли, В. А. Обручевым, М. А. Усовым и др. На современную геонию (систему наук о Земле) эта концепция оказала и продолжает оказывать мощное влияние. Достаточно отметить работы А. П. Виноградова по закономерностям формирования гидро- и атмосферы (всестороннее обоснование роли водно-углекислого флюида как конечного продукта дегазации), Д. С. Коржинского — по «сквозьмагматическим растворам», В. А. Соколова — по геохимии природных газов, А. В. Сидоренко — по «дыханию» осадочно-метаморфических толщ, В. И. Смирнова, А. Д. Щеглова и др. — по участию мантийных флюидов в эндогенном рудообразовании, О. А. Богатикова, Н. Л. Добрецова, Ф. А. Летникова, А. А. Маракушева, И. Д. Рябчикова, Л. Н. Когарко, О. В. Усенко и др. — по флюидному режиму магматизма и метаморфизма; В. К. Мархина, Г. С. Штейнберга, В. И. Кононова, С. В. Белова, А. М. Портнова и др. — по роли процессов дегазации в вулканизме (особо следует отметить работы Е. Ф. Шнюкова по

грязевому вулканизму — яркому и специфическому проявлению процессов ДЗ); А. Б. Ронова, Н. М. Страхова, А. А. Махнач, С. Г. Неручева, Я. Э. Юдовича и др. — по общим закономерностям накопления карбонатных и черносланцевых формаций; И. К. Карпова, В. С. Зубкова, В. А. Бычинского и др. — по моделированию процессов подъема углеводородов (УВ) из мантии в земную кору, условий их метастабильности и глубинной детонации.

Представления о ключевой роли водорода в ДЗ развиты в работах В. Н. Ларина, Ф. А. Летникова, А. А. Маракушева, В. В. Хмелевской, А. В. Щербакова, Н. Д. Козловой, Ю. А. Колясникова, А. И. Тимурзиева и др.

Необходимо подчеркнуть тесную связь данной проблемы с современными представлениями геотектоники и геодинамики (В. Е. Хаин, Ю. М. Пущаровский, А. В. Чекунов, А. Е. Айзберг, Р. Г. Гарецкий и др.), геофизики и физики Земли (В. И. Старостенко, А. Д. Адушкин, И. Л. Гуфельд, Б. В. Левин, Н. И. Павленкова и др.).

Благодаря усилиям Г. И. Войтова, Д. Т. Осики, В. Н. Ларина, Г. В. Первозчикова, В. Л. Сывороткина, Н. В. Ларина, В. А. Згонника и других развивается изучение современных приповерхностно-атмосферных проявлений глубинной водородной дегазации в различных частях земного шара.

В это же время сформировалась украинская школа, развивающая различные аспекты флюидодинамики, дегазации и глубинных основ формирования абиогенных нефтидов. Широко известны новаторские исследования Э. Б. Чекалюка, работы В. Б. Порфирьева, Н. П. Семененко, Г. Н. Доленко, В. А. Краюшкина, Г. Е. Бойко и др.

ДЗ и ее эффекты рассматриваются в англоязычных публикациях. Отметим в связи с этим работы таких исследователей, как J. T. Wilson, W. J. Morgan, A. Ritman, J. A. Welhan, S. Soter, W. S. Fyfe, A. Gilat, A. Vol, R. W. Griffiths, I. Poirler, W. Evans, T. Yagi, S. Maruyama, S. Mataka и многих других.

Особо следует отметить роль в развитии этого направления П. Н. Кропоткина и Б. М. Валяева, по инициативе которых исследования по проблеме ДЗ оформились в виде самостоятельного направления наук о Земле и стали предметом специального обсуждения на конференциях «Дегазация Земли и геотектоника», регулярно проводившихся в Москве в период с 1976 по 1991 г. и с 2001 по 2013 г. Еще на первой из них четко проявилась тенденция разделения этих исследований на два направления — рудно-магматическое и нефтегазовое, за которыми с легкой руки П. Н. Кропоткина прочно закрепились наименования «горячая» и «холодная» ДЗ. Однако если первая из них издавна служила предметом изучения таких традиционных разделов наук о Земле, как магматизм, вулканизм, метаморфизм, учение об эндогенных рудных месторождениях, то вторая пока еще не вполне оформилась в виде специального направления. Тем не менее, все больше данных как о ведущей роли процессов водородно-углеводородной ДЗ в формировании нефтидов и разнообразных руд, так и об огромном и разностороннем их влиянии на биосферу.

Здесь уместно отметить, что температура не может рассматриваться как критерий указанной типизации процессов ГДЗ, поскольку такие яркие их проявления, как инъекции темноцветного пелитоморфного полиминерального вещества (ТППВ) по трещинам флюидоразрыва [Лукин, 2000], микро- и нановключения природных высокотемпературных сплавов, карбидов и силицидов [Новгородова, 1983; Лукин, 2006, 2009], сопутствуют именно процессам «холодной» дегазации. Основным критерий указанного разделения ГДЗ на две основные ветви — окислительно-восстановительный режим. Именно восстановленные (на водородно-углеводородной основе) высокоэнталпийные флюиды являются дериватами наиболее глубоких геосфер (внешнее ядро — слой D'' — нижняя мантия) первоначально в виде сверхсжатого поликомпонентного газа, с термодинамической эволюцией и

физико-геохимической трансформацией которого связана последующая дифференциация его на силикатные и рудные расплавы, кислые и щелочные гидротермы, легкие газы [Летников, 2001; Лукин, 2006, 2009]. Таким образом, «горячая» ГДЗ является производной «холодной» дегазации, температурный диапазон которой гораздо шире. Следовательно, корректнее разделять ГДЗ не на «горячую» и «холодную», а на первичную восстановленную (при ведущей физико-геохимической роли водорода и углеводородов) и вторичную окисленную (водно-углекислую) [Лукин и др., 1994]. Именно в таком значении мы и используем эти популярные термины. При этом следует подчеркнуть, что общие закономерности «холодной» дегазации — характер кооперативного взаимодействия водородного, гелиевого, углеводородного, углекислого, азотного, ртутного и других типов «дыхания» Земли, особенности их влияния на седиментацию и литогенез, вклад в нефтегазо- и рудонакопление, влияние на биоту — остаются слабо изученными. Отсутствуют однозначные надежные критерии выявления и картирования ее ареалов («труб дегазации» (ТД) — по терминологии П. Н. Кропоткина). Совершенно недостаточно изучена ее геоэкологическая роль.

ГДЗ — главный энергетический движитель эндогенных геологических процессов Земли. Существующие и общепринятые гипотезы, определяющие источники энергии для функционирования внутреннего теплового потока Земли, тектонических процессов, землетрясений, вулканизма, традиционно признают распад радиоактивных элементов (U, Th и др.) и энергию гравитационных процессов дифференциации вещества по плотности. Однако известно, что эти источники рассеяны, не концентрированы. Они, согласно имеющимся оценкам [Francis, 1993], могут обеспечить лишь около половины наблюдаемого теплового потока Земли. При этом максимальные удельные концентрации радиоактивных элементов сосредоточены в земной коре континентов, а не в энергично

чески более насыщенных мантии и ядре.

Выделяется также источник внешней энергии, связанный с процессами взаимодействия в системе «Земля — Луна — Солнце — дальний Космос», который в значительной мере оказывает влияние на ритмику энергетических процессов.

Анализ специфики наиболее энергетически мощных геологических процессов показывает, что основной значимый для этих целей источник внутренней энергии Земли должен:

- относительно быстро фокусироваться (при извержениях вулканов, мощных землетрясениях, кимберлитовых взрывах и др.);

- обеспечивать очень высокие скорости высвобождения;

- иметь высочайшую концентрацию переноса энергии и вещества и относительно небольшие потери при транспортировке на большие расстояния;

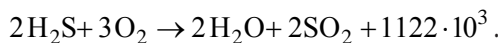
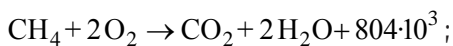
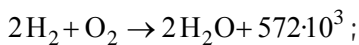
- периодически может высвобождаться в течение геологической истории, подчиняясь своим закономерным вариациям активности [Gilat, Vol, 2012].

Исследования последних десятилетий свидетельствуют о том, что этим условиям в полной мере отвечает лишь глубинная дегазация водорода и гелия при участии других восстановленных газов. При этом теоретические соображения и эксперименты указывают на то, что накопление основных для космоса газов происходило в процессе формирования планеты Земли (В. Н. Ларин, А. А. Маракушев, Ф. А. Летников, В. В. Адушкин, И. Л. Гуфельд, А. Gilat, A. Vol, Н. Л. Добрецов, А. Г. Кирдяшкин, Е. В. Артющков, Н. Д. Рябчиков, В. Н. Румянцев и др.).

В частности, моделирование поведения водорода в земных недрах свидетельствует о его переходе в металл в виде гидрида и концентрации в ядре [Ларин, 1973, 2005; Ohtani et al., 2009].

Захват и аккумуляция указанных газов в ядре и, по-видимому, в мантии Земли имели эндотермический характер, обуславливая накопление огромной потенциальной энергии в этих частях планеты, отличаю-

щихся от ее внешних сфер сверхвысокими параметрами давления и температуры (на границе ядра и мантии $P > 1300$ кбар, $t > 4000$ °С [Летников, 2001]). Кроме ядерной (отдельных элементов), атомарной и молекулярной форм нахождения этих газов они при таких P , t параметрах могут образовывать и экзотические для верхних геосфер соединения, которые при переходе в более низкие P , t условия экзотермически распадаются. Так, по данным [Rhee et al., 1989; Nuccio, Paonita, 2000] при $P > 14$ ГПа и $t > 1000$ К образуются стабильные соединения He–H, He–Si, He — металлы, He–Cl. Разложение соединения He–H обеспечивает выделение более 2 ккал/(г·моль) тепловой энергии [Kleinekathoefen et al., 1996; Vos et al., 1996], а согласно [Saunders et al., 1994], образование связи ^3He с веществом составляет 230,5 ккал/(г·моль), что существенно превышает теплоту образования воды из водорода и кислорода (68,3 ккал)/(г·моль). Переход смесей восстановленных газов к более низким P , t параметрам обеспечивает их взрывные реакции с выделением значительной энергии (Дж/моль):



При этом образование воды — мощнейшего катализатора — усиливает взрывные реакции в тысячу раз [Gilat, Vol, 2012]).

Количественная оценка гигантского потока энергии, формирующегося в процессе ДГЗ, — задача будущего. Но даже определение части этой энергии, переносимой потоками ^3He из нижней мантии (2200 моль/год по данным [Allegre et al., 1987]), составляет $5,12 \cdot 10^{20}$ Дж/год, что ориентировочно в пять раз больше, чем потеря энергии, связанная со всеми землетрясениями и вулканической активностью [Gilat, Vol, 2012].

Для интервала глубин 170—20 км (верхняя мантия — кора) установлена [Летников, 2000] иерархия способности переноса тепловой энергии для ряда компонентов геотермодинамики: низкоэнергетические — SiCl_4 ,

SiF_2 , O_2 , Ar, F_2 , CO_2 , HF, SO_3 (5—10 кДж/г), среднеэнергетические — SO_2 , N_2 , H_2S , Cl_2 , H_2O , CO (5—10 кДж/г), высокоэнергетические — NH_3 , HCl, CH_4 (10—15 кДж/г), сверхвысокоэнергетические — H_2 (35—45 кДж/г). Таким образом, для указанного диапазона глубин водород является наиболее концентрированным энергоносителем, роль которого еще более возрастает в связи с экзотермическим характером его активного взаимодействия с минералами вмещающих пород.

В работе [Simkin et al., 1994]), изданной Геологической службой США совместно со Смитсоновским институтом, подчеркивается, что прочность пород литосферы недостаточна для создания механических напряжений, обеспечивающих возникновение землетрясений с магнитудой 9 баллов и выше. Тем не менее, такие гигантские землетрясения — не редкость: 1952 г. — Камчатка, $M = 9,0$; 1964 г. — Аляска, $M = 9,2$; 2004 г. — вблизи о-ва Суматра, $M = 9,1$; 2011 г. — у берегов Японии, $M = 9,0$ [http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/world/10largest_world.php].

С целью оценки предельно максимальной энергии разрядки напряжения, которая может накопиться и реализоваться в виде мощного землетрясения, был сделан расчет максимальной энергии (МЭ) для блока высококачественной стали размером $600 \times 100 \times 20$ км (возможный размер блока литосферы, в котором произошло землетрясение на Аляске в 1964 г. с магнитудой 9,2) [Gilat, Vol, 2012]. Был получен результат $MЭ = 2,9 \cdot 10^{17}$ Дж, который в 15 раз меньше, чем действительный выход энергии при этом землетрясении. Если учесть, что реальные предельно возможные напряжения в литосфере существенно уступают соответствующим параметрам стали, то это несоответствие между максимальной возможной энергией, возникающей за счет разрядки напряжений в литосфере, и энергией реальных крупнейших землетрясений еще более возрастает.

Реальность энергетической взрывной разрядки флюидов подтверждается многочисленными публикациями, посвящен-

ными т.н. «сейсмическим гвоздям» [Вадковский, 1996, 2012], «сейсмофокальным зонам гнездового типа» [Zarifi, Havskov, 2003] и субвертикальным столбообразным скоплениям» [Шевченко и др., 2011]), «роям землетрясений» [Lindenfeld et al.,

2012] и др. Проявления сейсмических гвоздей наблюдались в западной краевой зоне Тихого океана (Японские острова, Камчатка, Аляска и др.), в районах срединно-океанических хребтов (Исландия), в континентальных рифтовых зонах (сегменты

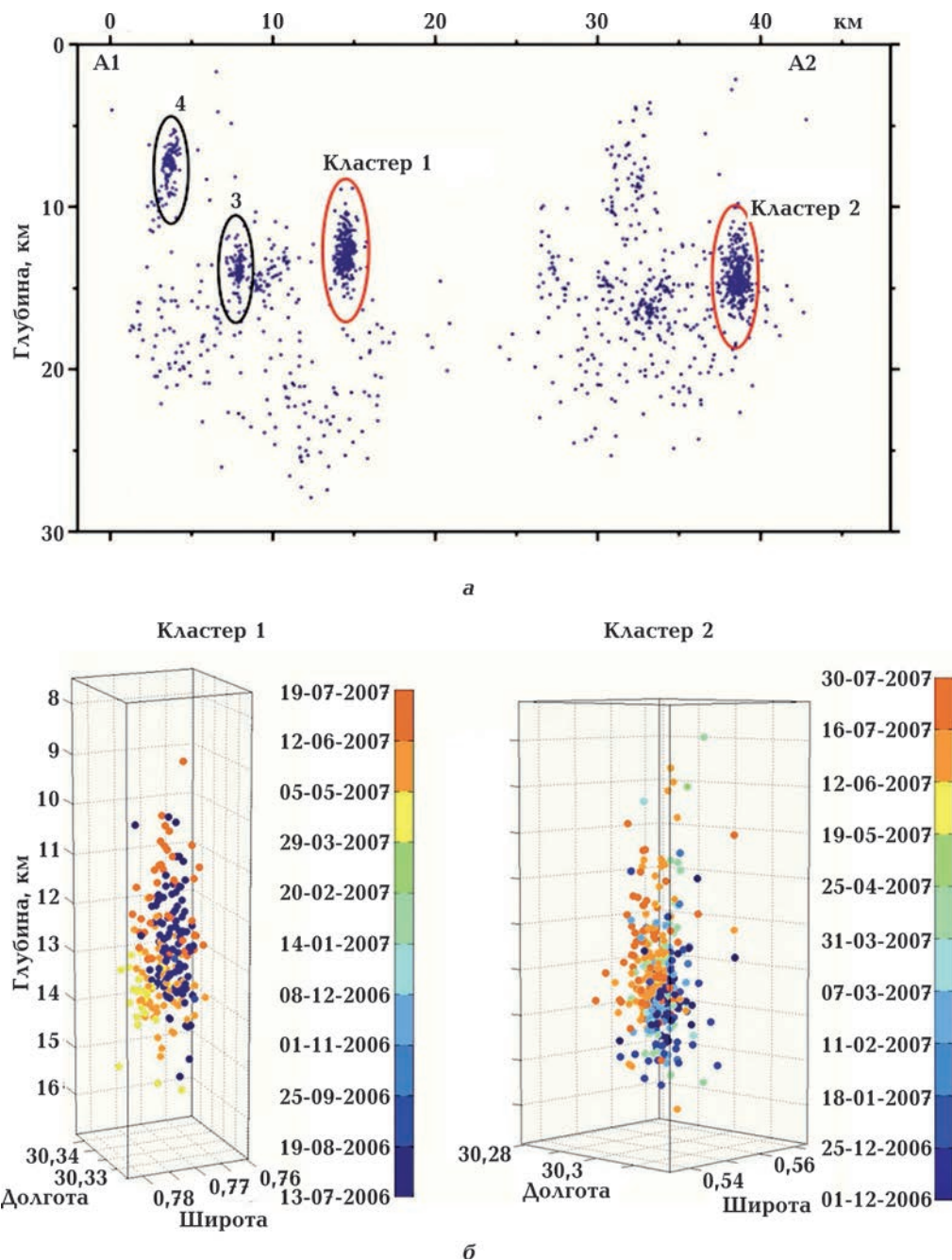


Рис. 1. Распределение гипоцентров землетрясений по одному из профилей, горы Ревензори (а) и отдельно показанное развитие во времени структур (б), отображенных на предыдущем рисунке «а» как кластер 1 и 2 [Lindenfeld et al., 2012]. Градациями цвета показано время сейсмического события. Шкалы внизу — широта и долгота. Масштаб соблюден. Видим миграцию, которую можно истолковать как продвижение мантийного флюида.

Восточно-Африканского рифта), в зонах континентальной коллизии (Памир, зона Вранча) и др. Их основной особенностью являются рои восходящих малоамплитудных землетрясений (обычно около 2—3 баллов). Их протяженность по вертикали может достигать 100 км при поперечном размере до 10 км. При этом количество восходящих очагов составляет в среднем от 100 до 1000. Время их продвижения варьирует от нескольких дней до нескольких месяцев. По данным [Гуфельд, Собисевич, 2006; Гуфельд, 2012] эти образования представляют собой локализованную зону (трубу) интенсивной водородной дегаза-

ции, стимулирующей образование очагов сильных землетрясений. Импульсное накопление восходящего газа обеспечивает периодическое превышение критического давления, приводящего к разрыву выше расположенной покрышки пород, сбросу со взрывом давления газа и соответствующему землетрясению. Как видно из рис. 1, это не «столбовая дорога» для газа снизу вверх, а система ответвлений, ловушек со взрывом газа, отступлений в связи с «схлопываниями» проторенных участков пути под влиянием горного давления и новых попыток прорыва газовых скоплений по вертикально вытянутой зоне. Системы

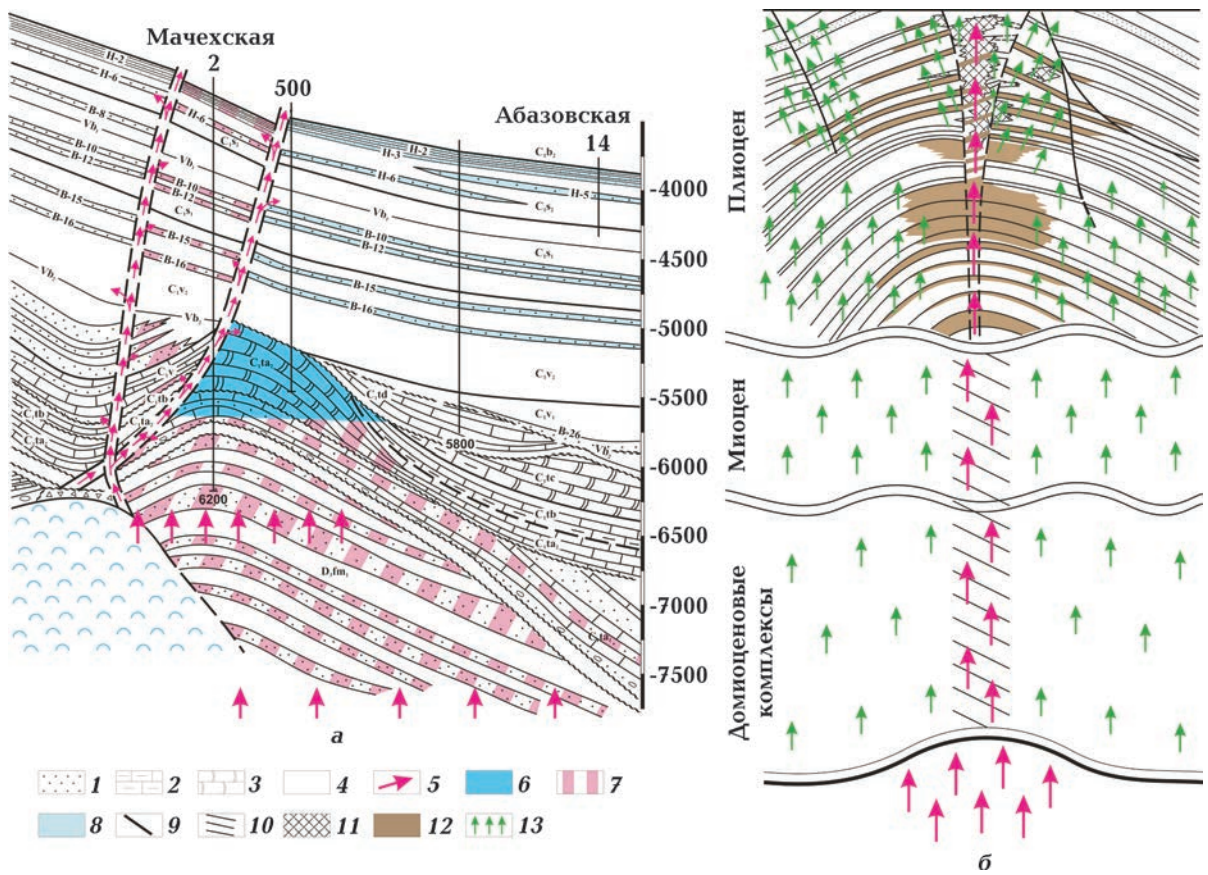


Рис. 6. Два типа инверсионно-гидрогеологических аномалий (ГГА) с разными соотношениями глубинных и мобилизованных из осадочных комплексов вод: *а* — ГГА в катагенетически уплотненных (пористость аргиллитов менее 3 %) палеозойских отложениях (ДДВ, Мачехское и Абазовское газоконденсатные месторождения (по А. Е. Лукину)); *б* — ГГА в мощных слабоуплотненных позднекайнозойских глиняных толщах (Южно-Каспийская впадина, Апшеронский п-ов, Биби-Эйбатское нефтяное месторождение (структурная геология и нефтеносность плиоцена — по С. Ф. Федорову, остальное — по А. Е. Лукину)); 1 — песчаники; 2 — глинистые известняки; 3 — рифогенные карбонаты; 4 — глинистые породы (аргиллиты); 5 — глубинные инверсионные воды; 6 — массивная газовая залежь Мачехского месторождения; 7 — предполагаемые залежи критического состояния (в состоянии современного формирования); 8 — газоконденсатные залежи; 9 — разрывные нарушения; 10 — зоны повышенной проницаемости; 11 — сопочная брекчия; 12 — нефть; 13 — инверсионные воды, мобилизованные из осадочных отложений.

таких гидроразрывов и промежуточных очагов могут подготавливать транспорт колоссальных объемов глубинных флюидов в главный очаг основного мощного землетрясения [Копничев, 1997; Шевченко и др., 2011], обеспечивающий аномальную энергетическую разрядку недр с самой высокой бальностью.

Таким образом, устанавливаются (при термобарическом градиентном воздействии) экзотермические преобразования ряда веществ в последовательности «ядра элементов — атомы — молекулы — специфические (устойчивые лишь при высоких P , t параметрах) соединения — переход от восстановленных соединений к окисленным».

Эти преобразования определяют существование динамичной эстафеты последовательного введения значительных порций энергии в систему изменяющегося по составу восходящего флюида, обеспечивая его прорывную (в том числе взрывную) аномальную мощность в пределах отдельных критических участков на пути от ядра до земной коры включительно. Именно эта энергия характеризуется относительно быстрой фокусировкой, высокой концентрацией и значительной скоростью высвобождения, обеспечивая наиболее значимые процессы эволюционной скачкообразной самоорганизации различных систем планеты.

Закономерности канализирования процессов ГДЗ. Многообразные (близ)поверхностные структурно-геоморфологические образования и обуславливающие их процессы (западины и подзападинные структуры, разломы и рифты, трубки взрыва и вулканические кратеры, черные и белые курильщички, вулканизм и эксплозии, гидротермальные эксгаляции, газовые струи, эманационно-геохимические аномалии [Шестопапов, Макаренко, 2013]) могут рассматриваться как верхний «капиллярный» уровень сложнопостроенной дренажной системы, по которой осуществляется транслитосферный тепломассоперенос. При всей сложности этой иерархически построенной многоуровневой системы

каждый ее уровень (порядок) характеризуется сочетанием разнообразных геоструктурных флюидопроводящих элементов различного масштаба и строения, которые могут рассматриваться как сопряжение каналов и впадин (наличие последних обусловлено проседанием элементов земной коры вследствие различных по своей природе длительности и интенсивности дегазационных процессов) [Лукин, 1997]. Такая сопряженная пара — (суб)вертикальный канал — впадина — лежит в основе всех крупных систем ГДЗ. На базовом уровне она представлена мантийным плюмом и расположенным над ним глубоким осадочным бассейном (точнее — бассейном породообразования с учетом наличия в ряде бассейнов вулканогенных и эффузивно-осадочных формаций), который по мере его тектоногеодинамической и флюидодинамической эволюции превращается в гидрогеологический, нефтегазоносный и (или) рудоносный бассейны [Лукин, 2015].

Плюм — базовая (мега)труба дегазации. Плюмтектоническая концепция, одна из ключевых для наук о Земле, зародилась в 1963 г., когда Дж. Вильсон [Wilson, 1963] предложил для объяснения открытого первоначально на Гавайях феномена горячих точек или пятен (hot spots) гипотезу мантийных струй (mantle plumes), а после работ В. Моргана [Morgan, 1971, 1972] идея плюмов стала популярной. Суть ее заключается в том, что «поднимающиеся из глубин мантии разогретые струи — плюмы — с фиксированными в ней корнями прожигают движущиеся литосферные плиты, оставляя на их поверхности след в виде горячих точек, выраженных вулканами или плутонами» [Планета..., 2004, с. 37]. Широкое признание этой гипотезы связано с тем, что лишь она дала рациональное объяснение внутриплитному магматизму в пределах как континентов, так и океанов.

Первоначально плюмтектоническая концепция носила преимущественно петрологический характер. Фундаментальное значение имели данные, свидетельствующие о петрохимической идентичности континентального и океанического плюмового

магматизма при существенных отличиях его от базальтов срединно-океанических хребтов. Геохимические данные (включая геохимию РЗЭ, изотопию гелия и др.) подтвердили связь плюмового магматизма с недеплетированной мантией. Таким образом, корни плюмов должны располагаться гораздо глубже по сравнению со спрединговым вулканизмом, который обусловлен поступлением магмы с глубин менее 200 км. Независимым подтверждением реальности существования мантийных плюмов стали данные сейсмотомографии [Пуцаровский, 1998; Геуко, 2004]. Они свидетельствуют о различных масштабах плюмов как по размерам грибообразной головной части, так и по диапазону глубин локализации их корней (рис. 2, 3). Наряду с небольшими плюмами, поднимающимися

непосредственно из астеносферы по каналам, обусловленным зонами повышенной проницаемости в литосфере, установлено существование и суперплюмов, площадь внедрения которых в литосферу составляет тысячи км², а корни локализуются вблизи границы ядра и мантии (слой D'' — внешнее жидкое ядро) [Летников, 1992; Добрецов и др., 2003; Планета..., 2004; Комаров, Томсон, 2007]. Суперплюмы инициируют магматизм на обширных территориях (трапповый магматизм, системы кольцевых тектономагматических структур и др.) и в то же время определяют границы обширных областей седиментации с разнообразными литогеохимическими индикаторами участия различных эндогенных факторов в осадконакоплении и литогенезе [Лукин, 1997]. Ныне утверж-

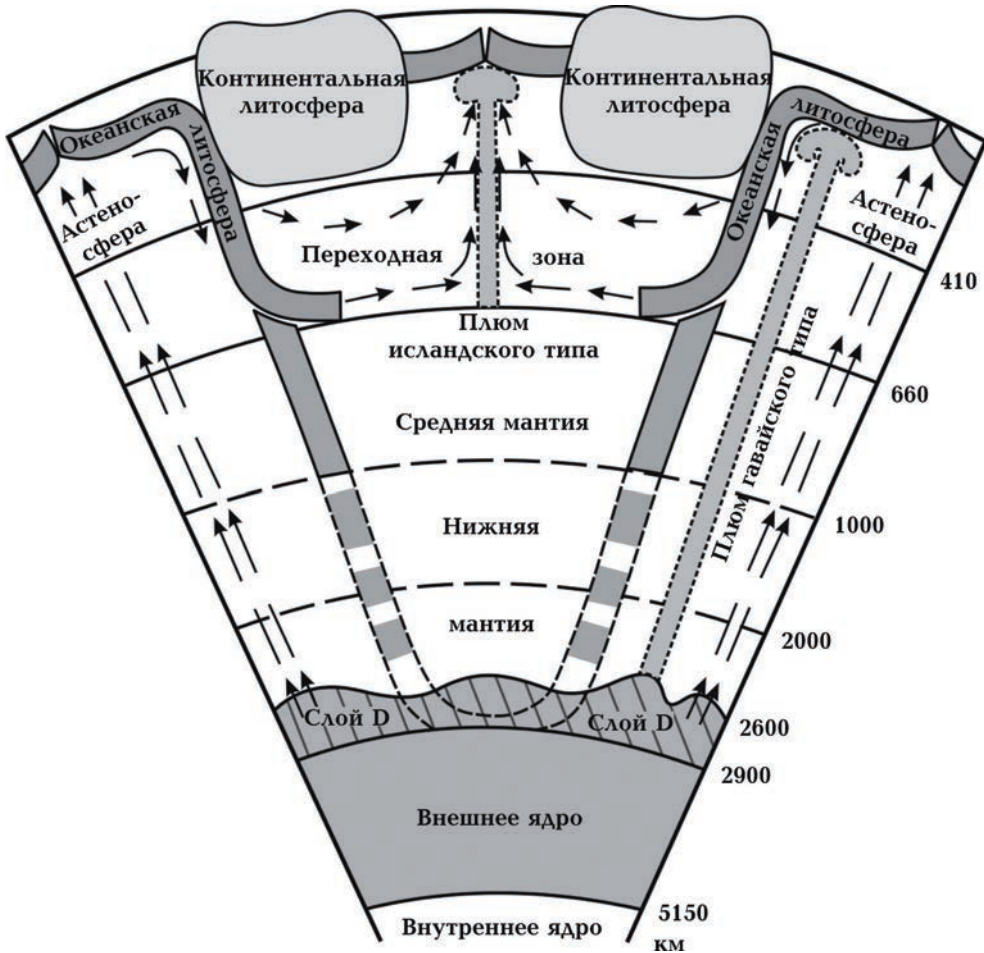


Рис. 2. Земля: схема внутреннего строения и геодинамики (по В. Е. Хаину).

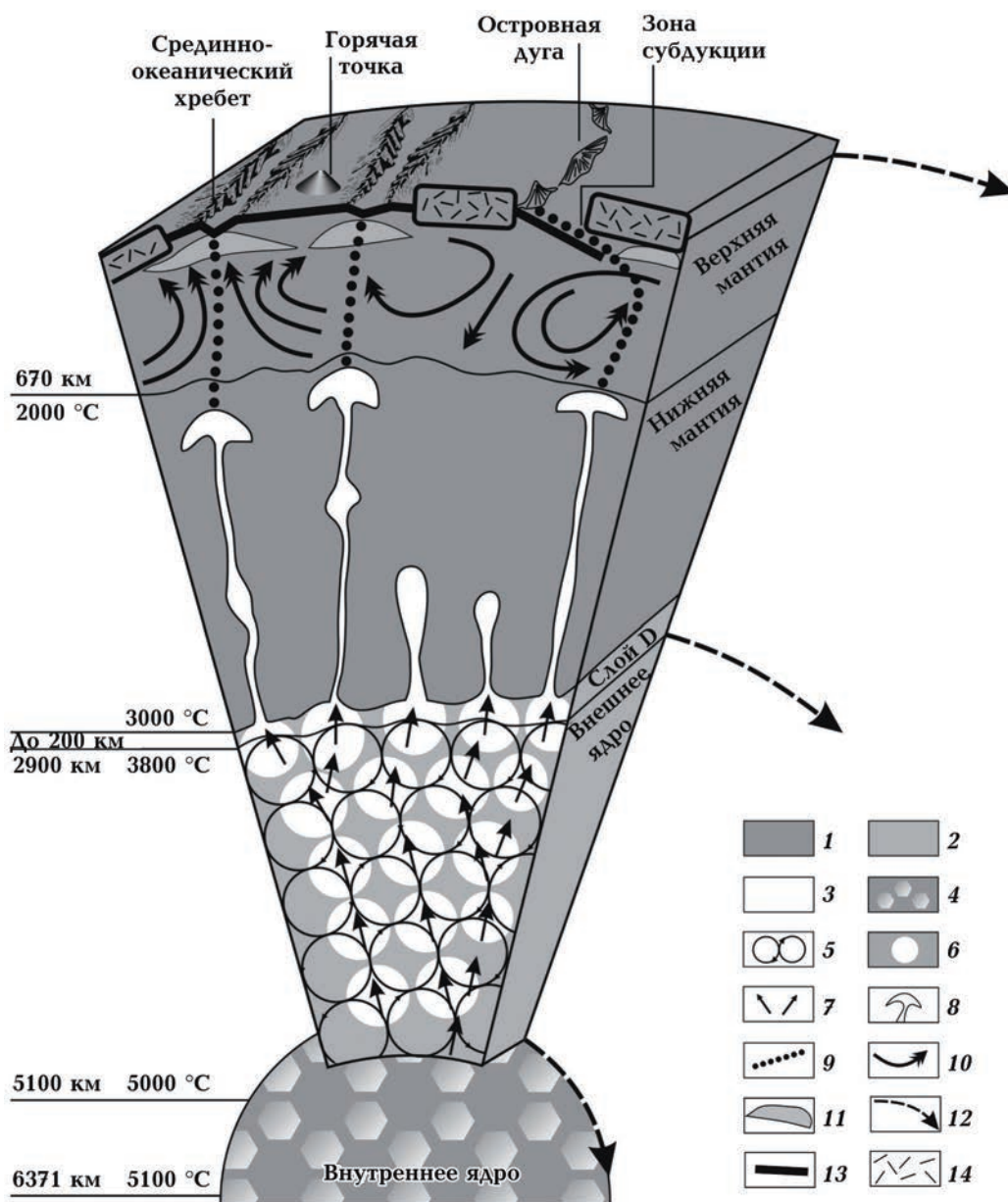


Рис. 3. Глобальная геофлюидодинамическая модель Земли (составлена с использованием модели J. Montagner (1999) и с учетом современных представлений, изложенных в работах В. В. Адушкина, Е. В. Артюшкова, Н. Л. Добрецова и А. Г. Кирдяшкина, Ф. А. Летникова, А. А. Маракушева, Ю. М. и Д. Ю. Пуцаровских, Д. И. Рябчикова, В. Е. Хаина): 1 — твердое состояние; 2 — жидкое состояние; 3 — сверхсжато-газовое состояние; 4 — мозаичность поверхности твердого ядра; 5 — вихревые движения в жидком ядре; 6 — «пузыри» сверхсжатого плотного поликомпонентного газа; 7 — газовые струи; 8 — плюмы — базовые трубы дегазации; 9 — проницаемые каналы; 10 — конвективные течения в верхней мантии; 11 — астенолиты; 12 — уровни изменения угловых скоростей; 13 — океаническая литосфера; 14 — континентальная литосфера.

дается, что геодинамика высокосейсмичных регионов в значительной мере связана с мантийными плюмами [Нусипов и др., 2005]. Более того, по данным [Cande, Stegman, 2011; van Hinsbergen, 2011], быстрое движение Индийской плиты на север, ее

столкновение с Евразией, спровоцированная этим столкновением огромная сейсмичность и излияние базальтов на плато Декан, связаны с активностью головки суперплюма Реюньон.

Согласно современным представлени-

ям, суперплюмы это «гигантские отщепления вещества (и энергии) от внешнего ядра Земли, достигающие земной поверхности» [Комаров, Томсон, 2007, с. 779]. Они определяют размещение крупнейших металлогенических и нефтегазоносных провинций. Их эволюция сопровождается структурной дифференциацией на разнообразные по размерам, термобарическому режиму, геодинамической и флюидодинамической активности плюмы и соответствующие им зоны (ареалы). Плюмам соответствуют различные по размерам и возрасту бассейны с характерными литогеодинамическими показателями (интенсивный галогенез, накопление черносланцевых толщ эвксинского типа и т. п.). В качестве примера можно привести суперплюм, который возник в позднем протерозое под обширным Сарматским (палео)щитом, с распадом которого вследствие рифтогенеза связано возникновение системы нефтегазоносных бассейнов (НГБ) и кристаллических массивов [Лукин, 1997; Цветкова и др., 2017].

Особенно четко связь закономерностей нефтегазоносности с указанными глубинными факторами проявилась при формировании Припятско-Днепровско-Донецкой системы НГБ [Лукин, Шпак, 1991]. Основной по запасам углеводородов и максимальный по глубинному диапазону нефтегазоносности Днепровский НГБ (центральная и юго-восточная части Днепровско-Донецкой впадины — ДДВ) расположен над апикальной частью Днепровско-Донецкого плюма — наиболее активного среди дериватов Сарматского суперплюма. Он известен, прежде всего, как одноименный мантийный диапир, который структурно выражается в виде «антиклинального перегиба раздела М (в пределах указанного сегмента он воздымается до отметок 32—35 км) ... со сводом в виде узкого эллипса неправильной формы» [Чекунов и др., 1989; Цветкова и др., 2017]. Этот свод и его склоны контролируют основную часть разведанных запасов газа Восточного региона Украины. Здесь сосредоточены все 45 месторождений и

более 100 преимущественно газоконденсатных залежей, которые находятся на глубинах свыше 5 км. Соответствующая часть ДДВ характеризуется наиболее широкими: стратиграфическим, формационным, глубинным и фазово-геохимическим диапазонами нефтегазоносности. К его характерным геологическим особенностям относятся: максимальные значения мощностей осадочного чехла и его доминирующих комплексов, максимальная стратиграфическая полнота и аномально большие толщины переходных интервалов ($D_2—D_3$, $D_3—C_1$, $C_1—C_2$, $C_3—P_1$), наличие мощных черносланцево-эвксинских отложений (D_3 , C_1), интенсивный галогенез (D_3 , P_1) и галокинез (именно здесь находятся практически все гигантские соляные диапиры). Наиболее важными с точки зрения закономерностей нафтидогенеза и нефтегазоаккумуляции являются признаки неогенной и актуотектонической активности плюма (появление на глубинах 4—5 км пресных ювенильных вод под рассолами, активное отражение глубинных структур в современном ландшафте и рельефе, повышенная гелиеносность и ртутоносность нефтяных и газовых месторождений и т. д.). Именно длительной и многоэтапной активизацией плюма вплоть до плиоцен-четвертичного времени объясняется широкий стратиграфический диапазон и уникальное фазово-геохимическое разнообразие нафтидов, широкое распространение аномально высоких пластовых давлений (АВПД), глубинная гидрогеологическая инверсия, с которой связаны признаки недавнего (современного) формирования залежей и признаки их восполнения, темпы которого возрастают с глубиной [Лукин, 2012, 2014].

Наиболее важным с точки зрения эндогенного рудообразования, нафтидогенеза, геоэкологии аспектом функциональной характеристики плюмов является рассмотрение их как ТД первого порядка. Такая трактовка позволяет объединить практически все основные аспекты плюм-тектоники. При этом на разных этапах эволюции плюма он может контролиро-

вать как магматизм и гидротермальный рудогенез, так и нефтидогенез (т. е. функционировать в качестве ТД как «горячей», так и «холодной» дегазации в понимании П. Н. Кропоткина).

Данные сейсмической томографии установили наличие неравномерно распределенных в мантии (вплоть до границы с ядром) разогретых зон, струй (плюмов) ядерно-мантийного вещества, восходящие на разные уровни, вплоть до литосферы. Корни их уходят в жидкое ядро, а основные очаги связаны со слоем D". Именно последний приобретает в настоящее время ключевое значение в глубинной гео- и флюидодинамике. Расположенный на границе жидкого ядра и твердой мантии, он сосредоточивает в себе основной энергетический потенциал Земли за счет генерации тепла электромагнитными процессами в многослойном жидком металлическом ядре и силами трения на его границах с твердыми геосферами — внутренним ядром и нижней мантией. На этот глобальный процесс накопления тепла в слое D" накладываются восходящие из внутреннего ядра потоки водорода, окклюдированного практически в неограниченных количествах твердым железоникелевым (по-видимому, с существенными примесями других металлов) ядром [Ларин, 1973, 2005; Трубицын, Харыбин, 2010; Gilat, Vol, 2005, 2012]. Косвенное подтверждение этого — открытие в последние годы мозаичности отражающих свойств его поверхности [Адушкин, 2004]. Неравномерная во времени и пространстве водородная продувка является важнейшим фактором термохимических процессов во внешнем жидком металлическом ядре. Его плотность приблизительно на 10 % легче плотности расплавленного железа при соответствующих P, t -условиях, что объясняется высоким содержанием различных более легких элементов и, в первую очередь, углерода, кремния, серы, азота [Лукин, 1999, 2006]. Наряду с ними, исходя из современных представлений о происхождении и ранней истории Земли, есть основания предполагать присутствие в его составе ряда других

элементов. При этом благодаря водородной продувке происходят, хотя и неравномерные в пространственно-временном континууме, но перманентные сопряженные процессы аккреции внутреннего ядра, выноса различных элементов из пограничных с ним частей внешнего ядра и накопления их на границе с нижней мантией. Это позволяет предполагать чрезвычайно сложный химический состав слоя D", в котором на фоне преобладания Fe, C, Si, S присутствует основная часть таблицы Менделеева, включая некогерентные элементы. По-видимому, степень геохимической аномальности здесь гораздо выше, чем в аномальной верхней мантии — астеносфере, не говоря, естественно, о несопоставимых энергетических ресурсах. Слой D", который в какой-то мере является глубинным аналогом астеносферы (нижняя астеносфера по В. Е. Хаину), это лишь верхняя тонкая оболочка основного термохимического двигателя Земли. Его важнейшими регуляторами являются термохимические плюмы. Реальность их существования, помимо сейсмотомографии, подтверждается данными экспериментального и теоретического моделирования [Добрецов, 1997; Летников, 2001]. Они базируются на предположении о возникновении термохимических плюмов на границе ядро — мантия. Однако упомянутые данные о мозаичности отражающих свойств поверхности твердого ядра [Адушкин, 2004] позволяют предположить, что их зарождение инициируется исходящими из него струями водорода и гелия. Проходя через жидкое ядро (с выносом ряда элементов в гидридной форме) и взаимодействуя с турбулентными вихревыми течениями в мощном магнитном поле [Добрецов, 1997], они образуют локальные скопления — «пузыри» сверхсжатого поликомпонентного (на водородной основе) газа непосредственно под твердой нижней мантией. Последняя, судя по современным данным, состоит из таких минеральных компонентов, как «both MgSiO₃-rich perovskite and magnesiowustite contain about 0,2 weight percent (wp %) H₂O and

CaSiO₃-rich perovskite contains about 0,4 wt % H₂O» [Murakami et al., 2002, с. 1885]. Анализируя особенности модельного минерального состава нижней мантии, группа японских исследователей [Murakami et al., 2002; Okuchi, 1997] приходит к выводу о наличии в ней колоссальных (более, чем в 5 раз превышающих объем гидросферы) запасов воды. Диффузионное проникновение водорода способствует возникновению в ней очагов повышенной обводненности — «пузырей-протоплюмов» [Murakami et al., 2002]. Возникающие на их контакте разветвленные цепные окислительно-восстановительные реакции (кроме того, они могут возникать и непосредственно в слое D'' благодаря наличию серы, галогенов и других окислителей в резко восстановительной среде металлокремниево-углеродистого расплава) приводят к супермощным взрывам. Таков наиболее вероятный механизм выхода из слоя D'' в нижнюю мантию термохимических плюмов, реальность существования которых подтверждается данными сейсмомографии, экспериментального и термодинамического моделирования (Н. Л. Добрецов, А. Г. Кирдяшкин и др.). Их дальнейшее восходящее движение обусловле-

но преимущественно разницей в плотности, т. е. особенностями химического состава. Согласно [Артюшков, 2000], подъем более легких плюмов сквозь нижнюю мантию в поле силы тяжести сопровождается выделением большого количества потенциальной энергии, которая «в основном расходуется на нагревание нижней мантии вблизи траектории» их движения, вследствие чего после подъема плюма за ним остается канал с повышенной температурой и пониженной вязкостью, вдоль которого «в дальнейшем могут поступать в верхнюю мантию новые порции легкого материала» [Артюшков, 2000, с. 9]. Разделяя взгляды Е. В. Артюшкова о возможном существовании в мантии таких тонких каналов, соединяющих ядро с внешними геосферами (рис. 4), можно предположить, что они представляют интерес не столько как проводники новых плюмов (скорее наоборот, это фактор уменьшения энергии возникающих на границе ядра и мантии термохимических аномалий), сколько как флюидопроводящие пути. При этом следует учитывать возможности существенно различных режимов их функционирования. При импульсном режиме, обусловленном возбуждением системы «внешнее

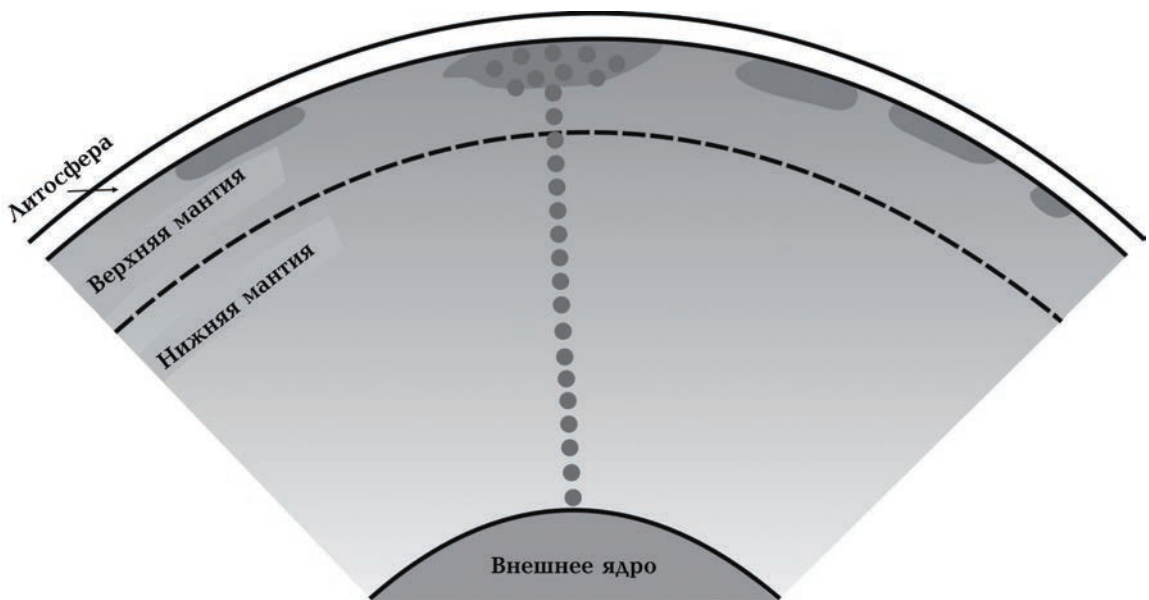


Рис. 4. Принципиальная схема функционирования пронизаемого канала с пониженной вязкостью сквозь мантию (по Е. В. Артюшкову, с изменениями).

жидкое ядро — слой D''» при эндогенных взрывах или импактных событиях глобального значения, по этим каналам может осуществляться «впрыскивание» суперглубинных флюидов непосредственно из очагов флюидизации на границе «ядро — мантия», их проникновение по сквозьформационным флюидопроводящим системам (СФС) [Лукин, 1997] и формирование «инъектированных суперглубинным веществом трещин естественного гидроразрыва в породах литосферы на различных (в зависимости от исходной энергии импульса и конкретных геологических условий) глубинах. При эксплозивных явлениях во флюидных очагах слоя D'' эти каналы могут контролировать трубки взрыва и разнообразные формы диапиризма. С импульсным восходящим движением суперглубинных флюидов по каналам повышенной проницаемости и СФС (см. ниже) связано возникновение резко отличных от обычных пород и жильных минеральных агрегатов образований со специфическими особенностями вещественного состава и структуры. Независимым (от современных данных физики Земли и глобальной петрологии) подтверждением иницирующего участия (супер)глубинных флюидов в процессах ГДЗ являются инъекции геохимически-аномального ТППВ по стилолитизированным трещинам естественного флюидоразрыва и «зараженность» гидротермальных руд и коллекторов нефтидов частицами самородных металлов, сплавов и интерметаллидов, а также карбидов и силицидов [Новгородова, 1983; Лукин, 1999, 2006, 2009]. Удивительное геохимическое и структурно-морфологическое разнообразие этих частиц [Лукин, 2006, 2009] свидетельствует, во-первых, об обилии металлов в различных формах в исходном безводном сверхсжатом газом флюиде, а во-вторых — о многообразии механизмов выделения их в самородном виде при ведущей роли не термодинамических, а кинетических факторов. Конкретная природа самороднометаллических образований здесь различна. В значительной мере это ксенолиты, вынесенные при взрыве супер-

глубинных «газовых пузырей» в слое D'' (это, по-видимому, относится и к алмазам с металлическими пленками в кимберлитах и лампроитах, что подтверждается и их весьма древним изотопным возрастом). Частично они сформированы при восходящем движении флюида, особенно при его вскипании вследствие резких изменений P, t -режима. В формировании наноразмерных (менее 100 нм) частиц, по-видимому, велика роль кавитации [Адушкин, 2004; Лукин, 2013].

Помимо преобладающей роли различных форм углерода, среди характерных спутников самородных металлов установлены силициды Fe и Ti, а также различные карбиды [Лукин, 2006]. Последние представляют особый интерес, поскольку еще Д. И. Менделеев предполагал, что они преобладают в составе «барисферы» и играют ключевую роль в нефтеобразовании при взаимодействии с фреатическими водами. В условиях литосферы и верхней мантии их образование термодинамически запрещено. Более того, и в нижней мантии, силикатно-окисной (на основе $MgSiO_3-CaTiO_3-MgO \cdot FeO$) по своему составу, отсутствуют условия для их образования и сохранения. Поэтому обнаружение карбидов Fe, Ti, V и Ca в указанных природных объектах, тем более в ассоциации с разнообразными самородными металлами, приобретает особое значение в качестве прямого суперглубинного (ядро — слой D'') геохимического показателя.

Изучение сублиматов высокотемпературных газовых струй некоторых вулканов, которые по данным сейсмомографии имеют суперглубинные очаги (Гавайи и др.), можно рассматривать как натурно-экспериментальное подтверждение восходящей струйной миграции суперглубинных флюидов. Это свидетельствует о флюидодинамической и геохимической активности глубинных геосфер и о прямом участии генерируемых в ядре и слое D'' флюидов в процессах, протекающих в литосфере (включая стратисферу), а также в гидро- и атмосфере.

Можно предполагать, что, в отличие от

существенно железо-никелевого (с окклюдированном в неограниченных объемах водородом и большим количеством различных примесей, включая С, Si, S, различные металлы и т.п.) твердого ядра [Рябчиков, 2003], в периферической части внешнего ядра и в слое D'' гораздо выше роль углерода в сочетании со значительным содержанием большинства элементов таблицы Менделеева.

Наличие скоплений карбидов различных металлов на разных уровнях в мантии и литосфере, связанных с отделением флюидов от головной части плюмов и движением их по постплюмовым пронизываемым каналам, позволяет рассматривать их как автономные очаги концентрации водорода, при взаимодействии которого с различными флюидо-породными субстратами происходит интенсивное углеводородообразование [Лукин, 1999].

Дальнейшие исследования, несомненно, позволят изучить характер и оценить масштабы их влияния на магматизм и литогенез, рудообразование и нефтидогенез, а также на эволюцию биосферы на различных (включая нео- и актуотектонический) этапах истории Земли.

Все изложенное подтверждает приуроченность плюмтектонических корней к нижней мантии — слою D'' — внешнему жидкому ядру Земли, что согласуется с уже упоминавшимися выводами Н. Л. Добрецова, Ф. А. Летникова, А. А. Маракушева, И. Д. Рябчикова и других ведущих современных петрологов о том, что в геологической истории от жидкого ядра Земли неоднократно отделялись мощные газовые потоки, которые со временем достигали верхних горизонтов литосферы, включая и земную кору, инициируя и непосредственно участвуя в процессах магматизма, метаморфизма, рудообразования. Более того, именно «восходящие потоки суперглубинных флюидов, в которых преобладают газы и летучие компоненты широкого круга элементов, получили название плюмов» [Летников, 1992, с. 6]. Эти фундаментальные выводы, сделанные, как отмечалось, преимуще-

ственно на основании петрологических данных, находят независимое подтверждение не только в упомянутой интенсивной зараженности пород глубокозалегающих сегментов НГБ, расположенных над апикальными частями плюмов, дисперсными самородно-металлическими частицами, но и в различных термодинамических, гидрогеохимических и изотопно-геохимических показателях по данным глубокого и сверхглубокого (более 6 км) бурения. Независимо от петрологических данных, это свидетельствует о том, что основу плюма составляет (супер)глубинный флюид, гелиево-водородно-метановый поликомпонентный сверхсжатый газ, насыщенный разнообразными по химическому составу кластерами, металлическими (а также углеродистыми, карбидными, силицидными) микро- и наночастицами.

Таким образом, плюмы характеризуются многообразием форм их проявления в геологических и геофизических полях. Их энергетической и вещественной основой являются суперглубинные флюиды, обусловленные спонтанными выбросами сверхсжатого поликомпонентного газа, формирующего восходящие трансмагматические (в понимании Д. С. Коржинского) потоки. Данные термодинамического моделирования [Летников, 1992; Кирдяшкин и др., 2008; Трубицын, Харыбин, 2010] свидетельствуют о том, что отделившийся от жидкого ядра плюм обладает огромным энергетическим потенциалом (давление свыше 1300 кбар, температура более 4000 °С, а энтальпия водорода 1000—1200 кДж/г). **Дериватами восходящего потока исходного флюида являются восстановленные газы (H₂, CH₄, H₂S), взаимодействие которых с кислородом силикатов мантии и горных пород земной коры сопровождается выделением тепла, инициированием магматических и гидротермальных процессов. Благодаря указанным экзотермическим процессам плюм «прожигает» (по выражению Ф. А. Летникова) мантию и земную кору. В то же время, часть исходного флюида (судя по инъекциям ТППВ, карбонатито- и кимберлитоподобным брекчиям и т. п.)**

прорывается до верхних горизонтов земной коры, а его дериваты в виде струй водорода, гелия, метана, сероводорода достигают земной поверхности.

Изначально безводный, этот флюид должен трансформироваться по мере восходящего движения прежде всего за счет окисления водорода, а также ассимиляции воды. Важным фактором этой ассимиляции могут быть очаги обводненности, связанные с диффузией водорода [Гуфельд и др., 1998]. Указанная трансформация еще более усложняет состав и свойства флюидов. Их диффузионно-фильтрационная перколяция по СФС [Лукин, 2004] обуславливает разнообразные метасоматические преобразования пород.

Траптовка мантийных плумов как базовых (мега)труб дегазации, система которых контролирует глобальные процессы ГДЗ, позволяет объединить практически все основные аспекты эндогенного рудообразования и нефтидогенеза (особо следует подчеркнуть ее значение для геоэкологии).

Сквозьформационные флюидопроводящие системы (СФС) — основные каналы глубинной дегазации Земли в литосфере. В последние годы все больше внимания специалистов по геологии нефти и газа привлекают субвертикальные геологические тела — традиционный объект интересов специалистов рудной геологии (штокверки, рудные столбы и т. п.) и вулканологов (вертикальные концентрические структуры, магмапроводящие каналы и т. п.). Им, в частности, были посвящены специальные сообщения на VII Международной конференции «Новые идеи в геологии и геохимии нефти и газа» (Москва, МГУ, 25—27 мая 2004 г.). В докладе известного азербайджанского геолога-нефтяника И. С. Гулиева рассматривалась взаимосвязь грязевого вулканизма с «субвертикальными зонами потери сейсмической информации» в Южно-Каспийской впадине [Гулиев, 2004, с. 153]. Российские специалисты по сейсморазведке сложнопостроенных резервуаров нефти и газа В. В. Харахинов и С. И. Шленкин на основе

применения фокусирующего преобразования и других новых технологий обработки сейсмических данных продемонстрировали ряд объемных (3D) и профильных (2D) моделей субвертикальных и наклонных «зон дезинтеграции геологической среды» [Харахинов, Шленкин, 2004, с. 593], выделенных в Среднеширотном Приобье, Восточной Сибири и Тимано-Печорской провинции в качестве флюидопроводящих систем. При этом отмечалось, что речь идет о «новом классе геологических структур» [Гулиев, 2004, с. 153]. Целесообразность их выделения в особую группу прежде всего в качестве специальных объектов исследования не вызывает сомнений. Что же касается их новизны, то идентификация и изучение таких объектов характеризуется достаточно длительной и сложной историей. Здесь следует упомянуть о давно (свыше 50 лет назад) введенных в науки о Земле представлений о «фильтрующей термогидроколоне» (П. Термье, Д. С. Коржинский, Г. Л. Поспелов и др.) и «зоне сквозной коровой проницаемости» (Н. А. Штрейс). Будучи по самой сути своей не морфологическими, а функциональными, они, естественно, предполагали связь с определенным субстратом — сложнопостроенными дренирующими зонами, отличающимися от вмещающих формаций повышенной степенью дезинтеграции пород, наличием совокупности разнообразных инъекционных и интрузивных тел разной природы. Таким образом, говорить о «субвертикальных геологических телах» как о «новом классе геологических структур» нет оснований. В то же время можно и следует говорить об их особой роли в канализации ГДЗ (включая процессы рудо- и нефтидонакопления) [Лукин, 2004]. И в этом отношении данные, приведенные в вышеуказанных работах, представляют первостепенный интерес. Последний обусловлен, прежде всего, кризисом традиционных представлений о формировании углеводородных макроскоплений, базирующихся на осадочно-миграционной теории (длительность процесса первичной миграции, большая роль латеральной ми-

грации и т. п.). Вместе с тем следует отметить, что и применительно к НГБ проблема выделения субвертикальных и наклонных, секущих по отношению к наслоенным осадочным формациям бассейна зон как особых в морфологическом (дискордантные относительно вмещающих отложений, нередко перфорирующие их тела) и функциональном (повышенная флюидопродоводность) отношениях геологических тел отнюдь не является новой. Прежде всего целесообразно напомнить о том, что первые представления об условиях залегания нефти базировались на аналогиях с рудными жилами, а катастрофические нефтяные фонтаны (например, на Северном Кавказе вблизи Грозного в 1895 г.) ассоциировались с трещинными вулканическими извержениями (А. Гумбольдт, Д. И. Менделеев, К. В. Харичков). Понятие о ТД было предложено в свое время П. Н. Кропоткиным именно для обозначения «субвертикальной зоны, внешний контур которой ограничивает совокупность различных углеводородных залежей битумо-, нефте-, газопроявлений, разнообразных следов миграции высоконапорных термальных восстановленных флюидов» [Кропоткин, 1986, с. 540]. Будучи тесно связанным с упомянутыми понятиями фильтрующейся термогидроколонны и зоны сквозной коровой проницаемости, понятие ТД значительно шире первого и существенно конкретнее (и многоаспектнее) второго. Оно имеет не столько морфологический, сколько функциональный смысл, обозначая субвертикальную столбообразную зону повышенной проницаемости земной коры с признаками неоднократного разновозрастного (вплоть до современного) внедрения глубинных флюидов [Лукин, Гарипов, 1994].

Что касается морфологии ТД, то их структурно-геологической основой являются СФС. Именно последние, как показано на принципиальной схеме (рис. 5), являются совокупностью флюидопроводящих путей, магистральной дренажной системой ТД. Впрочем, разграничить тут функциональный и структурно-

геологический аспекты сложно, поскольку СФС «стягивают на себя» флюидные потоки. Со структурно-геологической точки зрения СФС представляют собой совокупность связанных зонами трещиноватости тех вертикальных и наклонных секущих структурно-тектонических элементов, которые играют особую роль не только в рудообразовании, но и в нефтегазонакоплении.

СФС, таким образом, это важнейший элемент различных тектоногеодинамических типов бассейнов, наиболее ярко и четко проявляющийся в рифтогенных бассейнах. *«Характерной особенностью рифтогенных бассейнов является существование геодинамически обусловленных СФС, в формировании которых принимают участие как эндогенные (рифтогенез, магматизм, разнообразное трещиноватозавязанное и тектоническое гробление), так и экзогенные (эрозионные врезы и аккумулятивные песчаные тела, трещиноватость бокового отпора на дне и бортах отрицательных палеогеоморфологических форм, рифы, карст) факторы; СФС играют важную роль в локализации наложенных (в частности гипогенных) вторичных процессов, рудообразовании и нефтегазонакоплении»* [Лукин, 1989, с. 36].

СФС включают в себя как разнообразные формы внедрения (соляные и глиняные диапиры, вулканы, системы распирающих даек различной природы и т. д.), так и массивы в различной степени дезинтегрированных пород. В совокупности это определяет характерные сейсмические образы ТД (сквозные зоны потери сейсмической информации при наличии отдельных интервалов с достаточно сложными сейсмостратиграфическими характеристиками). Разумеется, наиболее важными компонентами как СФС, так и ТД являются флюиды. Учитывая многообразие типов СФС, разные уровни заложения их «корневых» частей, широкий диапазон геотермобарических и гидрогеодинамических условий, в данном случае целесообразно употребление термина (гео)флюид не в узком его понимании (газообразное,

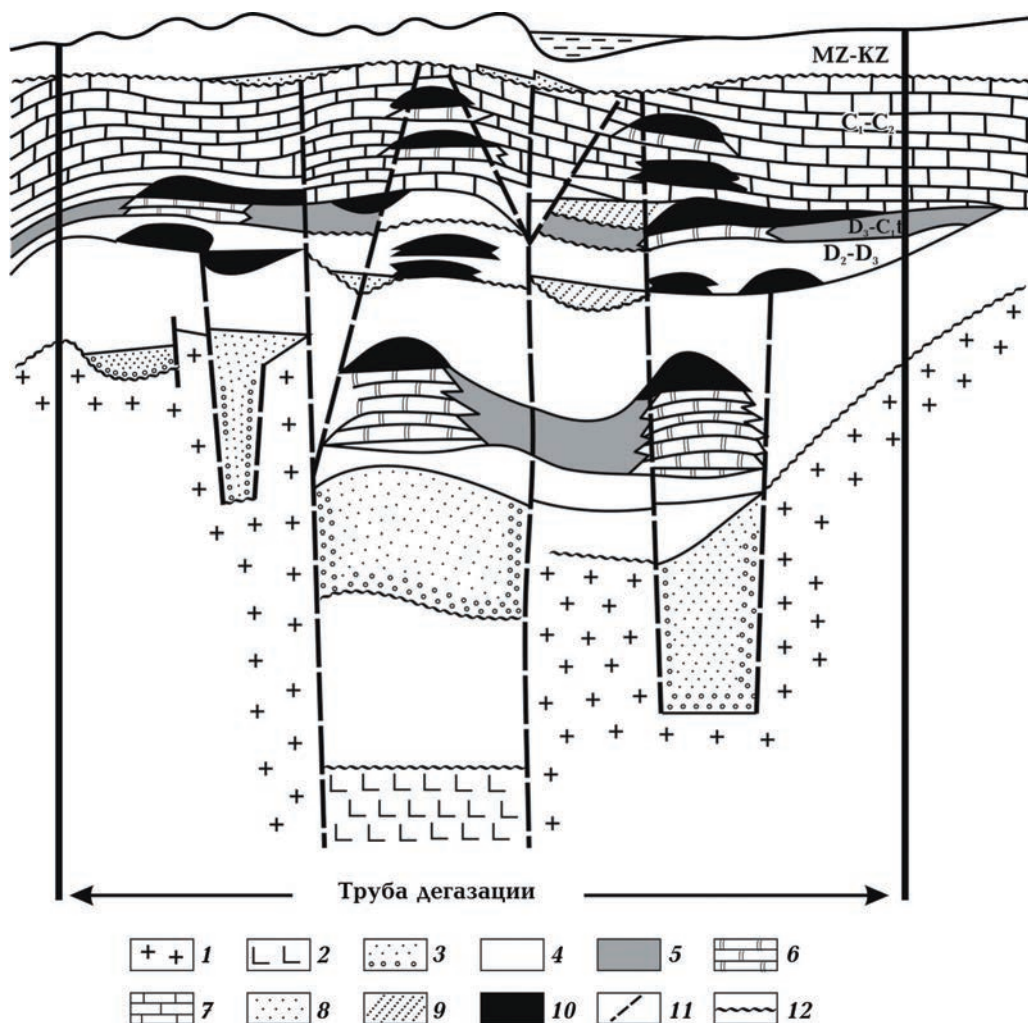


Рис. 5. Принципиальная схема сквозьформационной флюидопроводящей системы (по А. Е. Лукину), контролирующей трубу дегазации (в понимании П. Н. Кропоткина): 1 — кристаллические породы докембрийского фундамента; 2 — базальты; 3 — песчано-грубообломочные молассоиды; 4 — карбонатно-терригенные отложения; 5 — темноцветные кремнисто-карбонатно-глинистые отложения; 6 — рифогенно-карбонатные массивы; 7 — шельфовые карбонаты; 8 — аккумулятивные песчаные тела; 9 — палеорусла; 10 — нефтяные залежи; 11 — разрывные нарушения; 12 — поверхности несогласия.

парагазовое или газовой-жидкое состояние вещества), а в качестве общего термина, обозначающего «любую среду, способную двигаться сквозь земную кору в силу механических свойств, отличных от свойств твердых тел» [Поспелов, 1963, с. 19]. При столь широкой трактовке к флюидам относятся не только жидкие, газо-жидкостные, парагазовые системы, газы, нефть, битумы (мальты, асфальты), но и флюидизиты, прежде всего каменная соль и глины, способные к течению и диапиризму. Многообразие проявлений флюидодинамики

обуславливает сочетание разнообразных инъекционных и интрузивных (диапировых) тел с различными формами дезинтеграции породных массивов.

Вертикальная миграция углеводородов осуществляется по ТД, причем основная часть их диффузионно-фильтрационного потока стягивается в СФС. Поэтому многопластовые месторождения, связанные с разнообразными антиклинальными и солянокупольными структурами, фактически представляют собой многофазно функционирующие ТД, причем наиболее

молодые углеводородные скопления, которым сопутствуют явления глубинной гидрогеологической инверсии (появление среди рассолов зоны весьма затрудненного водообмена маломинерализованных конденсационных вод) приурочены к глубоководным комплексам. При фундаментальных структурно-геологических и формационных различиях молодых (кайнозойских) и древних (палеозойских) осадочных бассейнов приуроченные к ним ТД характеризуются парагенезом разнообразных по фазово-геохимическому диапазону залежей нефтяных, диапировых структур и проявлений гидрогеологической инверсии с разным соотношением глубинных и мобилизованных из осадочных формаций вод. Указанный парагенез характеризует широту флюидодинамического и физико-геохимического диапазонов процессов ГДЗ, контролируемых ТД. Это наглядно иллюстрируется сопоставлением разрезов палеозойского погребенного антиклинального поднятия (Мачехское газоконденсатное месторождение) и типичного грязевого вулкана, осложняющего плиоцен-четвертичную нефтегазонасыщенную антиклиналь Южно-Каспийской депрессии (рис. 6, см. с. 10).

Литолого-эпигенетические критерии выделения и картирования ТД. Сложная морфология отражает еще более сложную совокупность процессов теплопереноса, которые в целом носят многофазный импульсный характер и контролируются геодинамическим режимом [Лукин, 1997]. При ведущей роли разноуровневых глубинных флюидов, термодинамические свойства которых являются потенциал-задающими для вторичных процессов в пределах ТД, именно они обуславливают разнообразные наложенные гипогенные преобразования и новообразования, с которыми связаны основные диагностические геолого-геофизические признаки этих систем. Вместе с тем на определенных стадиях тектоногеодинамического развития бассейна могут возникать предпосылки для идио- и криптогипергенных (в понимании Н. Б. Вассоевича) процессов,

обусловленных нисходящими потоками метеорных и бассейновых вод. От конкретных соотношений эксфильтрационных и инфильтрационных факторов существенно зависят геолого-геофизические особенности породных массивов в пределах ТД, особенности их флюидов и характер нефтегазонасыщенности.

Таким образом, ТД имеет гораздо более сложный характер постседиментационных изменений по сравнению с «межтрубными» пространствами. Здесь на свойственную бассейну пороодообразования в целом катагенетическую (осадочный чехол) и регионально-метаморфическую (промежуточный комплекс, фундамент) зональность накладываются гипогенные, а в отдельных интервалах — и гипергенные изменения. Главным критерием их выделения, а следовательно, и диагностики ТД являются палеогеотермические показатели [Лукин и др., 1989]. В принципе, все типы постседиментационных процессов протекают в «каркасно-флюидных системах» в режиме «бигенности» (термины Г. Л. Поспелова) и «бигеотермичности». Однако степень несоответствия породно-каркасных и флюидных геотермодинамических параметров (прежде всего, показателей кондуктивного и конвективного геотермических режимов) для различных генетических типов постседиментационных преобразований, отличающихся друг от друга гидрогеологическими условиями, характерными временами и термодинамической направленностью процессов, — существенно иная [Лукин, 1989]. Катагенез характеризуется практически совпадающими значениями (палео)температур кондуктивного (отражательная способность по витриниту, цветовые индексы спор и т.п.) и конвективного (палеотермометрия по газово-жидким включениям в аутигенных минералах, изотопно-геохимические термомолюминесцентные показатели) прогрева [Лукин и др., 1989]. Гипогенный аллогенез (т. е. наложенные изменения, обусловленные гипогенными факторами) характеризуется существенным превышением палеотемператур конвективного прогрева, а

идиогипергенез — обратными соотношениями (рис. 7). Прямым подтверждением реальности явления «бигеотермобаричности» в «каркасных» флюидно-породных системах НГБ являются данные изучения зон гидрогеологической инверсии с аномально повышенными сверхгидростатическими давлениями. Одна из таких типич-

ных геотермобарических аномалий была в свое время детально изучена на уже упоминавшемся Мачехском месторождении [Лукин, 1989]. Здесь зафиксированные в интервале глубин 5100—5500 м пластовые давления характеризуются коэффициентом аномальности свыше 1,9, а минимальные (явно заниженные) превышения тем-

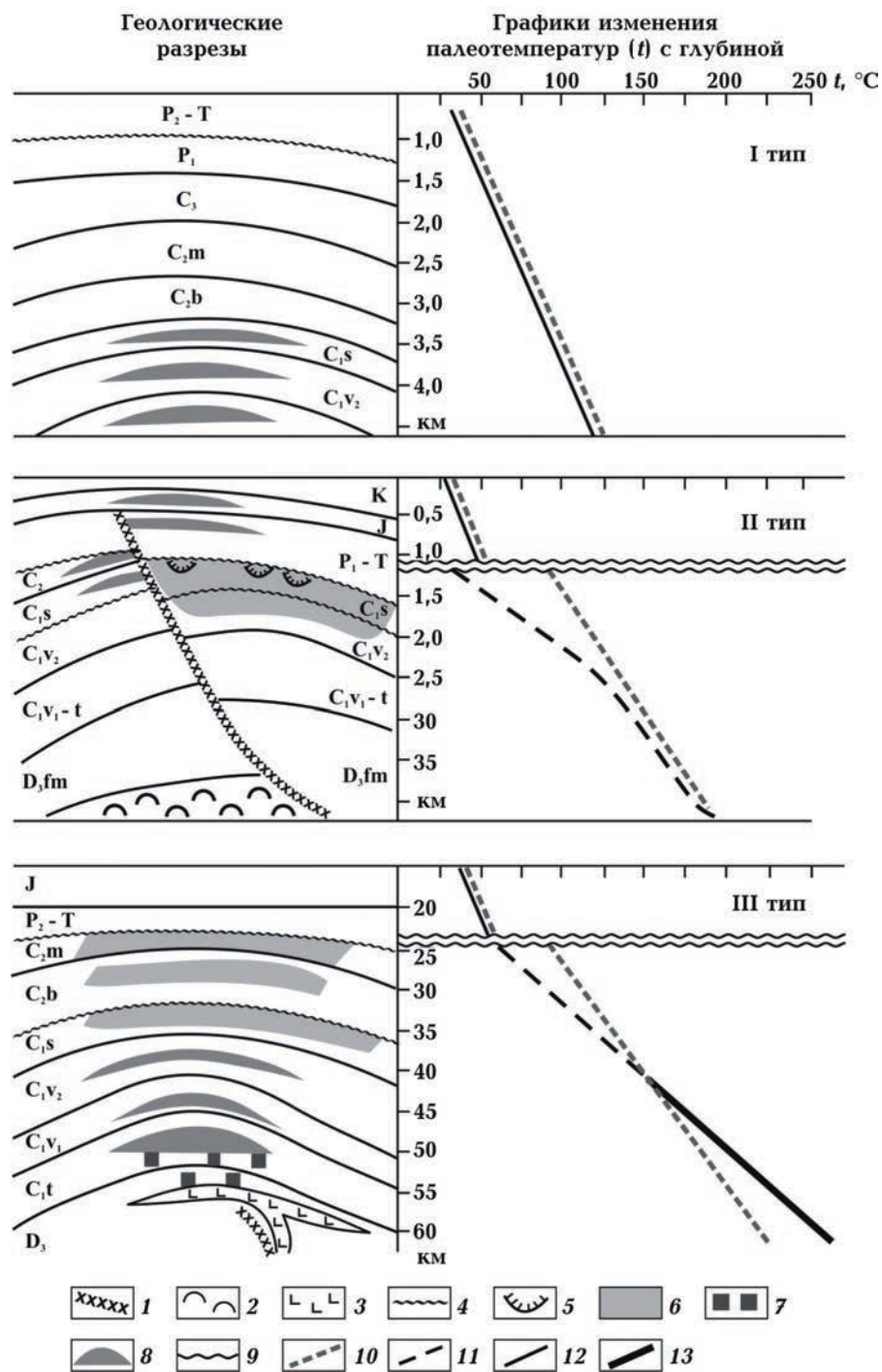


Рис. 7. Три типа палеогеотермических режимов нефтегазоносности геологических структур (по А. Е. Лукину): 1 — разрывные нарушения; 2 — соляной шток; 3 — гипабиссальная интрузия; 4 — поверхности несогласия; 5 — палеокарст; 6 — тяжелые нефти, маальты, асфальты; 7 — гидротермальное оруденение (анкерит, кальцит, сфалерит, пирит, антракосолит и др.); 8 — нефтяные, газоконденсатные и газовые залежи; 9 — поверхности палеогеотермического несогласия; 10 — график зависимости палеотемператур кондуктивного прогрева (T_k) от глубины; графики зависимости флюидных палеотемператур ($T_{фл}$): 11 — $T_{фл} < T_k$; 12 — $T_{фл} = T_k$; 13 — $T_{фл} > T_k$.

ператур глубинных маломинерализованных (общая минерализация менее 15 г/л) вод (оторочка массивной газоконденсатной залежи в терригенно-карбонатном резервуаре D_3fm-C_1t , образовавшаяся из гомогенного сверхкритического флюида), определенных по SiO_2 -геотермометрии (220 °С), над замеренными в скважине пластовыми температурами (~180 °С) составляют около 40 °С.

Данные по бассейнам Припятско-Днепровско-Донецкой, Тимано-Печорской и других нефтегазоносных провинций [Лукин, 1997] свидетельствуют о том, что все месторождения с недавно сформированными газоконденсатными или находящимися *in situ nascendi* парогазовыми углеводородными скоплениями критического состояния связаны с ТД, которые характеризуются суперпозицией разновозрастных гипогенно-аллогенетических процессов. Это в полной мере характерно для таких месторождений, как Яблунское, а также Харьковцевское, Солоховское, Шебелинское и др. Типичными примерами таких месторождений, связанных с «узловыми» (сформировавшимися в узлах сочленения разломов) структурами и контролируемых длительно развивающимися ТД, являются Астраханское, Карачаганак и Тенгиз (Прикаспийская впадина), Возейское и Усинское (Печоро-Колвинский авлакоген), Талинское и Ем-Еговское (Среднеширотное Приобье). Все они изучались на основе методологии литогеодинимического анализа [Лукин, 1989] и, судя по этим данным, характеризуются многофазными инъекциями глубинных флюидов по СФС. Связанная с ними разнообразная по морфологии (жилы, штокверки, стратиформные тела) гидротермальная минерализация (разнообразные сульфиды Fe, Cu, Pb, Zn, анкерит, давсонит, анальцит, РЗЭ-содержащие фосфаты, Cr- и В-содержащие глинистые минералы и т. п.) по своим минералогическим, элементно- и изотопно-геохимическим особенностям обнаруживает явные связи с дериватами щелочно-ультраосновного магматизма, признаками разгрузки мантийных газов.

Весьма показательным, что в тех случаях, когда, наряду со сформированными ранее, присутствуют залежи критического состояния с сопутствующими им явлениями гидрогеологической инверсии, гидрогеохимия их водных оторочек характеризуется присутствием В, РЗЭ, Li, U, Cr, V, Hg и других геохимически «несовместимых» элементов, повышенными значениями δD_{H_2O} , а также повышенными содержаниями 3He (на Яблунском и некоторых других месторождениях Днепровско-Донецкого авлакогена значения соотношения $^3He/^4He$ достигают $20 \cdot 10^{-8}$).

К характерным изотопно-геохимическим особенностям этих разновозрастных производных глубинных флюидов (включая как разнообразную минерализацию, так и газо-жидкофазные продукты распада сверхкритически флюидных систем) относятся близкие к метеоритному стандарту значения $\delta^{34}S$ (как для сульфидной минерализации, так и для углеводородных конденсатов), а также признаки утяжеления δD_{H_2O} и $\delta^{13}C_{CO_2}$ [Лукин, 1997].

Роль ТД в локализации открытой трещиноватости и вторичных коллекторов. Как отмечалось, к характерным литолого-эпигенетическим особенностям различных породных массивов в пределах ТД относятся: широкое развитие метасоматитов, жильной и вкрапленной гидротермальной минерализации (карбонаты, сульфиды, кварц, твердые битумы и др.). Однако их наиболее общее отличие от «межтрубных» пространств заключается в появлении признаков тектоногеодинамической напряженности и разнообразные проявления гидроразрыва пород. Кристаллические породы фундамента, породы осадочного чехла обнаруживают в пределах ТД признаки оптической ориентировки кварца и другие черты тектонитов, что характерно также для кристаллически-зернистых карбонатов и каменной соли. Структурно-петрологическое изучение нефтегазоносных пород фундамента на Юльевском месторождении позволило установить здесь признаки присутствия S-, В- и R-тектонитов. Тектонитами являются и галититы

всех соляных диапиров. Это относится и к кварцевым песчаникам нижнего карбона Яблунковского, Харьковцевского и других месторождений в пределах СФС–ТД. Связанные с ними вторичные коллекторы представляют собой метасоматиты, субстратом которых являются разнофациальные обломочные породы. Наряду с этим, о специфике геодинамического режима ТД свидетельствует резко повышенная густота и многообразии диаклазов.

Прежде всего, для них характерны мощные зоны дробления, причем не только приуроченные к нарушениям, но и вне прямой связи с ними. Отмечено два основных типа брекчий тектонического дробления. К I типу относятся брекчии с широким глубинным и формационным диапазоном состава обломков, включая породы кристаллического фундамента и ультрабазиты. В ДДВ такие брекчии установлены на Скоробогатьковском месторождении, в приштоковых зонах ряда крупных согласных диапиров (в ряде случаев их неверно относили к кепроку) (см. ниже).

Ко II типу относятся брекчии автохтонного характера. Они распространены по всему «стволу» СФС–ТД. Характер их проявления многообразен: от «сыпучих» аргиллитов и алевролитов до брекчированных карбонатных, вулканогенных и докембрийских кристаллических пород. При этом, в отличие от брекчий I типа, степень брекчированности варьирует в очень широких пределах: от начальных признаков дезинтеграции (скрытые проявления катаклаза, раскрытие литогенетической и пластовой трещиноватости) до полной дезинтеграции (аркозовые обломочные скопления по кристаллическим породам фундамента и т. п.). Наиболее же характерной разновидностью тектонических брекчий II типа являются какириты — породы, разбитые сетью разнонаправленных мелких трещин с размерностью фрагментов от нескольких сантиметров до 1—2 мм.

Широкое развитие зон дробления в пределах ТД обусловлено совокупным действием глубинно-эксплозивных факторов (I тип) и тектонокессонного эффекта

(II тип) (термин Н. П. Горяинова (1985) для обозначения известных свыше 100 лет со времен работ Д. Мак-Нафтона, В. Эгглстона и др. процессов разрушения породных массивов из-за быстрого снятия давления вследствие тектонического воздымания). Для обозначения зон дробления (брекчий) II типа целесообразен термин «тектокессониты» [Лукин, 1989]. В пределах ТД широко развита трещиноватость естественного фрекинга. При этом, наряду с «инъекционным» (внедрение высоконапорных глубинных флюидов) раскрытием по поверхностям наслоения и скрытым диаклазом, формируются типичные трещины гидроразрыва в прочных породах (известняки, песчаники с кварцевым или известковым цементом, кристаллические породы).

Поскольку ТД, как правило, приурочены к глубинным «узловым» структурам, характерной особенностью их геодинамического режима является резко выраженная неравномерность сжатия пород, а зачастую сочетание напряжений сжатия и растяжения. Это приводит к широкому развитию разнообразных явлений дилатансионного разуплотнения и, в частности, дилатантной трещиноватости [Лукин, 1989; Лукин, Гарипов, 1994; Лукин, Ларин, 2003].

Все указанные типы тектоногеодинамического разуплотнения породных массивов пользуются широким, хотя и неравномерным развитием в пределах ТД и достаточно полно изучены на Яблунковском, Харьковцевском, Юльевском и других месторождениях ДДВ. С ними связаны, в частности, так называемые суперколлекторы (термин И. П. Жабрева и М. А. Политыкиной) Карачаганак, Тенгиза и других месторождений Прикаспия, контролируемых глубинными «узловыми» структурами. В последнее время они установлены в центральной части ДДВ на глубинах свыше 6 км.

Для диаклазов в пределах ТД характерно сочетание признаков многократного растяжения (с внедрением глубинных флюидов) и сжатия (с многократными проявлениями растворения под давлени-

ем). Это отражает специфический режим ТД — постоянную «борьбу» геостатического и бокового сжатия с факторами гипогенного разуплотнения (эксплозивные внедрения глубинных флюидов, дилатансия, тектонокессонный эффект). Для ТД, активно действующих на нео- и актуотектоническом этапах, характерно раскрытие большинства диаклазов (включая и интенсивно стилолитизированные трещины гидроразрыва в песчаниках и известняках), проявление недавних и современных процессов формирования нефтегазоносных коллекторов с внедрением высоконапорных глубинных флюидов (АВПД, гидрогеологическая инверсия и др.). Именно такие ТД наиболее четко выделяются на сейсмических временных разрезах по совокупности зон потери корреляции.

Таким образом, в ТД наиболее ярко проявляется способность геодинамических напряжений «стягиваться на наиболее динамическую массу» [Поспелов, 1973, с. 164], что способствует интенсивным разнообразным процессам метасоматоза. Интенсивной метасоматической переработке пород с мобилизацией и перераспределением разнообразных дисперсных компонентов способствуют процессы тектоносейсмической активизации, которые в силу указанных особенностей геодинамического режима должны проявляться именно в пределах ТД.

Собственно тектоническая трещиноватость в традиционном понимании, как известно, связана с процессами скалывания и отрыва вследствие объемной тектонофизической деформации породных массивов. Распределение тектонофизических напряжений в земной коре характеризуется тремя неравными главными нормальными напряжениями, конкретные соотношения между которыми — суть соотношения литостатического давления и стресса. Однако при этом необходимо учитывать, что реальная геотектоническая среда представляет собой не просто ассоциацию породных тел, а сложную флюидо-породную систему, которая, помимо фонового горного давления (совокупность силы тяже-

сти столба горных пород и напряжений, связанных с различными тектоническими структуроформирующими процессами), характеризуется импульсными флуктуациями. Связанные с ними разрывы сплошности пород существенно отличаются от тектонических трещин морфологией, примазками углеводородного конденсата, нефти и битумов, значительно более частым отсутствием минерализации, характером и масштабами развития систем трещиноватости. Здесь необходимо подчеркнуть фундаментальное различие указанных механизмов разрывов сплошности пород по геотермодинамическому режиму и характерным временам формирования, на основании чего были выделены две основные группы трещинообразования в литосфере, связанные с изотермической и адиабатической разрядкой напряжений в породных массивах [Лукин, 2000; Лукин, Ларин, 2003]. Собственно тектоническая трещиноватость характеризуется в целом прямолинейными диаклазами и наличием регулярных ортогональных или ромбических систем — «более или менее правильных геометрических сеток» [Словарь..., 1988, с. 593].

Существенно иную роль в нефтегазонакоплении играет адиабатическое трещинообразование, связанное с сейсмическими импульсами и явлениями естественного флюидоразрыва. Если для обычного тектонического трещинообразования, связанного с разрушением породного массива в соответствии с теорией прочности Кулона—Мора, между возникновением трещины и миграцией через нее флюида нет причинной связи, то фактором формирования адиабатической трещины как раз и являются прорывы высоконапорного высокоэнтальпийного флюида, сопряженные с сейсмическими импульсами. Поэтому именно эта генетическая группа трещин, которая до недавнего времени вообще не фигурировала в классификациях трещиноватости, является наиболее важной при изучении закономерностей как гидротермального рудообразования, так и формирования не-

фтяных и газовых залежей (здесь следует учитывать, что взаимосвязанные сейсмоструктурные и флюидодинамические импульсы являются также фактором активизации более древних систем трещин отрыва и скалывания).

Ведущую роль в формировании адиабатической трещиноватости играют взаимосвязанные сейсмоструктурные и флюидодинамические факторы, обусловленные плюмтектоникой, что подтверждается различными индикаторами (трассерами) глубинных флюидов [Лукин, 2009]. Они локализуются в расположенных над апикальными частями мантийных плюмов центральных частях нефтегазоносных осадочных бассейнов, породы которых в пределах ТД I порядка в различной степени гидрофобизованы вследствие: а) мобилизации нефтяных углеводородов

(масел) из керогена гидрокарбопелитов (в частности, при трансформации горючих сланцев в черные сланцы [Лукин, 2011]) и б) непосредственного воздействия на породы безводного (супер)глубинного флюида (сверхсжатого поликомпонентного газа на углеводородной основе) и продуктов его конденсации [Лукин, 2009]. Степень этой гидрофобизации, в зависимости от конкретных литологических, петрофизических и физико-химических особенностей породного субстрата, варьирует в широких пределах: от сплошной до микрогетерогенной. Характерной особенностью гидрофобизованных пород является специфическая матричная (микро)трещиноватость, которая кардинально отличается от тектонической и литогенетической трещиноватости. Особенно ярко она проявляется в гидрокарбопелитовых породах

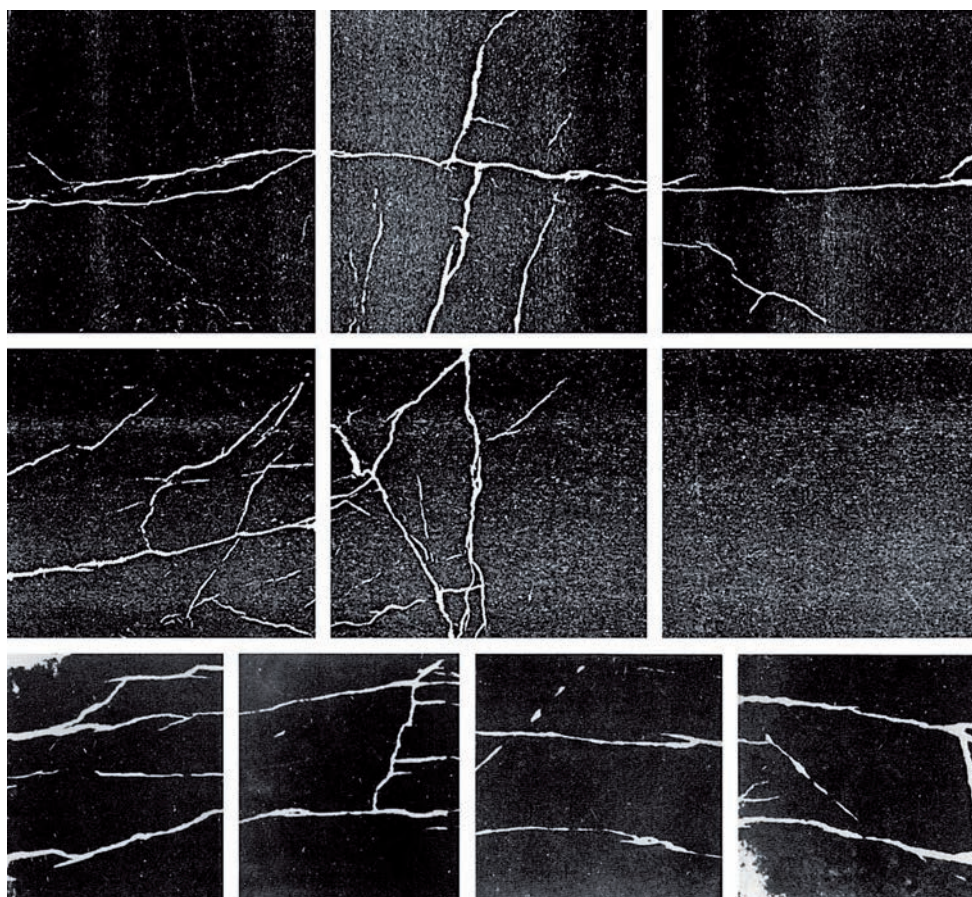


Рис. 8. Дилатансионная палеосейсмогенная открытая (микро)трещиноватость в депрессионных темноцветных пелитоморфных породах-гидрокарбопелитах нижнего карбона (XIIa, XIII м.ф.г.) (по А. Е. Лукину). Фото (микроскоп «Neophot») образцов, насыщенных люминофором, в ультрафиолетовом свете.

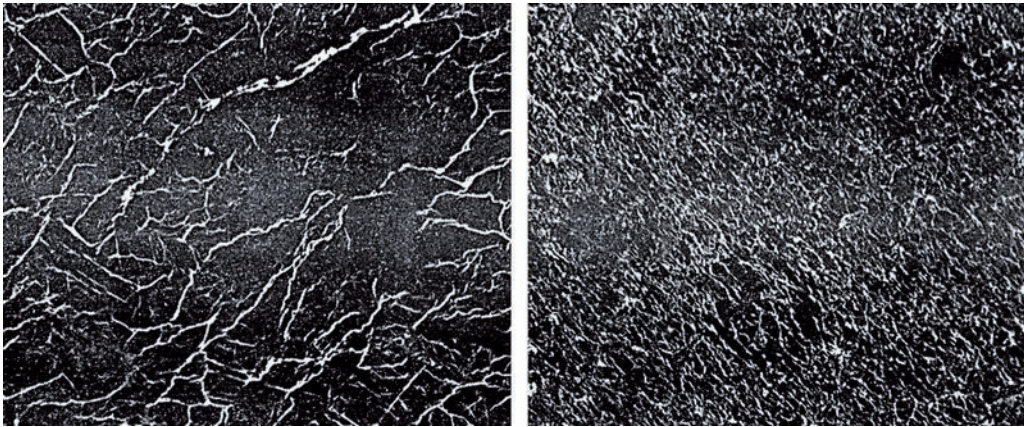


Рис. 9. Хаотическая открытая микротрещиноватость в доманиките (черном сланце), обусловленная накачкой углеводородов в гидрофобную матрицу (физико-химическое трещинообразование) (по А. Е. Лукину). Фото (микроскоп «Neophot») образцов, насыщенных люминофором, в ультрафиолетовом цвете (ДДВ, скв. 18-Руденковская, инт. 4856—4858,2 м, верхний турне).

(доманикоидах, баженитах, черных сланцах), где наряду с (палео)сейсмогенной трещиноватостью (рис. 8) присутствует хаотичная микротрещиноватость (рис. 9), формирование которой обусловлено нагнетанием углеводородов в гидрофобизованную микропористую породу [Лукин, 2011]. Большую роль при этом играет имманентный накоплению гидрокарбонатных отложений эвксинского типа режим повышенной сейсмичности, индикаторами которого являются турбидиты, подводно-оползневые текстуры и приуроченная к изохронным уровням трещиноватость характерной морфологии [Большаков, 1989]. При этом наблюдается ее пространственно-временная связь с очагами матричной хаотичной трещиноватости (см. рис. 9). Это позволяет предположить, что, помимо обусловленной указанными физико-химическими факторами перманентной накачки углеводородов в гидрофобную (суб)капиллярно-пористую породу [Лукин, 2011], определенную роль играют сейсмoeлектрические явления. Еще в классических исследованиях Я. И. Френкеля, первооткрывателя сейсмoeлектрического эффекта, было установлено, что при землетрясении в области фронта ударной волны в осадочной толще возникают импульсные вариации электрических полей, обусловленные нарушением (вследствие

встряхивания) равновесия двойного электрического слоя в капиллярных каналах. Это инициирует различные электрокинетические явления, в частности электроосмос — движение флюидов, заполняющих капиллярные поровые каналы. При этом сейсмичность воздействует на гидрофильный и гидрофобный капиллярно-поровый коллектор по-разному [Большаков, 1989; Лукин, 2013]. В гидрофильном коллекторе это способствует просачиванию углеводородов сквозь капиллярный барьер и утечке их из резервуара, тогда как в гидрофобном, наоборот, происходит нагнетание нефти и газа в капиллярные и субкапиллярные поры. Благодаря этому перманентные «фоновые» накачки углеводородов в гидрофобную малопроницаемую породу в пределах ТД интенсифицируются, приобретая импульсный характер (возможно также наличие импульсов углеводородной накачки в гидрофобные коллекторы, связанные с приливно-отливными напряжениями).

Трубы дегазации как зоны диапиризма. Как уже отмечалось, диапиры зачастую являются важнейшими элементами субвертикальных зон потерь сейсмической информации, которые можно рассматривать как сейсмические образы ТД (рис. 10). Как известно, общая теория явлений диапиризма в стратиферо отсутствует. Нет

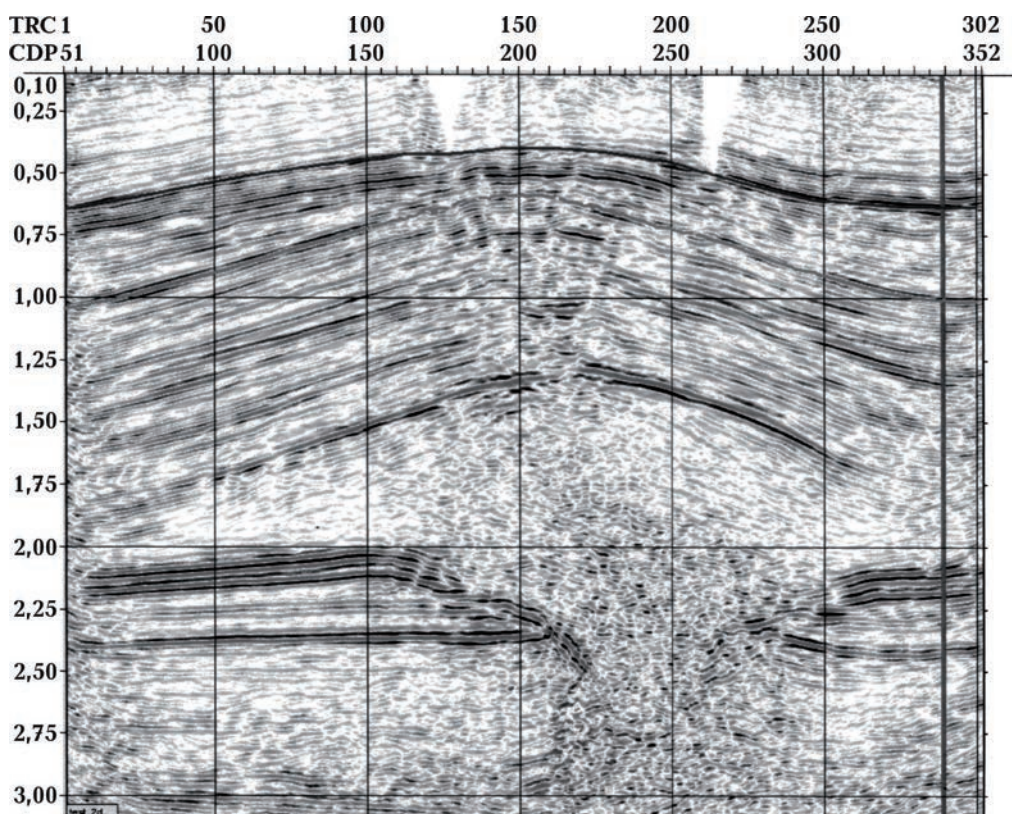


Рис. 10. Чутовско-Беляевский соляной диапир (сейсмический разрез).

общепринятых представлений о природе гигантских (высотой до 8—10 км и более) соляных диапиров (юго-восток ДДВ, (рис. 11), Прикаспийская впадина и др.). Дискуссионными являются представления о причинах и механизмах грязевого вулканизма. Одни исследователи связывают соляной галокинез, глиняный диапиризм и грязевой вулканизм с энергетическими ресурсами осадочного чехла и саморазвитием осадочных бассейнов. Другие считают, что корни гигантских соляных диапиров находятся в мантии. Тем не менее, *не вызывает сомнений связь диапиризма с ТД. Именно они, в сочетании с определенными формационными особенностями бассейна, определяют уровни заложения, пространственно-временную локализацию и характер развития диапиризма, конкретные особенности морфологии диапировых тел.* Их ведущая роль в иницировании, пространственно-временной локализации и развитии наиболее ярко выраженных соляных диапиров и грязе-

вых вулканов обусловлена, во-первых, повышенной проницаемостью (наличие ослабленных зон и каналов), во-вторых, динамически напряженным состоянием и, в-третьих, особой ролью высокоэнтальпийных глубинных флюидов. Именно они являются основным фактором того спонтанного «возбуждения» и разуплотнения, которое является причиной грязевого вулканизма и обычно связывается с энергетическими ресурсами самого осадочного бассейна и процессами диагенеза — раннего катагенеза [Иванов, Гулиев, 2002; Гулиев, 2004]. Об универсальном характере механизмов явлений глиняного и соляного диапиризма и иницирующей роли глубинных флюидов свидетельствуют данные литогеохимического анализа соляного диапиризма [Лукин, 1997, 1992; Лукин, Гончаров, 2015].

Соляные диапиры как трубы дегазации. Солянокупольные структуры характеризуются большим морфогенетическим разнообразием. Формирование большин-

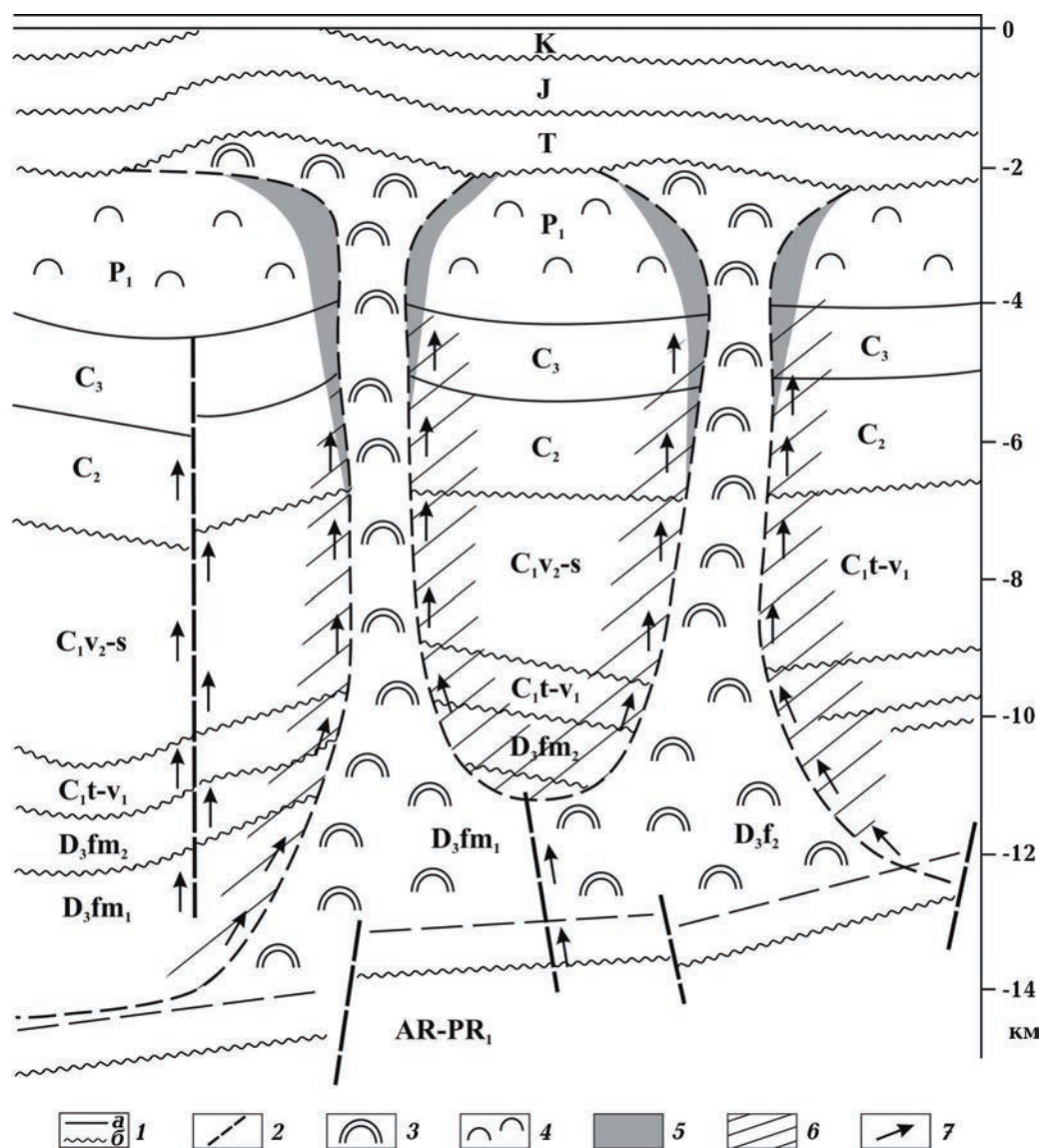


Рис. 11. Гигантские (высотой до 8–10 км и более) соляные диапиры (юго-восток ДДВ): 1 — основные стратиграфические границы (а — согласные, б — несогласные); 2 — разрывные нарушения; 3 — соляные штоки; 4 — пластовая нижнепермская соль; 5 — травертины; 6 — зоны дробления; 7 — глубинные инверсионные воды.

ства из них находит удовлетворительное объяснение с точки зрения теории галокинеза (работы F. Trusheim, С. Talbot, F. Lotze, Ю. А. Косыгина, В. Е. Хаина, Р. Е. Айзберга, Р. Г. Гарецкого, В. С. Журавлева, Г. А. Беленицкой, Х. М. Соколина, И. Г. Баранова, А. А. Билька, И. В. Галицкого, В. И. Китыка, В. Д. Когана, А. М. Чернякова, В. И. Созанского, Д. П. Хрущова, С. Б. Шехуновой и др.). Это относится к основной части широкого диапазона галокинетических образований: от соляных подушек до крупных соляных диапироидов — куполов, в раз-

личной степени дислоцирующих вмещающие породы, пликативно деформирующих перекрывающие слои (солянокупольные антиклинали, приштоковые мульды). Исключение составляют гигантские диапиры, соляные «ядра протыкания» которых перфорируют надсолевые отложения и выходят на разные стратиграфические и гипсометрические (вплоть до земной поверхности) уровни. Невозможно объяснить их формирование в свете традиционных галокинетических представлений (течение соли под давлением нагрузки или

тектонического сжатия). Это не согласуется ни с энергетикой процессов внедрения соляных масс, перфорирующих мощный (толщиной, достигающей в крупнейших соленосных осадочных бассейнах 10 км и более) осадочный чехол (с признаками интенсивной дезинтеграции пород кристаллического фундамента и промежуточного комплекса), ни с характерными временами их непрерывно-прерывистых восходящих движений. Для выяснения роли эндогенных факторов диапириобразования необходимо привлечение методов литогеодинамического анализа. В частности, важными литогеодинамическими индикаторами [Лукин, 1997] являются разнообразные по составу, структуре и текстуре грубообломочные образования, частично или полностью изолирующие соляные ядра диапиров. Согласно общепринятым представлениям они связаны с пассивным накоплением различных по составу (ангидриты и гипсы, известняки, доломиты, мергели, черные сланцы, диабазы и др.) включений вследствие избирательного растворения соли при выходе купола или штока в зону активного водообмена. Типичные кепроки («каменные шляпы»), перекрывающие апикальные части соляных штоков, имеют несомненно такой остаточный характер. Наиболее показательны в этом отношении кепроки соляных куполов Мексиканского залива, которые характеризуются в целом слоистым строением и определенной последовательностью слоев (внизу ангидрит и гипс, переходящие в пористый известняк с проявлениями нафтидов и самородной серы) [Планета..., 2004]. Такие образования характерны и для ряда соляных штоков ДДВ (Роменский, Исачковский и др. [Китык, 1970]). Однако помимо кепрока на контакте соляных тел и вмещающих отложений присутствуют и совершенно другие образования: травертины [Лукин, 1992], разнообразная гидротермальная минерализация [Китык и др., 1981; Шумлянский, Безуглая, 1995] и брекчии дробления [Лукин, 1997], которые, судя по габитусу и минеральному составу обломков (с признаками

высокоэнталийно-флюидной обработки), а также минералого-геохимическим особенностям матрикса, не могут быть отнесены к кепрокам. Условия их залегания и соотношения с соляными штоками позволяют рассматривать их как литогеодинамические индикаторы наиболее загадочной и, в то же время, наиболее важной для понимания данного феномена стадии заложения и «начального импульса» соляного диапиризма. Последний приобретает, таким образом, значение важнейшего показателя аномально повышенной энергетики глубинных недр, в связи с чем весьма знаменательной является приуроченность гигантских соляных диапиров к расположенной над наиболее геодинамически активным сегментом плюма области максимальных диапазонов нефтегазоносности, проявлений глубинной гидрогеологической инверсии, экстремальных пластовых геотермодинамических показателей, разнообразных геофизических и геохимических аномалий.

Последующее развитие соляного диапиризма характеризуется разнообразными проявлениями процессов ГДЗ. Наряду с взрывными брекчиями в приштоковых зонах отмечена гидротермальная полиминеральная (карбонатная, сульфидная, твердобитумная, силикатная, фосфатная, кварцевая) минерализация со свинцово-цинковым, медным, ртутным, урановым, редкометальным оруженением. Наряду с пароксимальными взрывными выбросами суперглубинных флюидов и импульсной разгрузкой гидротерм соляные диапиры являются также каналами миграции газообразных углеводородов, CO_2 , водорода и гелия, радона, паров ртути. Они фиксируются как по данным геохимической эманационной съемки, так и по скоплениям газов в приштоковых терригенных и карбонатных коллекторах. О тесном переплетении углеводородной и углекислой дегазации свидетельствуют, в частности, данные по нефтегазоносности приштоковых зон на юго-востоке ДДВ. Здесь в области развития гигантских соляных диапиров (высотой более 10 км, протыкающих

всю осадочную толщу до подошвы пермтриасовых красноцветов) в приштоковой зоне одного из них — Чутово-Белуховского соляного вала — более 40 лет назад были открыты Чутовское и Новоукраинское газоконденсатные месторождения. Они сразу же привлекли внимание чрезвычайно высокими дебитами в отдельных скважинах (до $10,3 \cdot 10^6$ м³/сут.), необычной морфологией резервуаров и ранее неизвестным генетическим типом карбонатных коллекторов. Последние представлены в основном массивными пористыми (пористость по керну варьирует от 12 до 32 %) желтовато-серыми, желтовато-коричневыми, розовато-серыми известняками и доломит-известковыми породами (изменение окраски обуславливает их своеобразную слоистость, несмотря на массивное сложение). Они слагают дайкообразные и клиноформные тела, экранлируемые солью штока и его козырька, а также замещающими их при удалении от штока нормально-осадочными раннепермскими отложениями (пластовая соль, ангидриты, плотные карбонаты и глины) (рис. 12).

Характерной особенностью этих литологических (с элементами тектонического экранирования) массивных залежей является сочетание значительной (до 400 м, возможно и более) высоты с небольшой (менее 1000 м) весьма изменчивой шириной. При этом высота залежи лимитируется преимущественно характером бокового противоштокового литологического замещения. В строении резервуара такого типа намечается две части: верхняя — клиноформно-пластовая и «корневая» — дайковая. Верхняя часть замещается (на разном расстоянии от штока) раннепермскими соленосными отложениями, причем замещение это носит преимущественно конседиментационный характер. Узкая (первые сотни метров и менее) «корневая» часть, которая, по-видимому, может опускаться на значительные глубины, относительно картамышских и каменноугольных отложений носит секущий «интрузивный» характер. В состав верхней части, наряду с

карбонатами, входят также несортированные неслоистые полимиктовые обломочные отложения делювиального облика, которые состоят из разнообразных обломков палеозойских и, возможно, более древних пород глубокозалегающих комплексов (диабазы, спилиты, сицилиты, аргиллиты, черные сланцы, кварцито-песчаники и ангидриты), а также кварца и полевых шпатов. Эти делювиальные шлейфы соляных диапиров обычно интерпретируются как результат нижнепермского растворения и размыва загрязненной большим количеством терригенного материала девонской соли при конседиментационном росте штоков во время раннепермского осадконакопления.

Роль этих делювиально-обломочных отложений в приштоковых разрезах варьирует в широких пределах. Так, на Распашновском месторождении, тоже расположенном в зоне обрамления Чутово-Белуховского соляного вала, они преобладают, играя здесь роль основных коллекторов. На Новоукраинском и, особенно, Чутовском месторождениях их роль незначительна, и коллекторами являются преобладающие в приштоковых разрезах вышеописанные пористые карбонаты. Последние местами содержат неравномерно распределенную примесь обломочного материала (диабазы, спилиты, сицилиты и др.). Все это послужило основанием отнесения приштоковых карбонатных коллекторов к делювиально-шлейфовым отложениям. Однако данные изучения их вещественного состава опровергают версию обломочного происхождения пористых карбонатов. Их основная масса, судя по данным электронно-микроскопических исследований, состоит из явно хемогенных зерен кальцита, формирующих высокопористый ажурный агрегат известково-туфового облика [Лукин, 1992]. Встречаются спорадические скопления оолитов и псевдооолитов, вышеуказанных обломков, а также ромбоэдры доломита, микрокристаллические сростки вторичного кварца, пирит и т.д. Таким образом, в целом это не обломочные, а явно хемогенные породы.

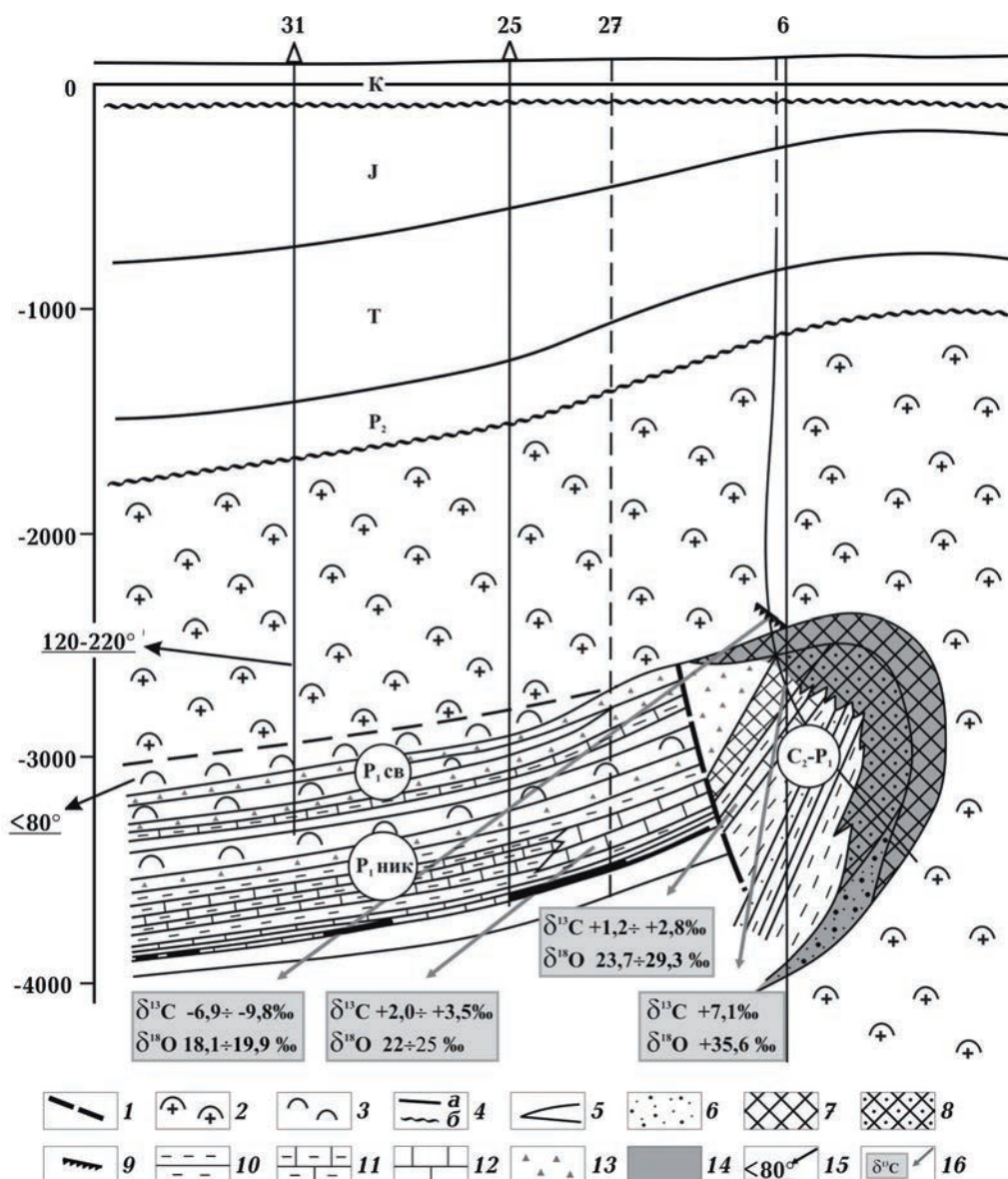


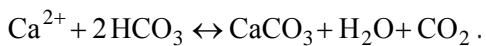
Рис. 12. Морфогенетические особенности соляных диапиров юго-восточной части Днепровско-Донецкой впадины (по А. Е. Лукину). Геолого-литологический разрез Чуговского месторождения: 1 — разрывные нарушения; 2 — соляной шток; 3 — пластовая соль; 4 — стратиграфические границы (а — согласные, б — несогласные); 5 — конденсатно-газовые залежи; 6 — несортированные карбонатно-песчано-грубообломочные образования типа «приштоковых шлейфов»; 7 — хемогенные травертиноподобные высокопористые карбонаты; 8 — хемогенные травертиноподобные высокопористые карбонаты с обильным обломочным материалом; 9 — прожилки с гидротермальным сульфидно-карбонатным оруденением; 10 — глинистые породы; 11 — глинисто-карбонатные отложения; 12 — доломиты; 13 — ангидриты; 14 — газоконденсатные залежи в доломит-травертиновых приштоковых резервуарах; 15 — температуры гомогенизации ГЖВ в кристаллах галита; 16 — изотопный состав углерода и кислорода карбонатов.

Еще меньше оснований считать эти массивные карбонатные тела своеобразными приштоковыми органогенными постройками, а тем более рифами. Как уже отмечалось, они характеризуются почти полным отсутствием органических остатков (если

не считать крайне редких прикрепленных фораминифер широкого вертикального распространения, а также цианофитов в виде спорадических микроклубков, наряду с оолитами и псевдооолитами) и возможной ролью бактерий. Абиогенный характер их

основной массы не вызывает сомнений. Однако, несмотря на явную хемогенность, их нельзя отнести и к обычным карбонатным эвапоритам, чему противоречат как условия залегания, так и необычно высокая пористость, не свойственная микрозернистым известнякам и доломитам.

По своему «туфоподобному» габитусу, вещественному составу и текстурно-структурным особенностям, условиям залегания и морфологии это — типичные травертины, формирующиеся, как правило, в результате разгрузки глубинных углекислых вод при сдвиге вправо (вследствие резкого снижения P_{CO_2}) известной реакции (наряду с кальцием, в зависимости от конкретных гидрохимических условий травертинообразования, может фигурировать и магний):



Независимым подтверждением их травертиновой природы является аномально тяжелый изотопный состав. Значение $\delta^{13}C$ достигает +7,1 ‰, а значение $\delta^{18}O$ колеблется от 29,5 до 35,6 ‰ (определения выполнены И.П. Луговой на масс-спектрометре МИ-1201в в ИГФМ АН Украины; изотопный анализ карбонатного кислорода дан относительно международного стандарта SMOW с точностью $\pm 0,4$ ‰, карбонатного углерода — относительно международного стандарта PDB $\pm 0,3$ ‰). Близкие величины $\delta^{13}C$ (от +5,5 до +14,6 ‰) характерны для современных и плиоцен-четвертичных травертинов Кавказа, Камчатки, Средней Азии, Восточно-Африканской рифтовой системы и др. [Галимов, 1973]. Что касается аномально тяжелого состава кислорода, то это также свойственно травертинам в зонах рифтогенеза. Так, травертины Восточной Африки характеризуются значениями $\delta^{18}O$ до 33,5 ‰ [Восточно-Африканская..., 1974]. Аномально тяжелый изотопный состав травертинов, кроме фракционирования, обусловленного общеизвестными специфическими механизмами их формирования [Friedman, 1970], возможно, объясняется и аномальной изотопной

утяжеленностью углекислоты глубинных вод. Это, по данным Г. И. Войтова и других исследователей, характерно для CO_2 грязевых вулканов, а соляной тектогенез в ДДВ характеризуется некоторыми проявлениями признаков грязевого вулканизма [Лукин, 1971]. Все вышеизложенное согласуется с другой примечательной особенностью геохимии этих карбонатных образований — аномально высоким (по сравнению с обычными известняками и доломитами вмещающих отложений) содержанием ртути и бора [Лукин, 1989].

Таким образом, конседиментационная раннепермская активизация соляного диапиризма, ярко проявляющаяся в распределении мощностей и фаций асельско-раннесакмарского солеродного бассейна ДДВ, сопровождалась разгрузкой глубинных углекислых источников. Пересыщение вод этого аридного бассейна по отношению к карбонатам кальция и магния вызвало интенсивное травертинообразование в непосредственной близости от соляного вала, вследствие чего и сформировались сложнопостроенные приштоковые пористо-карбонатные тела. Такое истолкование их природы не только позволяет объяснить все непонятные с точки зрения обычных седиментационных механизмов (эвапоритовый, кластический, биогенный) карбонатообразования литологические и геологические особенности, но и дает основания для прогнозирования разнообразных (куполо-, покрово-, дайкообразных) (палео)травертиновых резервуаров в зонах разломов и крупных соляных штоков. Это является основанием для выделения совершенно нового типа нефтегазового карбонатного коллектора. Связанные с ним залежи углеводородов нетрадиционного типа могут пользоваться широким распространением в рифтогенных, окраинно-континентальных, при- и внутриорогенных бассейнах. С этой точки зрения аномально высокие (до $10,3 \cdot 10^6$ м³/сут.) дебиты, полученные из этих коллекторов на Чутовском и Новоукраинском месторождениях, представляются весьма знаменательными.

Необходимо подчеркнуть и общегеологическое значение открытия древних (раннепермских) травертинов. Прежде всего, это первое достоверное свидетельство процессов не просто древнего (доплиоцен-четвертичного), но палеозойского травертинообразования. Кроме того, травертины — это яркий геодинамический индикатор (признак активного разломообразования и других глубинных процессов). С этой точки зрения их связь с огромными соляными диапирами представляет первостепенный интерес для выяснения закономерностей формирования и развития последних. Наконец, это прямое свидетельство участия глубинных углекислых флюидов в процес-

сах хомогенного карбонатообразования в рифтогенных бассейнах.

Тесная связь процессов ГДЗ с диапиризмом заключается не только в том, что диапировые структуры (соляные купола, глиняные и карбонатные диапиры, грязевые вулканы) являются пассивными каналами дегазации. Наблюдается более глубокая взаимосвязь диапиризма и ГДЗ, энергетика которой (внедрение высоконапорных высокоэнтальпийных глубинных флюидов) является главным фактором диапиризма. Последнее относится не только к «горячему» и «холодному» (грязевому) вулканизму, соляному и глиняному диапиризму, но и к разуплотненным блокам

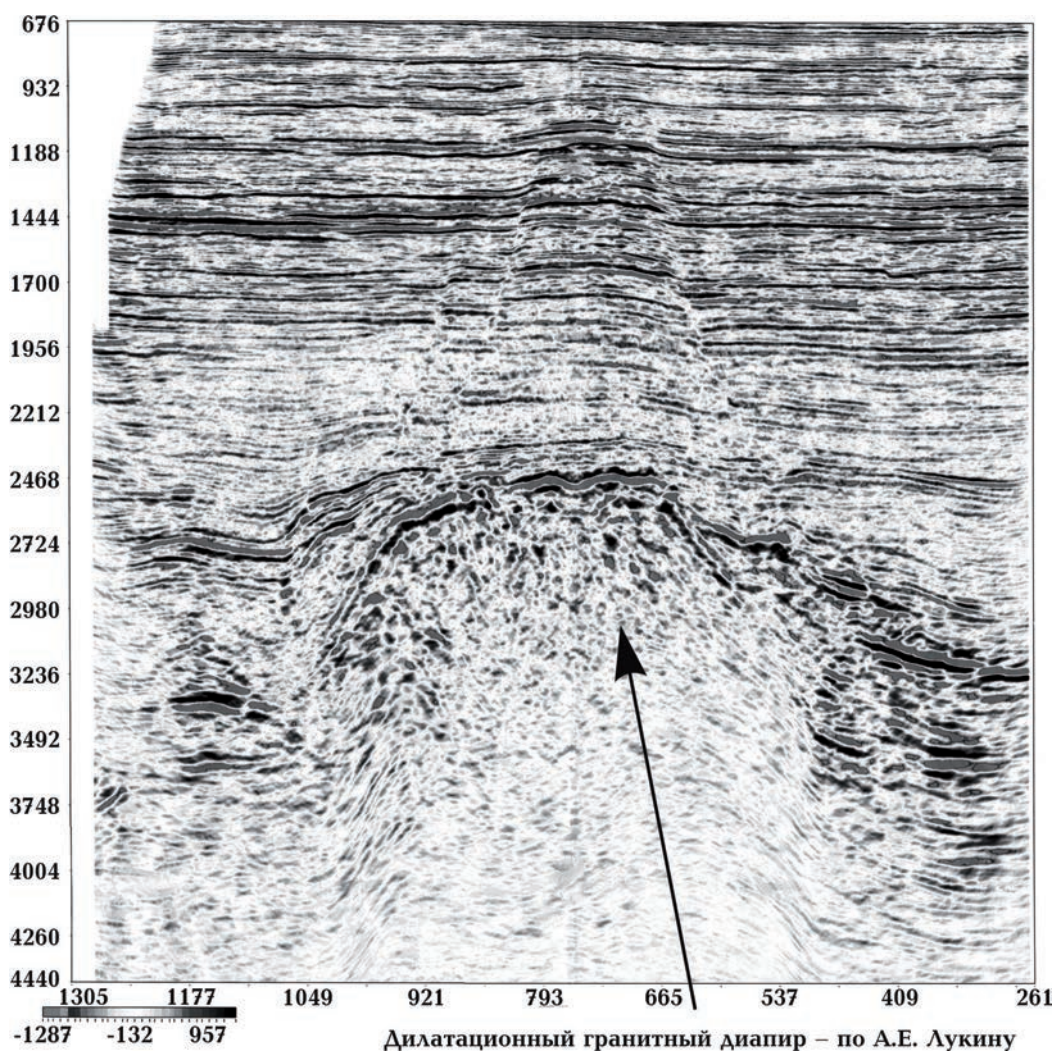


Рис. 13. Нефтяное месторождение Белый Тигр (Вьетнамский шельф Южно-Китайского моря). Характер разуплотнения пород кристаллического фундамента Центрального свода и его соотношения с другими сейсмофациями кристаллического фундамента и осадочного чехла.

разновозрастного кристаллического фундамента. Ярким примером такого протрузионного диапиризма является уникальное нефтяное месторождение Белый Тигр на южновьетнамском шельфе (рис. 13).

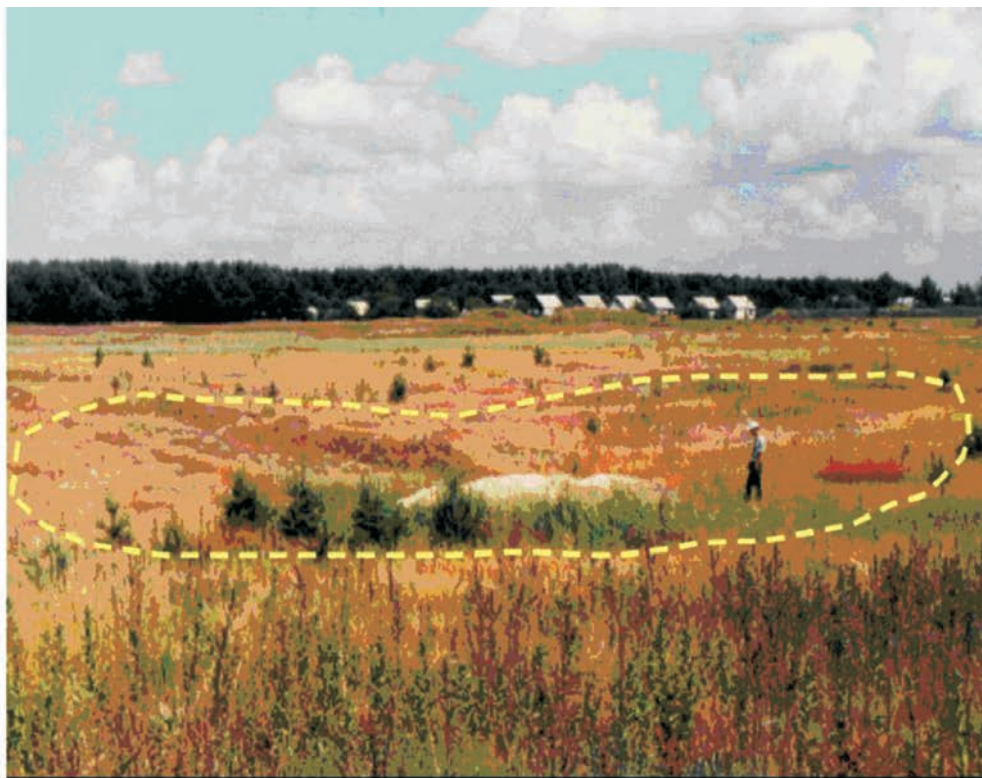
Наряду с широким признанием идей плюм-тектоники [Хаин, 2003; Планета Земля, 2004] существует мнение о том, что это — артефакт, обусловленный сейсмическими шумами [Kerr, 2006]. Поэтому столь важно подтверждение реальности существования плюмов и связанных с ними ТД первого порядка независимыми друг от друга эмпирическими данными. Возможность такого независимого подтверждения участия мантийной струи в формировании уникального нефтяного месторождения Белый Тигр появилась благодаря изображениям скоростного строения мантии Юго-Восточной Азии, включая нефтегазоносный южновьетнамский шельф Южно-Китайского моря, полученным методом сейсмической томографии [Старостенко и др., 2011]. Такие нестационарные сверхглубинно-флюидные процессы должны многообразно проявляться в скоростной структуре мантии. Связанная с высокой скоростью восходящего движения плюма адиабатичность флюидного процесса (доказательство — формирование пригожинитов и возникновение гигантской нефтяной залежи в разуплотненных кристаллических породах) свидетельствует о теоретической возможности его отражения на мантийных скоростных колонках. Эксплозивная природа возникновения газового плюма позволяет ожидать, что его прохождение сквозь мантию будет сопровождаться зонами сжатия и растяжения. В скоростной характеристике мантии эти зоны должны проявляться как субвертикальные области последовательностей высоко- и низкоскоростных аномалий — последствия флюидного процесса в неоднородной скоростной среде (так называемые мантийные скоростные колонки). Следовательно, по данным сейсмомографии можно рассматривать последствия прошедшего флюидного процесса в скоростной среде, что показано в работе

[Старостенко и др., 2011]. В сочетании с явлением зараженности пород в пределах ТД частицами самородных металлов, сплавов, а также карбидов и силицидов, с учетом современных данных петрологии и геохимии (включая изотопно-геохимические показатели) это убедительно свидетельствует об участии в процессах ГДЗ суперглубинных флюидов и подтверждает связь плюмов со слоем «D» и внешним ядром.

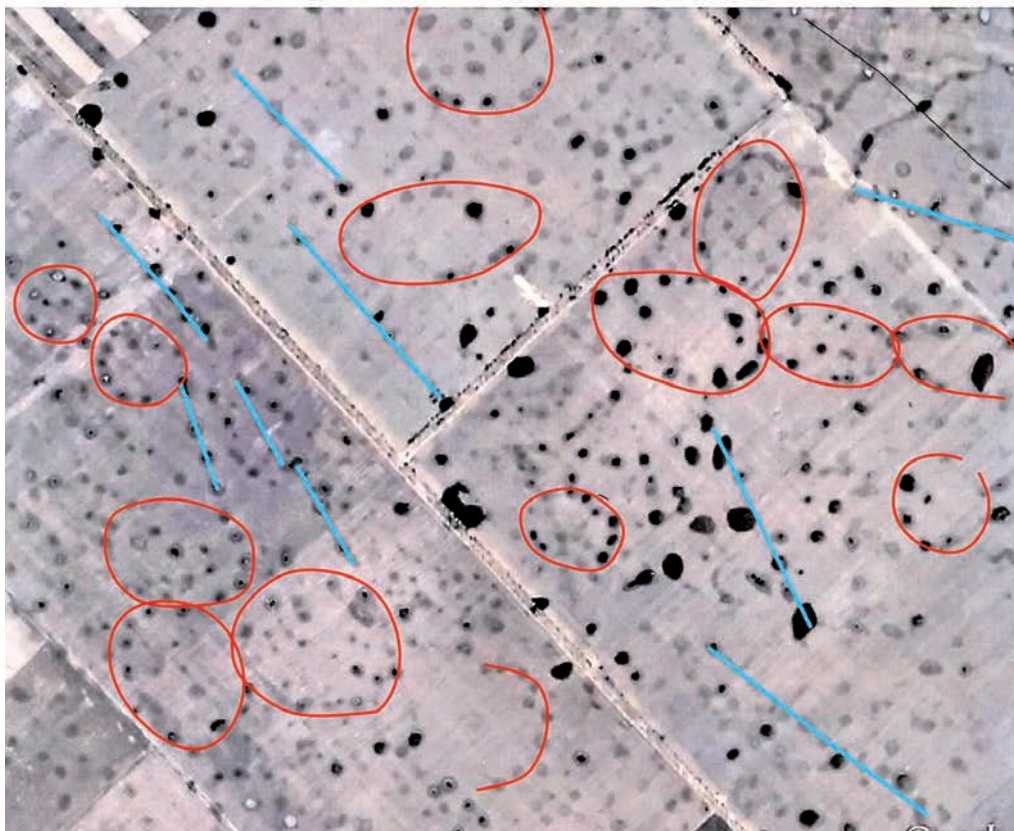
Особенности верхнего этажа дренажной системы ГДЗ. К настоящему времени сформировались представления о функционировании сложнопостроенной иерархической системы поверхностно-приповерхностной дегазации [Шестопапов, Макаренко, 2013, 2014; Шестопапов и др., 2018]. Если «горячая» дегазация проявляется в виде вулканов, то «холодная» имеет разнообразные формы проявлений — грязевые вулканы, западины — подзападинные каналы, линейные зоны, массовые проявления в эпицентральных зонах землетрясений, скрытая дегазация, приуроченная к кимберлитовым трубам, диапирам, погребенным палеовулканическим структурам, рифтовым зонам, рассеянная микродегазация.

В периоды штатных (некатастрофических) проявлений вулканизма «холодная» дегазация вследствие повсеместного проявления является преобладающей. Многочисленными исследованиями выявляются глубинные (мантия, «слой D», внешнее ядро) и приповерхностные источники газообразования (почвенный слой, осадочная толща пород, верхняя кора) [Judd, Hovland, 2007; Шестопапов, Макаренко, 2013, 2014].

В геологических структурах, имеющих глубинные корни, глубинная составляющая дегазации является преобладающей либо значимой. Дегазация, как и другие процессы, подвержена циклическим изменениям активизации различной периодичности. Амплитуда проявлений циклов и их длительность связаны с взаимодействием Земли с другими космическими объектами, тектоноклиматическими процессами разной периодичности и интенсивности (от тектономагматической активизации,

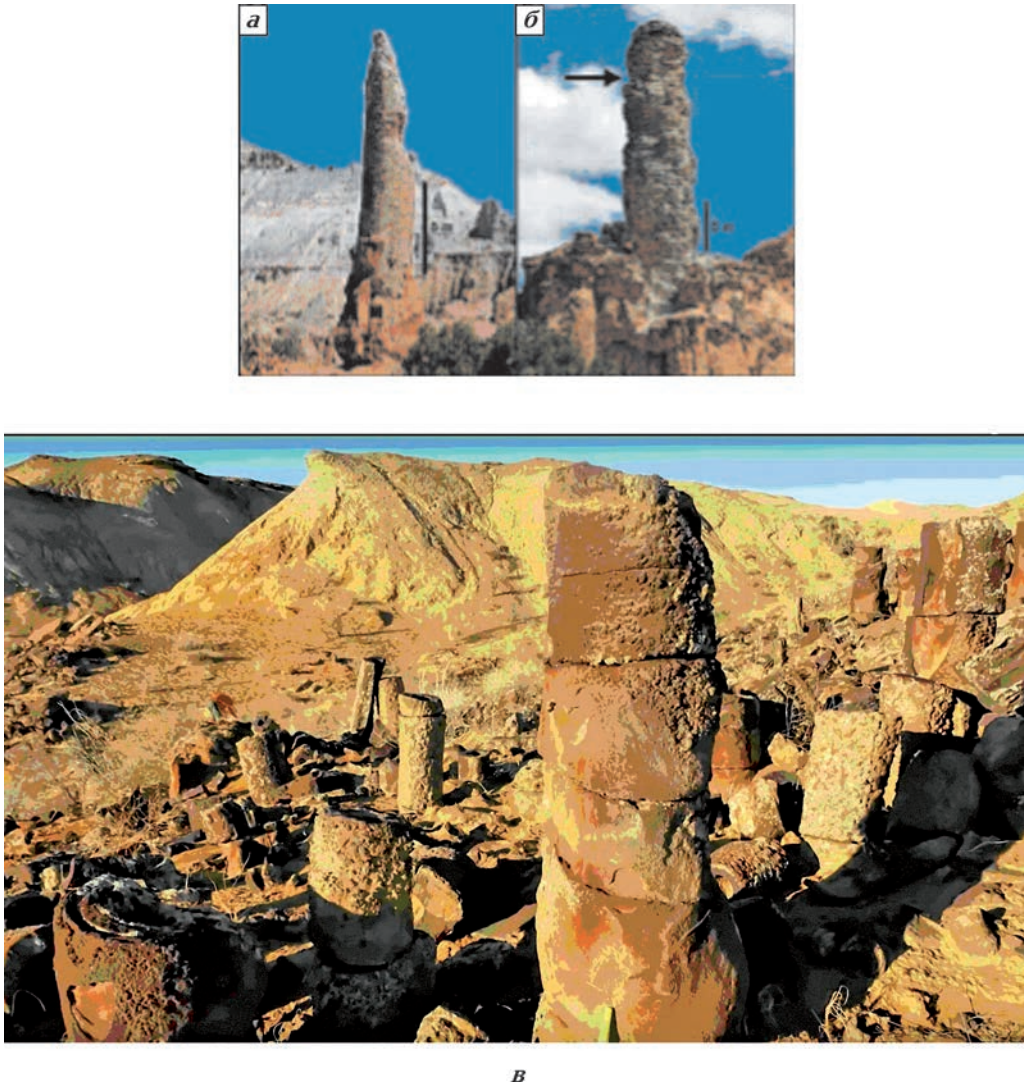


а



б

Рис. 14. Западины на местности: а — общий вид западины; б — западины на космоснимке образуют кольцевые и линейные цепочки.



В

Рис. 15. Труба, колоннообразная интрузия с вмещающей породой Jегb-часть песчаников Entrada Sandstone — Gunsight Butte Member, присутствующей в основании трубы (а) и в виде колоннообразной интрузии с вмещающей породой Jегb в основании (б). Обратите внимание на тонкий/перистый край. Обломки Jс (отложения Carmel Formation) присутствуют в верхней части трубы (показаны стрелками) [Ross et al., 2014]; в — каменные трубы в пустыне Кызылкум. Вид с близкого расстояния (одноименный фильм Н. В. Ларина, 2016 г.).

смены периодов оледенений планеты до штормовых возмущений, приливов и отливов, аномальных градиентов атмосферных давлений) [Judd, Novland, 2007; Шестопалов и др., 2018]

Широкое развитие получили исследования микрогеодинамических форм рельефа на суше и в море — блюдец, западин (рис. 14), rockmarks и т. п. [Larin et al., 2015; Moss, 2010; Шестопалов, Макаренко, 2013]. Активно применяемые в морских акваториях сейсмические исследования позволили выявить под этими морфо-

структурами массовые проявления потери сигналов, имеющие вертикальную вытянутость и интерпретируемых как каналы дегазации [Pilchen, Argent, 2007; Cathles et al., 2010; Loseth et al., 2011; Moss, 2010]. На суше таких исследований меньше, но и здесь выявляются подобные каналы [Нежданов, Смирнов, 2014; Тимурзнев, 2013; Шестопалов, Макаренко, 2013; Larin et al., 2015; Zgonnik et al., 2015]. В результате в Украине, России, США установлено, что, как минимум, часть широко распространенных на равнинных территориях запа-

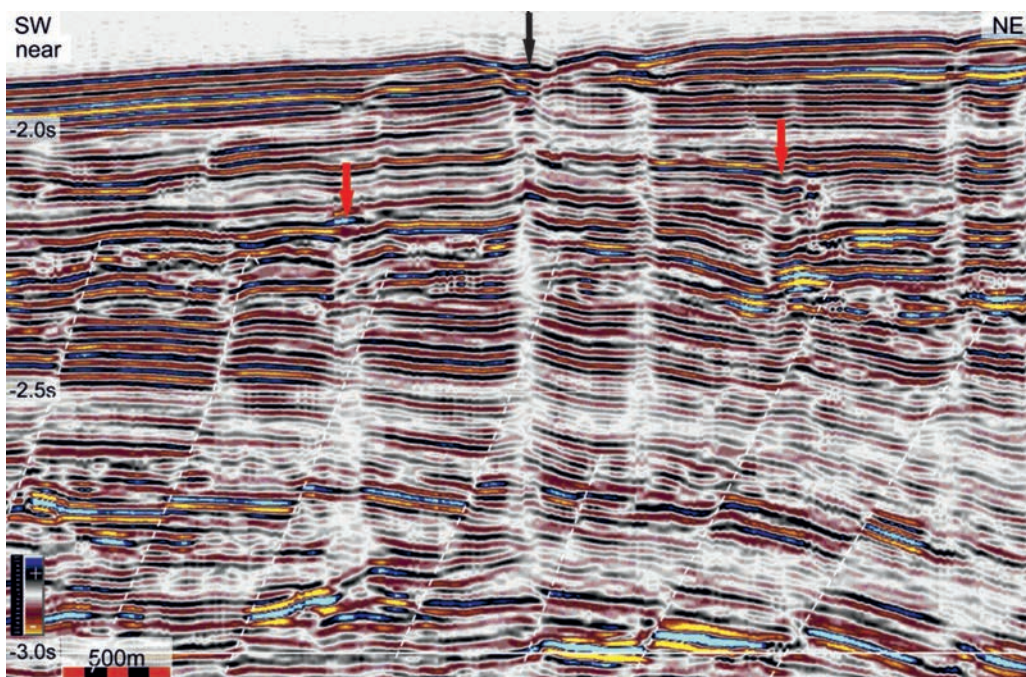


Рис. 16. Сейсмический профиль с выявлением подзападинных (черная стрелка) и слепых (красные стрелки) каналов дегазации [Loseth et al., 2011].

гин имеют уходящие на глубину каналы, по которым осуществляется anomальная дегазация рагона, торона, водорода, метана и других газов. В благоприятных геологических условиях установлена связь западин с разломно-трещинной системой территорий [Шестопалов и др., 2018]. Функционирование элементарных каналов дегазации верхнего этажа подтверждается не только фактом anomальной дегазации через западины (rockmarks в морских условиях) и геофизическими данными, но и выявленными в различных местах планеты палеотрубами (Гиблартар, Прибалтика, Татарстан, Западная Сибирь, район Варны в Болгарии, в штате Юта в США, в пустыне Кызылкум и др.) [De Boever et al., 2006; Югович, Кетрис, 2011; Ross et al., 2014; Шестопалов и др., 2018] (рис. 15).

Их изучение показало, что в зависимости от P , t условий, состава флюидной смеси и прорываемых пород, диагенетические и метасоматические преобразования внутри ТД могут быть весьма различными — от образования внутренней пустотности и формирования стенок труб, весьма отличающихся от окружающих пород по

прочности, минеральному составу, пористости, проницаемости, характеру цемента, до полной цементации полости трубы, резкого уменьшения ее фильтрационных свойств, роста прочности. В результате они перестают быть проводящими системами [Шестопалов и др., 2018].

Наблюдения в морских условиях и на суше свидетельствуют о спокойном и взрывном проявлении дегазации. В первом случае при относительно низких, хотя и anomальных P , t характеристиках истечения газа процесс окисления минеральных компонентов пород восходящими восстановленными газами с образованием воды и других компонентов осуществляется постепенно, формируя пористую (трещинную) структуру канала дегазации и блюдцеобразную форму проседания поверхности. Во втором случае при резком возрастании давления в газо-флюидной смеси, спровоцированным, например, землетрясением либо при наличии изолирующих покрышек и постепенном накоплении давления выше литостатического, происходит прорыв вышележащих пород (изолирующей покрышки) и взрывной

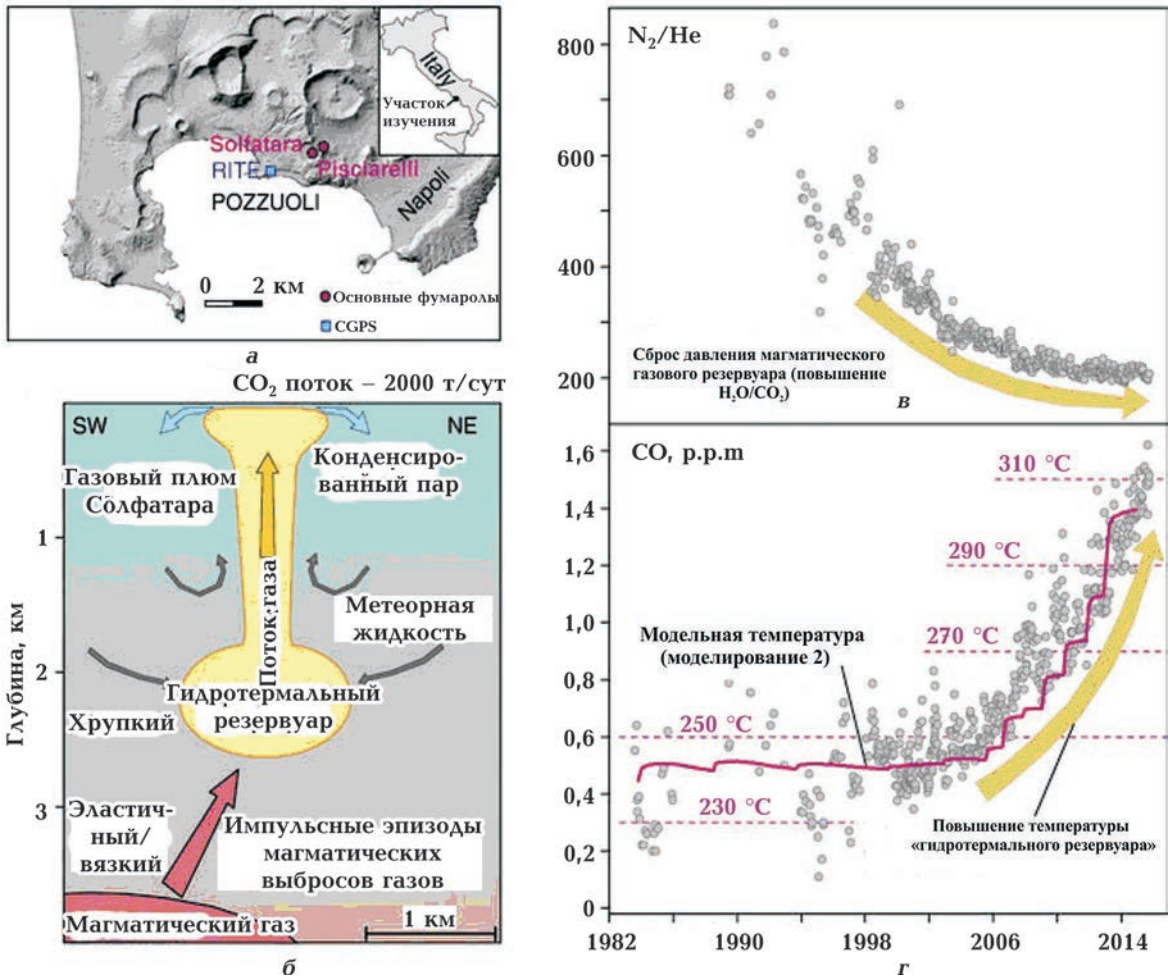


Рис. 17. Супервулкан в Италии (Флегрейские поля). Объяснение в тексте [Chiodini et al., 2016].

выброс газо-водно-обломочной (либо сыпучей, грязеподобной) смеси. Взрыв провоцируется образованием гремучей смеси восходящего водорода либо водородно-метановой смеси и кислорода воздуха. В результате образуются кратеры различных размеров, которые в условиях суши под влиянием экзогенных процессов преобразуются в пологие блюдца, западины, чаши озер.

При полном затухании дегазации западины перекрываются более молодым осадочным материалом, который может впоследствии прорываться на новом этапе дегазации (рис. 16). На суше отмечаются процессы затягивания западин сносимым материалом.

Становится все более ясным, что широко встречающиеся на равнинных тер-



Рис. 18. В Антарктиде обнаружен 91 вулкан (см. текст).

риториях системы «западина — подзападинный канал» — это сложные, длительно существующие микроструктуры, имею-

щие во многих случаях глубинное заложение и достаточно длительную историю формирования на основе пульсирующих процессов взаимодействия глубинного вещества и энергии с приповерхностными системами.

Учитывая весьма широкое распространение этих систем на освоенных человеком территориях, риски, связанные с их активными фазами формирования и развития, вызывают необходимость тщательного и всестороннего изучения этих весьма специфических образований.

Поэтому на фоне возможного генетического разнообразия западин первоочередной задачей является выявление и изучение распространенности и степени активности западин с глубинными корнями. Но выполнить эту важнейшую задачу можно лишь на основе комплекса современных методов изучения, включающих сейсмические исследования, газовую съемку, специальное изучение эпигенетических изменений пород западин, выявление территориальных группировок западин, особенностей их конфигурации, обусловленной глубинными геодинамическими процессами, флюидной восходящей миграцией и др.

Намечается связь между геодинамической активностью геологической структуры и ее флюидонасыщенностью (содержанием флюида в г/м² территории). Согласно представлениям, изложенным в работе [Киссин, 2009], средняя флюидонасыщенность геологических структур возрастает следующим образом: щиты (10^7 — 10^8), древние платформы (10^8 — $n \cdot 10^8$), молодые платформы ($n \cdot 10^8$ при $n > 5$), краевые прогибы ($n \cdot 10^9$). Безусловно, эти средние оценки не исключают проявления аномальных показателей в зонах глубинных разломов, активизированных интрузией, жерлах палеовулканов, диапиров, шовных зон крупных структур, рифтовых зон и т. п. Так, древние структуры Кольского полуострова характеризуются аномальной газонасыщенностью и дегазацией по сравнению с некоторыми более молодыми структурами. Повышенное количество восстанов-

ленных глубинных газов и, прежде всего, водорода обнаружено в Криворожском железорудном бассейне [Войтов, 1971], при проходке сверхглубокой скважины СГ-8 на Украинском щите [Курлов, 2003].

Согласно результатам исследований В. Л. Сывороткина [Сывороткин, 2002], мощнейшим глобальным сосредоточением глубинной дегазации, проявляющейся над поверхностью Земли, является система современных рифтов (так называемых «срединно-океанических» хребтов), субмеридионально разделяющая планету на несколько сегментов и сходящаяся в области полюсов. Вторым гипераномальным проявлением дегазации служат эпицентрально-центральные зоны крупнейших землетрясений и центры современного вулканизма, (особенно в пределах таких «горячих точек», как Гавайский архипелаг, имеющий сверхглубинные корни, достигающие «слоя D''» и внешнего ядра).

В целом, в земной коре сформирована разветвленная сеть дегазационных путей и приемников, состоящая из различных по сечению и глине вертикальных и субвертикальных трубоподобных и линейных относительно аномальных по проницаемости образований, соединяющей латеральные пласто- и линзообразные флюидоприемники различных размеров по простиранию и мощности. [Гуфельд, 2007; Корчин, Бурт-ный, 2011; Шуман, 2013; Шестоплоав и др., 2018]. В их системе могут находиться отдельные очаги магмообразования, размеры и активность которых зависят от интенсивности и P, t параметров флюидопотока и других факторов. Эти очаги вследствие активного воздействия на окружающие породы являются, по сути, более мощными генераторами энергии, чем разломные зоны и латеральные образования, разнообразия газообразных, жидких и твердых продуктов взаимодействия. Они продуцируют интенсивное образование многостадийных (от высоко до низкотермальных) восходящих гидротермальных шлейфов вплоть до верхней коры, включительно.

В верхней части верхней коры в связи с общим ростом ее проницаемости и от-

носительного увеличения количества индивидуальных проницаемых путей происходит дробление и нарастание плотности каналов дегазации к поверхности Земли. Их поверхностные проявления разнообразны — от взрывных мощных кратеров до проявлений нагрева почвы и грунтовых вод. Несмотря на несопоставимо меньшую удельную (на единицу площади проявления) интенсивность этой рассеянной дегазации по сравнению с вулканической, спрединговой, рифтовой, но учитывая эффект соотношения площадей их проявления, можно с уверенностью предполагать, что вклад рассеянной дегазации в общую дегазацию Земли должен быть существенным в периоды штатной (некатастрофической) дегазации всей системы, характерной для современного этапа ее функционирования.

Оценка роли рассеянной дегазации в общей дегазации, как и уточнение всего объема дегазации планеты — задача будущего. Но уже сейчас можно утверждать, что рассеянная дегазация — важнейший объект изучения для решения ряда теоретических и прикладных задач.

Геолого-геофизические предпосылки выделения зон современной активизации и аномальной ГДЗ в Украине. Знания о местоположении и степени интенсивности проявлений современной аномальной дегазации в земной коре представляют интерес не только в связи с теоретической оценкой их активности и частоты встречаемости. Они предопределяют скопления различных полезных ископаемых и экологические проблемы, возникающие на современном этапе геологической истории. Как известно, дегазационные процессы в земной коре характеризуются повышенными P , t параметрами, обуславливают гидротермальную и метасоматическую переработку породного массива. Значительный привнос в зоны активизации глубинного материала и соответствующее минералообразование нередко имеют промышленное значение.

Дегазационные процессы, как уже отмечено, являются основополагающими в

нафтидогенезе. При этом было установлено, что практический интерес в этом отношении могут представлять не только бассейны осадочных отложений с хорошо выраженными ловушками, но и отдельные структуры кристаллического фундамента, в пределах которых не только выявлены проявления нафтидов, но и эксплуатируются десятки месторождений.

В последний период времени все чаще обращается внимание на возможность прямой добычи из недр глубинного водорода в качестве весьма эффективного энергетического ресурса и для других целей. Собранные в мире (и Украине) фактические данные, разрабатываемые на их основе и в различной мере подтвержденные гипотезы о роли водорода в геологических процессах, свидетельствуют о перспективности этого направления исследований прежде всего в зонах современной активизации.

Экологические аспекты этой проблемы весьма разнообразны и обширны. Они охватывают огромный круг вопросов — от влияния дегазации на плодородие почв, безопасность жилых помещений, до опасностей газового взрыва особо ответственных объектов, возникновения озоновых дыр, влияния дегазации на климат, массового поражения в результате вулканических извержений, имеющих дегазационную природу.

Исходя из изложенного, представляется целесообразным рассмотреть критерии выделения зон активизации и хотя бы в предварительной общей постановке (с использованием данных из различных направлений геолого-геофизических исследований) возможное местоположение в Украине зон современной активизации и относительно более интенсивной, чем на смежных территориях, глубинной дегазации. Безусловно, на достигнутом этапе исследований речь может идти в основном о предположительных местах современной аномальной дегазации, которые в будущем, по мере восстановления в стране нормального процесса геологических исследований, должны быть изучены.

На текущем этапе изучения с учетом

рассеянной дегазации можно выделить следующие признаки зон современной активизации ([Гордиенко и др., 2005, 2011, Куприенко и др., 2010] с добавлениями [Шестопапов и др., 2018]):

1) аномалии теплового потока интенсивностью 10 мВт/м² и более;

2) пониженные скорости распространения продольных сейсмических волн в коре и верхней мантии;

3) проводники в консолидированной коре и верхней мантии с величиной суммарной продольной проводимости, превышающей обычную для неактивизированного платформенного региона;

4) отрицательные гравитационные мантийные аномалии интенсивностью более 20 мГал, а также субвертикальные зоны аномально пониженной плотности пород в плотностных моделях;

5) сокращение мощности коры до величин меньше нормальных (для значительной части Украины — 42,5 км) и поднятие слоя Мохо, значительные перепады глубин залегания слоя Мохо;

6) наличие землетрясений (в основном коровых);

7) поднятие поверхности Земли за последние 3 млн лет (условно принято на 25 и более метров);

8) нефтегазоносность в осадочных и кристаллических образованиях (рассеянная и сосредоточенная в месторождениях, проявлениях);

9) высокая насыщенность водоносных горизонтов водородом;

10) наличие специфической минерализации в породах зон разломов и вблизи них с возрастными оценками до 5 млн лет (в частности, обогащенность пород частями самородных металлов, их сплавов);

11) наличие жерл палеовулканов (особенно толеитовых), кимберлитовых трубок, ультраосновных, щелочных, магматических интрузий, диапиров, в различной мере сохраняющих системы проницаемости и следы активизации;

12) аномальные относительно фона значения соотношения $^3\text{He}/^4\text{He}=\text{R}$ или ^3He ;

13) гидрохимические аномалии: а) ин-

версия химического состава и минерализации в глубоко залегающих водоносных горизонтах, б) гидрохимические аномалии специфического состава в зонах разломов;

14) проявление АВПД в нефтегазоводонасыщенных системах;

15) гипогенные особенно сквозьформационные карстовые каналы;

16) распространение микрогеодинамических зон с признаками современной активизации (западины на равнинных территориях с подзападинными каналами со следами газового воздействия на биоту, иных проявлений газовой активности, линейменты в пределах расчлененного рельефа с аналогичными признаками);

17) взрывные проявления дегазации (образование воронок, кратеров);

18) грязевые вулканы;

19) распространение поверхностных («спокойных») проявлений дегазации (водород, гелий с аномальным R, метан, сипы в морских условиях и др.);

20) локальный разогрев грунтовых вод, возгорание почв, растительности.

В этом перечне пункты 1—6 отражают наиболее вероятные геофизические показатели активизации, пункт 7 является органографическим показателем (по Артюшкову и др. за последние 5 млн лет это около 90 % территории суши), пункты 8—15 свидетельствуют о флюидной активизации, проявляющейся в геологических структурах и породах, водоносных горизонтах, пункты 16—20 являются прямыми и косвенными показателями проявления дегазации на поверхности, однако степень их глубинности должна быть изучена дополнительно.

Анализ фактических данных по приведенным признакам показывает, что геофизические показатели активизации, базирующиеся на региональных исследованиях, в связи с недостаточной плотностью наблюдений и сложностью их интерпретации на достигнутой стадии изученности в основном используются для создания предположительной картины распределения территорий активизации. Кроме того, зоны активизации, выявленные этими методами, могут не совпадать

с данными, полученными другими методами. Дело в том, что дегазация может осуществляться по узким разломным (трещинным) либо точечным каналным путям, фиксируемым геофизическими методами в основном при детальном специальном изучении. Региональные теплофизические исследования в значительной мере направлены на выявление медленно распространяющихся процессов кондуктивного теплопереноса и вызываемых им эффектов. Тем не менее был, например, выполнен детальный анализ тепловых аномалий [Гордиенко, 2001; Гордиенко и др., 2002; Усенко, 2002], связанных с киммерийской и современной активизацией в Донбассе и на УЩ. Получены следующие параметры гидротермальных систем, связанные с конвективным флюидным переносом: глубина проницаемой зоны разлома — от первых сотен метров и больше, проницаемость — около $5 \cdot 10^{-13} \text{ м}^2$, глубина подошвы конвертирующего слоя — около 6 км и более, время стабилизации теплового поля — 30—70 тыс. лет. В работе [Bachler et al., 2002] для Рейнского грабена получены практически аналогичные значения: ширина проницаемости зоны — 200 м, глубина подошвы — 5,5 км, проницаемость разломной зоны — $5 \cdot 10^{-13} \text{ м}^2$, время стабилизации теплового поля — 77 тыс. лет. Таким образом, при соответствующей детальности измерений теплового поля аномалии активизации, вызванные конвективным тепломассопереносом восходящими флюидами от магматических очагов, могут быть идентифицированы уверенно.

Сопоставление принятого орографического признака активизации и проявлений поверхностной дегазации показывает, что эти проявления распространены в пределах территорий с минимальным высотным положением дневной поверхности. Поэтому принятый выше орографический признак является достаточно консервативным.

Для подтверждения реальности западных и линейных показателей активизации необходимо выявление современной аномальной дегазации и подтверждение

наличия подводящих каналов, дополнительные оценки их глубинности с применением геофизических методов и изучения режима пульсационной дегазации.

В условиях реальных территорий перечисленные признаки активизации и дегазации изучены лишь частично либо только обозначены. Поэтому даже их рассмотрение в комплексе по существу является в основном постановкой задачи.

В пределах УЩ в значительной мере по сумме геофизических признаков активизации наиболее четко выделяется Кировоградская аномалия, расположенная между Кировоградским и Криворожско-Кременчугским разломами [Гордиенко и др., 2005]. По другим оценкам [Пашкевич, Бакаржиева, 2016] в этой зоне следует обратить внимание на Ровненское поле, расположенное рядом с трансрегиональной зоной роздвига Херсон—Смоленск, узел пересечения ограниченных разломами «трасс» роев даек Субботско-Мошоринскую и Боковянскую.

Весьма перспективны для исследований газовые проявления, выявленные в пределах Новоукраинского плутона на урановом месторождении НовоCONSTАНТИНОВСКОГО РУДНОГО ПОЛЯ [Лукин, Юзленко, 2011, Старостенко и др., 2014, 2015]. По нашему мнению, здесь может быть открыто месторождение принципиально нового типа — водородно-углеводородное, либо даже водородное [Шестопалов и др., 2018].

Существенный интерес представляют Ингулецко-Криворожская и Голованевская шовные зоны, соседствующие с Ингульским мегаблоком [Старостенко и др., 2002, 2007; Ентин, 2005; Гинтов, 2014]. Температурная аномалия земной коры на глубине 2,5 км фиксируется не только в южном направлении, но и в северо-западном, где она образует Днепровскую аномальную зону (по линии Канев — Киев) с возможным частичным плавлением в коре ($T \geq 600 \text{ }^\circ\text{C}$) [Гордиенко и др., 2005] и проявлением местной сейсмичности. Активизация также проявляется в субмеридиональных зонах Западно-Приазовского и Орехово-Павлоградского разломов, а

также на стыке Подольского и Волынского блоков [Корчин, Буртный, 2011].

Изучение теплового поля Донбасса [Усенко, 2002] показало, что его аномалии вытянуты вдоль основных складчатых разломных зон на расстоянии до 140 км при ширине всего от 4 до 20 км. Установлены зоны частичного плавления в верхней мантии и магматические очаги в средней части коры. Они обеспечили избирательное проникновение расплавов гранодиоритового состава по зонам разломов и дальнейший восходящий флюидный (в том числе газовый) тепломассоперенос. Эти результаты согласуются с модельными аномалиями электропроводности и гравитационными данными. Фактические измерения по высокой газонасыщенности подтверждают эти выводы [Анциферов и др., 2009].

В пределах ДДВ имеется значительный комплекс признаков современной активизации и установленной либо предполагаемой активной дегазации. К ним относятся локальные аномалии теплового поля с размерами $5 \times (1,5-2)$ км, приуроченные к местным, в основном, поперечным разломам, совпадение расположений отрицательных аномалий гравитационного поля, положительных аномалий теплового поля и месторождений газа [Гордиенко, Усенко, 2003; Гордиенко и др., 2007], многочисленные участки АВПА, гидрогеологические инверсии и аномальные значения $^3\text{He}/^4\text{He}$. К перспективным для изучения дегазации следует также отнести участки контактов солевых диапиров с вмещающими породами. Наибольшее сосредоточение проявлений упомянутых проявлений сосредоточено в пределах Полтавского блока ДДВ [Оровецкий, Коболев, 2006].

Система многочисленных разломов мантийного и корового заложения диагонального и ортогонального простираний в пределах Волыно-Подолыи выявлена благодаря геофизическим исследованиям и во многих местах отпрепарирована эрозией речной сети, хорошо проявляющейся благодаря значительному подъему рельефа этого региона. Геофизическими методами выявлены также локальные районы активизации — Черновицкий, Тернопольский, Локачинский [Гордиенко и др., 2011].

К перспективным для выявления аномальной дегазации следует отнести проявления глубинного гипогенного карста [Шестопапов и др., 2018].

Особо следует выделить подземную многокилометровую мощную систему гипсового карста Приднестровья [Климчук, 2017], погребенный карст в девонских отложениях в междуречье Западный Буг—Стырь, предполагаемый сквозьформационный гипогенный карст долины Днестра, меловой карст озер и речных воронок Волыни. Интерес могут представлять и контуры погребенных жерл палеовулканов [Шестопапов и др., 2018].

В Карпатском регионе, в его северной части, интерес представляют Бильче-Волицкая и Бориславско — Покутская зоны [Сучасна..., 2015]. В Закарпатье поверхностные проявления активизации связаны с Выгорлат-Гутинской грядой, солевыми диапирами, Закарпатским и другими разломами.

Наиболее достоверные аномалии теплового поля на глубинах 25 и 50 км, кроме указанных выше территорий, отмечаются также южнее Ингульского мегаблока в районе Николаева и Херсона, в украинской части Добруджи, в Степном Крыму и в восточной части Керченского полуострова [Гордиенко и др., 2004].

Приведенный обзор ГДЗ-ситуации в Украине свидетельствует о том, что проблему активной дегазации в пределах большинства регионов наиболее целесообразно изучать комплексно с выявлением признаков и очагов возможной активизации (комплекс геофизических методов регионального взаимоувязанного полевого изучения и моделирования), орографических и геологических признаков активизации, методов ДЗЗ, газовых, изотопных, гидрогеологических, геодинамических, детальных геофизических показателей дегазации. Несовпадение региональных геофизических построений, с одной стороны (более консервативная оценка), и газовых, микрогеодинамических, гидрогеоло-

гических и др. показателей, с другой стороны, вызывает необходимость, во-первых, выполнения более детальных геофизических исследований, позволяющих выявлять локальные процессы активизации, связанные с конвективным теплопереносом линейной или точечной конфигурации, во-вторых, уточнения источников глубинной дегазации с помощью изотопных исследований, более детального анализа геолого-гидрогеологических условий, выполнения специальных геофизических исследований по выявлению труб и линейных проявлений дегазации и их возможной глубине. Подтверждение, уточнение и углубление полученных региональных исследований целесообразно выполнять на опорных полигонах, обеспечивающих мониторинг дегазации с целью выявления флуктуаций этого процесса во времени, возможность уточнения и расширения набора эндогенных и экзогенных факторов дегазации и ее воздействия на окружающую среду. Особое внимание должно быть уделено изучению возможных проявлений дегазации в пределах кольцевых структур, геофизических аномалий, связанных со структурами палеовулканов, кимберлитовыми трубками.

По-видимому, участки активной дегазации могут быть приурочены не только к местам активизации в коре с предполагаемыми очагами магматизма (прогнозируемыми методами геофизики), но и на более обширных территориях с возможным точечным транзитом флюидов через земную кору из мантии.

Некоторые экологические последствия ГДЗ. Вулканическая дегазация. Прежде всего, следует выделить катастрофические проявления ГДЗ, проявляющиеся в виде аномального по интенсивности и времени функционирования вулканизма. Его проявления приводили к неоднократным глобальным и региональным массовым вымираниям. Эти вымирания вызывались прямыми воздействиями токсичных газообразных и поражающих мелкодисперсных веществ, канцерогенным воздействием, резким изменением климата, уничтожени-

ем важных звеньев пищевых цепей и т. п.

В результате под влиянием ГДЗ происходило освобождение экониш для экспансии выживших видов, а также возникновение и отбор новых видов в связи с мутационными процессами.

Концентрированные проявления ГДЗ создавали также условия аномальной продуктивности и распространения отдельных видов, их воздействия на окружающую биоту. К счастью для человеческой цивилизации глобальные катастрофические вулканические извержения в последние сотни тысяч лет отсутствовали. Однако их угрожающее, хотя лишь региональное или гемисферное воздействие человечество испытывало и оказывалось на грани исчезновения. И связано оно с так называемыми супервулканами, количество которых на Земле, по-видимому, достигает 20. А извергаются они в среднем раз в 100000 лет, хотя фактически эти промежутки времени весьма изменчивы.

Для супервулканов характерно наличие кальдер—концентрических понижений, обусловленных выбросом огромного количества твердого материала и имеющих размеры в поперечнике — десятки километров. Например, размеры кальдер некоторых вулканов составляют: Тоба в Индонезии — 30 на 100 км, Йеллоустон в США — 55 на 72 км, Таупо в Новой Зеландии — 33 на 46 км, Лонг — Велли в США — 20 на 35 км, Айра в Японии — 17 на 23 км.

Извержение супервулкана Тоба на о-ове Суматра в Индонезии 73 тыс. лет тому назад едва не привело к гибели человечества как вида. Считается, что это было одно из мощнейших извержений за последние 25 млн лет. Путем генетических исследований (теория «бутылочно-горлышка») было установлено резкое сокращение человеческой популяции до не более, чем 12 тыс. человек. Геологами и антропологами в дальнейшем было установлено, что этот демографический кризис совпал по времени с суперизвержением вулкана и, очевидно, вызван им. В то время погибло почти все население Южной Азии, около 75 % растительности

Юго-Восточной Азии. Объем выброса пепла, по-видимому, достиг 3000 км^3 [Rampino, Ambrose, 2000].

Согласно исследованию Майкла Рампино из Нью-Йоркского университета, произошло нечто сродни предполагаемой «ядерной зимы», которую можно назвать «вулканической зимой». Три миллиарда тонн сернистого ангидрида, исторгнутого из недр супервулкана, проливалось на землю сернистыми дождями ориентировочно в течение шести лет. Пылевые тучи надолго скрыли солнце и вызвали резкое и продолжительное катастрофическое похолодание.

Учитывая, что супервулканы извергались в геологическом прошлом достаточно часто, их негативное воздействие на существовавшие на момент такого события виды может быть выявлено и эволюционные последствия хотя бы частично исследованы. Вообще по результатам изучения иловых осадков вдоль периметра Тихого океана установлено, что за последний 1 млн лет произошло 91 извержение вулканов, т. е. в среднем через каждые 11 тыс. лет. Наиболее крупные извержения происходили в среднем через каждые 41 тыс. лет. Этот промежуток совпадает с циклическим изменением наклона земной оси, который соответствует одному из циклов Миланковича, влияющему на земной климат.

Нас, естественно, должна беспокоить, прежде всего, угроза будущего ближайшего по времени извержения супервулкана.

В Европе имеется периодически просыпающийся крайне опасный супервулканический феномен. Крупнейшее извержение вулкана около 40 тыс. лет тому назад в районе Флегрейских полей в Италии разнесло пепел от Неаполя до Донбасса и далее на северо-восток. На долгое время в пределах территории Италии и сопредельных районов исчезли следы наших предков *Homo sapiens* и неандертальцев. В 1950 г. были зафиксированы признаки пробуждения этого супервулкана в виде подъема поверхности кальдеры (до 3 м), мелкой и частой сейсмической активности, увеличения гидротермальной дега-

зации (рис.17, а) [Chiodini et al., 2016]. В 1983—1984 гг. отмечались особенно значительный рост количества землетрясений (до 3000 в год) и подъем почвы (до 1,8 м за 2 года). Активность всех этих явлений наблюдается и в настоящее время. Источником упомянутой активности является магматический очаг, установленный на глубине 8 км методом сейсмической томографии. Выполненное в упомянутой выше публикации модельное исследование дегазации системы « $\text{H}_2\text{O}-\text{CO}_2$ — магма», сопоставленное с наблюдениями за фумарольными процессами в течение последних 30 лет, позволило установить импульсный характер декомпрессии магматического очага и выхода парогазовой смеси в расположенную выше активизирующуюся гидротермальную систему (рис. 17, б). Полученное фактическое уменьшение коэффициента N_2/He (рис. 17, в) и возрастание температуры в гидротермальном резервуаре, модельное и фактическое (рис. 17, г), свидетельствуют о нарастающем прогреве системы и увеличивающемся поступлении летучих газов (He) из активизирующегося магматического очага.

Активизация процессов в кальдере в 2012—2013 гг. была изучена с помощью интерферометрии и спутниковых измерений с помощью GPS. В результате был получен вывод о внедрении около $4,2 \cdot 10^6 \text{ м}^3$ магмы на глубину порядка 3 км [D'Auria et al., 2015]. Безусловно, этот результат требует проверки другими методами. Но более 16000 землетрясений и эвакуация десятков тысяч человек из города Pozzuoli могут только усилить тревогу. К этому добавляется нарастающий выброс CO_2 из фумарол, который весьма чувствителен к росту температур. Выполненный анализ соотношения различных газов (H_2 , Ar, CH_4 и др.), а также изотопии водорода и кислорода в воде позволили установить, что в периоды активизации доля магматических флюидов в фумарольных выбросах достигает 0,5 [Caliro et al., 2007]. Полученные данные могут свидетельствовать о нарастающем увеличении восходящего конвективного переноса флюидов при пульсационно

возрастающем давлении в магматическом очаге. Этот очаг, по-видимому, получает периодическую подпитку существенно восстановленными флюидами с высокими P, t параметрами из нижней коры — верхней мантии. Экзотермическое взаимодействие поступающих флюидов с вмещающими породами приводит к дальнейшему разогреву очага и преобразованию флюидов в существенно окисленные с нарастанием объемов CO_2 и H_2O . Результаты моделирования [Chiodini et al., 2016] также подтверждают нарастающий объем выхода парогазовой высокотемпературной смеси из магматического очага, приводящий к дальнейшему разогреву всей гидротермальной системы и, соответственно к разуплотнению и снижению прочности перекрывающих пород.

Сравнение местоположения очагов землетрясений 1983—1984 гг. и 2005—2014 гг. показывает, что исчезновение мелкой сейсмичности на активном участке Solfatara (см. рис. 17, а) скорее всего связано с переходом пород из упругого в пластическое состояние. А это, в свою очередь, свидетельствует о дальнейшем весьма значительном разогреве пород, уменьшении их механического сопротивления и повышении способности к деформированию и разрыву. При этом следует учитывать, что перекрывающие породы представлены неаполитанским желтым туфом, весьма чувствительным к повышению температуры в связи с обогащением его термически неустойчивыми цеолитами. Установлено, что их прочность на разрыв уменьшается вдвое при повышении температуры от 100 до 300 °С.

Конечно, общее развитие системы «магматический очаг — вышерасположенная гидротермальная зона — окружающие породы» может быть осложнено воздействиями, замедляющими либо даже временно прекращающими развитие установленной закономерности. Но в любом случае, пусть с периодическими остановками, вероятный финал этого процесса — вулканическое извержение. Даже, если оно не достигнет масштабов сорока тысячелет-

ней давности, соседство с ним Неаполя с населением в миллион человек (и 4,5 млн чел. в его окрестностях) и несопоставимая с тем далеким прошлым общая плотность заселения других соседних территорий однозначно свидетельствуют о масштабах будущей человеческой трагедии в пределах Италии. А повторение масштабов давнего извержения может стать гибельным для значительной части населения Европы.

В истории известно также разрушительное взрывное извержение вулкана Санторин, которое привело к гибели Мinoйскую культуру на о-ве Крит и разрушительным бедствиям в пределах территорий, окаймляющих восточное Средиземноморье [Bennet, 1963; Galanopoulos, 1964; Нимкович, Хейзен, 1969; De Boer et al., 2004; Геворкян, 2011 и др.]. Вулкан Санторин располагается в пределах дуги спящих вулканов Эгейского моря, в 120 км севернее о-ва Крит. Согласно имеющимся данным возник он в зоне разлома 1,8 млн лет назад, постепенно образовав остров Стронгили. По оценкам мощность взрыва при извержении этого вулкана достигала порядка 200 тыс. атомных бомб, аналогичных сброшенным на Хиросиму. В результате взрывного извержения и выноса огромного объема обломочного материала в XV в. до н. э. на месте этого острова произошел провал объемом более 60 км³ с образованием затопленной кальдеры диаметром более 11 км и глубиной в центральной части до 300 м ниже уровня моря.

Прогнозы, базирующиеся на прошлом опыте и типизации вулканов по характеру извержения, показывают, что извержения таких вулканов засоряют атмосферу аэрозолями на несколько лет. Падение температуры не только предопределяет прямую гибель значительной части растительности, но и приводит к резкому уменьшению испаряемости влаги с поверхности, значительному уменьшению дождей и формированию обширных засух. Возникающие в результате извержений огромные озоновые дыры приводят к поражению биоты ультрафиолетом.

Обсуждаются способы борьбы с вулка-

нической опасностью ([Портнов, 2010; Белов, 2011], сообщения Геологической службы США и др.). В частности, А. М. Портнов считает возможным осуществлять перехват восходящего вулканогенного водорода специальными скважинами глубиной 5—6 км. По мнению специалистов Геологической службы США, скважинные технологии дегазации очага магматизма в связи с высокой температурой и пластичностью раскаленных вмещающих пород, предполагаемым быстрым гидротермальным заполнением полости скважин вторичными минералами, является неперспективным методом.

Действительно, приведенные выше по Флегрейским полям сведения о глубинах формирования магматических очагов, в которых осуществляется окисление значительных объемов поступающего снизу водорода, свидетельствуют о значительно больших глубинах необходимого вмешательства, чем считает А. М. Портнов. Если же учесть, что размеры подводных плюмов и магматических камер составляют километры и десятки километров, то становится очевидным, что скважинные технологии даже без учета соображений специалистов Геологической службы США не могут быть эффективными для перехвата значительных объемов водорода. Но все это лишь означает, что здесь нет простых решений и нужны неотложные активные усилия по разработке эффективных способов изъятия водорода и снятия тепловой энергии из вулканических систем на глубинах основного входа в них восстановленных газов снизу.

Выше упоминались вулканы действующие либо активизирующиеся по данным различных наблюдений. Но мы очень мало знаем о реальном режиме поведения так называемых «уснувших» многочисленных вулканах. Прежде всего, это соседствующие с нами вулканы Кавказа, Рейнской области (на границе Германии, Франции и Швейцарии), Эгейского моря и, наконец, в нашем Закарпатье и в соседних Румынии и Венгрии. Мы также очень мало знаем о глубинных процессах опаснейшего

супервулкана Тоба и других, наземных и подводных, порою неизвестных. Пример возникновения в короткий период нового вулкана в Мексике — Парикутина и «внезапного» (в связи с отсутствием наблюдений) пробуждения ряда уснувших вулканов должны нацеливать нас на более тщательное системное исследование и мониторинг упомянутых выше и других «спящих» феноменов. В подтверждение этой мысли недавно появилось сообщение в интернете [<http://www.theguardian.com/world/volcanoes>] об обнаружении группой ученых из Эдинбургского университета (Robert Binham, Max Van Wyk de Vries et al.) под ледяным щитом Антарктиды 91 ранее неизвестного вулкана. Они расположены, в основном, в прибрежной зоне Западной Антарктической рифтовой системы в полосе длиной 3500 км вплоть до Антарктического полуострова включительно (рис. 18). Планируются дальнейшие исследования по выявлению вулканов в районе моря Росса. В результате Антарктида становится самым насыщенным вулканами регионом (опережает Восточную Африку). Обращается внимание на опасность извержения некоторых из этих вулканов, провоцируемую уменьшением мощности ледового панциря (аналогия проводится с вулканами Исландии и Аляски). Такие извержения могут привести к существенному ускорению таяния льдов Антарктиды с соответствующими мировыми экологическими последствиями.

Разумеется, полученное сообщение вызывает необходимость проведения исследований по состоянию этих вулканов, выявлению, в первую очередь, степени активизации геофизических полей в земной коре и верхней мантии под ними. На наш взгляд, эту важнейшую для экологической безопасности проблему в перспективе следует включать в программы исследований украинских антарктических экспедиций, базирующихся на станции Академик Вернадский, расположенной вблизи Антарктического полуострова.

Подводя итог изложенному беглому обзору экологических последствий изверже-

ний вулканов и прежде всего супервулканов, можно сделать следующие выводы.

1. Иерархия последствий вулканической деятельности на планете Земля охватывает диапазон извержений, обуславливающий весьма значительное вымирание всего живого на Земле (пермская катастрофа), существенные глобальные вымирания (ордовикское, девонское и др.), извержения, имеющие длительные климатические последствия и обуславливающие гемисферные и региональные критические сокращения численности отдельных видов биоты (извержения супервулканов), вулканическую активность, приводящую к региональным или локальным негативным последствиям.

2. Вулканическая деятельность обусловлена процессами дегазации Земли и является природным процессом, **неизбежно периодически активизирующимся**.

3. Развитие человеческой цивилизации, увеличение численности населения на Земле неизбежно будет приводить к росту количества жертв и ущерба от вулканических извержений, к угрозе уничтожения современной технологической цивилизации, либо разрушения значительной части ее основ.

4. Весьма актуальной задачей является совершенствование системы мониторинга, разработка и внедрение новых более надежных способов оценки меры опасности глубинных подготовительных вулканических процессов, выявления конкретных особенностей структуры функционирования каждой вулканической системы от начала подготовки до извержения.

5. Современные подходы к опасности вулканизма для человечества являются достаточно пассивными, как к неизбежному злу. По сути, мы живем по принципу «авось» (авось пронесет).

6. Человечество тратит огромные средства на войны, их подготовку, на различные излишества и не занимается концентрированно изучением и созданием возможности предотвращения вулканических глобальных либо региональных смертельно опасных катастроф.

7. Безусловно, идея предотвращения либо хотя бы минимизации губительных воздействий вулканических извержений может казаться нереалистичной. Однако игнорировать эту угрозу и не предпринимать практически никаких значительных усилий по борьбе с ней — это преступление по отношению ко всему человечеству со стороны наиболее научно и технически вооруженной его части, которая тем самым обрекает себя и все человечество либо значительную его часть на близкую или более отдаленную гибель.

8. **Да, обычными техническими средствами с помощью существующих знаний и умений эту проблему не решить. Но если задачу борьбы с этой смертельной угрозой поставить как глобальную цель, объединяющую значительную часть человечества, мобилизующую интеллектуальные и финансовые ресурсы передовой его части, то со временем она может стать вполне решаемой.**

9. **Среди всех благ, которые предоставила Земля для возникновения и развития жизни, периодически возникает и, что важно осознать, неизбежно реализуется угроза ее частичной или почти полной гибели. Поэтому крайне важно среди массы, межгосударственных, межгрупповых и прочих противостояний и угроз увидеть главные наиболее опасные, смертельные угрозы и при всей сложности научиться им противостоять и, более того, использовать их во благо.**

10. Участки «уснувших» вулканов, разбросанных по всему миру, частично вообще неизвестных, следует выявлять и охватывать детальными геофизическими, вулканологическими, геодинамическими, газово-геохимическими и другими исследованиями и мониторингом с целью оценки их возможной активизации и разработки (при необходимости) защитных мероприятий.

«Холодная дегазация». Среди экологических эффектов ГДЗ прежде всего следует выделить проблему разрушения озонового слоя в атмосфере в результате ГД водорода. В. Л. Сывороткин [Сыворот-

кин, 2002, 2012; Syvorotkin, 2010] обратил внимание на приуроченность периодически появляющихся озоновых минимумов над рифтовыми зонами, горячими точками (Гавайи и др.), очагами крупных землетрясений (2004 г. близ Индонезии), установленными зонами аномальной глубинной дегазации (Кольский полуостров, кимберлитовые трубки Якутии). Особенно устойчивы эти минимумы в зонах крупных рифтов. Среди них выделяется Антарктида, где срединно-океанические рифты образуют сложную циркумантарктическую систему, а также наиболее активный рифт в юго-восточной части Тихого океана.

Озоновый минимум в Антарктиде наиболее устойчив, периодически изменяет свою форму, коррелируемую со сходящимися к югу океаническими рифтовыми зонами. Озоновый минимум над наиболее активно дегазирующим рифтом в юго-восточной части Тихого океана приводит за счет возрастающей солнечной радиации к значительному разогреву океанической воды. В результате формируются мощные тайфуны, явление Эль-Ниньо, вызывающие аномальные наводнения на обычно засушливом тихоокеанском побережье Южной Америки и засухи, пожары на противоположном побережье Тихого океана — в Индонезии и Новой Гвинее.

Разрушение озонового слоя, облегчая проникновение ультрафиолетового излучения на поверхность Земли, обуславливает возрастание его негативных воздействий на биосферу, включая человека. Среди всего разнообразия негативных воздействий следует выделить угнетение иммунной системы и повышенный мутагенез.

В. Л. Сывороткин показал, что по проявлениям озоновых минимумов можно прогнозировать места аномальной водородной ГДЗ.

Упомянутые выше проявления аномальной дегазации в западинах суши и моря, как уже отмечалось [Judd, Hovland, 2007; Ларин и др., 2010; Шестопалов, Макаренко, 2013; Шестопалов и др., 2018], могут приводить к различным негативным

экологическим последствиям. Среди эволюционных постепенных негативных процессов следует отметить разрушения гумуса почв и защитных свойств глинистых грунтов, формирование восходящего гипогенного карста и общее ухудшение инженерно-геологических условий, образование зон аномального проникновения загрязнителей в водоносные горизонты.

Среди известных взрывных, локально катастрофических последствий дегазации следует выделить предполагаемую аварийную ситуацию, возникшую на Чернобыльской АЭС в 1986 г. вследствие комплексного воздействия землетрясения, электромагнитного возбуждения и дегазации [Страхов, Старостенко и др., 1997; Васильев, 2006; Шестопалов, 2016; Шестопалов и др., 2018].

Еще одним заслуживающим внимания (в связи со сходством с событиями на ЧАЭС) не единственным проявлением взрывной дегазации следует выделить события в г. Сасово Рязанской обл. в 1991 г. [Барковский, 2004; Шестопалов и др., 2018]. Мощный взрыв с образованием воронки диаметром 28 м произошел 12 апреля 1991 г. в 1 ч 43 мин на окраине г. Сасово. В результате взрыва куски мерзлой земли (иногда очень крупные, до 1,5 м) были выброшены на расстояние до 300 м. За несколько часов до взрыва наблюдались аномальные оптические явления в атмосфере (огромные яркие белые и красные шаровые молнии, голубые вспышки, свечение над местом будущей воронки). Непосредственно перед взрывом земля задрожала, начались сейсмические толчки, сопровождавшиеся сильным нарастающим гулом. В момент взрыва здания раскачивались, срывались с мест предметы, во многих зданиях были выбиты окна и двери, причем во многих случаях фиксировалось их выпадение наружу. Разрушения носили «пятнистый», локальный характер и непосредственно в районе образования воронки были минимальными. Отмечают явные следы мощных перепадов давлений (срывало крыши домов, крышки люков канализации, лопались лампочки и

другие пустотелые предметы). После взрыва в течение нескольких ночей наблюдалось аномальное свечение над воронкой. С течением времени очертания воронки «оплыли» и сейчас она выглядит как вполне обычное небольшое озеро.

Местность, в которой образовалась Сасовская воронка, представляет собой депрессионную структуру с ровным дном около 1 км в поперечнике. Благодаря тщательным исследованиям, выполненным Е. В. Барковским [Барковский, 2004], стало известно, что Сасовская воронка расположена на пересечении двух разломов (рис. 19). На одном из них в непосредственной близости, примерно в 150 м от главной воронки, обнаружены «два воронкообразных срыва оттаявшего грунта диаметром около 1—2 м и глубиной 0,4—0,5 м». На другом из разломов (направление Сасово—Чучково на рис. 19) на расстоянии 7 км обнаружена еще одна глубокая и узкая воронкообразная структура выброса грунта. Лучи выброса грунта, а также основные разрушения от землетрясения совпадают с расположением разломов.

Судя по нынешнему состоянию значительной части наблюдаемых западин, можно предположить, что их массовое возникновение, возобновление и развитие, обусловленное существенным ростом и проявлением дегазации, связано с деградацией последнего оледенения. Освобождение обширных территорий от давления ледника и деградация многолетней мерзлоты грунтов, игравшей барьерную роль относительно глубинной дегазации, приводили к перераспределению напряжений на пространствах, существенно превышающих ареалы распространения оледенения, к некоторому разуплотнению отложений и увеличению их проницаемости. В дальнейшем периодическая активизация дегазации и развития западин, по видимому, тоже происходила, но она уже не имела такого массового и интенсивного характера [Шестопалов и др., 2018]. Можно полагать, что и после деградации более ранних оледенений возникали наиболее

значительные проявления дегазации, следы которых, вероятно, можно найти в соответствующих по возрасту отложениях. Но, безусловно, существуют и другие причины активизации дегазационного процесса, конкретное обнаружение которых является задачей будущих исследований.

Актуальность учета новой парадигмы в региональном и локальном геолого-геофизическом изучении территорий. Изложенное выше свидетельствует о необходимости существенного совершенствования требований к планомерному геологическому изучению и картированию территорий. Применительно к Украине (но это касается и других стран) к первоочередным задачам геологической службы, научно-исследовательских учреждений НАН Украины, других организаций следует отнести изучение зон предполагаемой современной активизации и возможной аномальной дегазации. Такие выборочные исследования уже на первом этапе позволят выполнить оценку перспектив выявления месторождений полезных ископаемых, сформировавшихся в течение последних 3—5 млн лет на отдельных участках, включая аномальные концентрации водорода, а также хотя бы избирательно, в первом приближении, определить меру экологической опасности дегазации и ее комплексного воздействия вместе с землетрясениями и электромагнитной активизацией.

Этот первый этап избирательного обследования отдельных участков со временем должен перерасти во второй этап регионального изучения территории страны. Дело в том, что геологические съемки М 1:200 000, массово выполненные в 50—60 гг. XX ст., в основном «узаконили» представления о геодинамическом спокойствии в пределах платформ. Подготовленные в 90 годах XX ст. в России и Украине инструкции по организации и проведению геологического доизучения ранее закартированных площадей масштаба 1:200 000 и подготовки к изданию государственной геологической карты этого же масштаба [Инструкция..., 1995, Керівний ..., 1999]

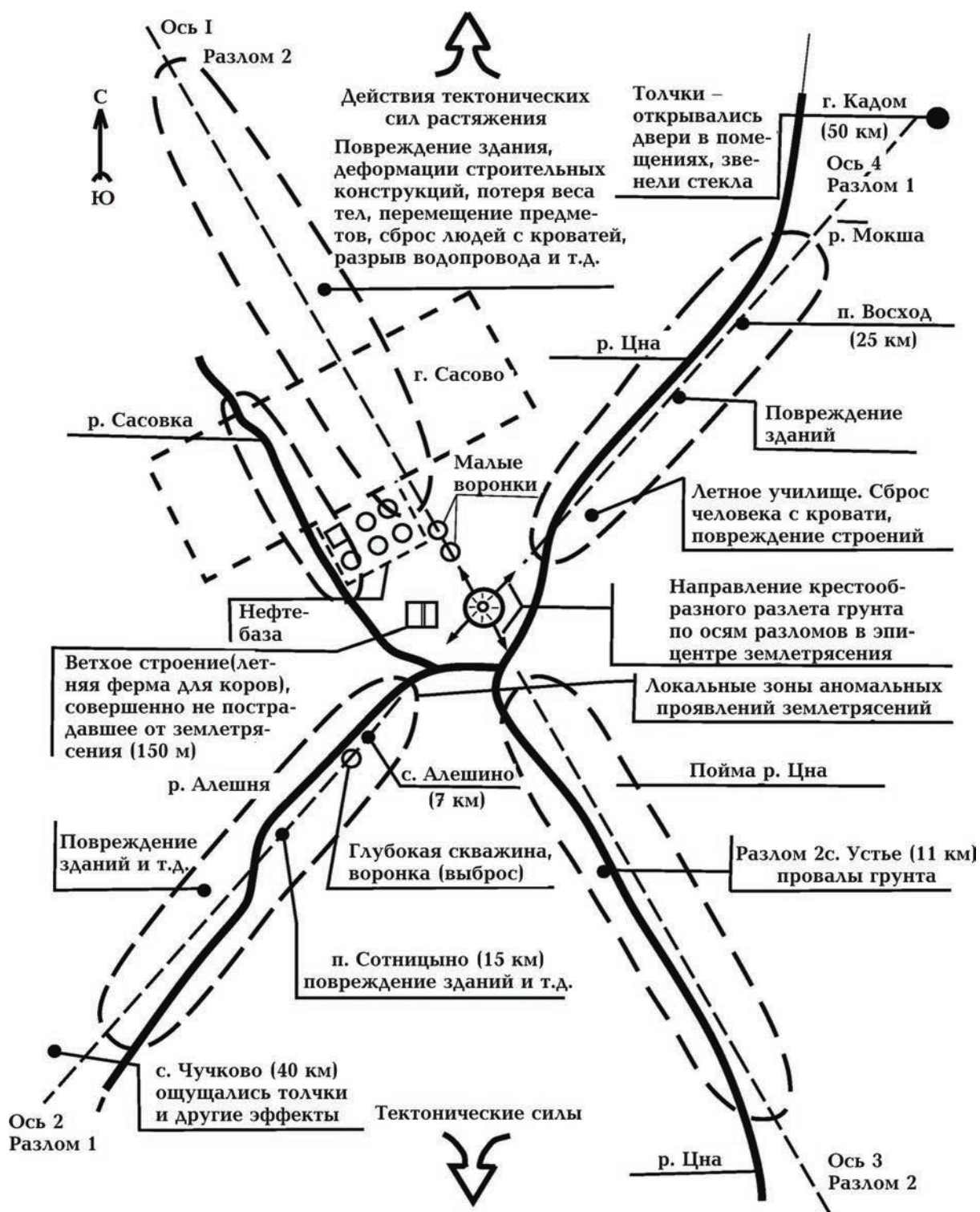


Рис. 19. Карта-схема событий Сасовского взрыва [Барковский, 2004].

были значительным шагом вперед. Они узаконили обязательное использование геофизических методов (прежде всего,

магниторазведки и гравиразведки), геохимических исследований, материалов аэрокосмосъемок, анализа морфоструктур

и эволюции региона на неотектоническом этапе, более полного и всестороннего анализа твердого вещества, включая применение методов изотопии, с целью изучения его генезиса и эпигенетических изменений во времени и многого другого.

Но весьма существенным ограничением этих работ оставалась небольшая глубина изучения и картирования (в основном, сотни метров, для НГБ — несколько больше). Игнорирование дегазации Земли и соответственно плюмтектоники как важнейшей парадигмы эволюции планеты, право на признание которой доказано многими исследованиями, обусловило выпадение из требований инструкции необходимости изучения увязанных между собой сквозьформационных эпигенетических изменений пород, флюидопотоков, дегазации. В частности, о необходимости систематического изучения (не говоря уже о картировании) газов, их разнообразия, концентраций, изотопии, глубинности происхождения инструкция умалчивает. Не акцентируется внимание на все более четко проявляющееся в результатах исследований последних лет определяющее воздействие действительно глубинных процессов на изменения и процессы в верхней части верхней коры как в далеком геологическом прошлом, так и сейчас, так и в ближайшем будущем. В связи с этим представления об активности геодинамических и сопутствующих им процессов в верхней части коры хотя и претерпели положительные изменения, но все еще несут следы прежних взглядов.

Приведенные выше сведения об активности проявлений глубинных процессов в геологической среде свидетельствуют о потере огромного пласта весьма важной геологической информации при составлении региональных геологических карт. Некоторое оправдание такому подходу связано, во-первых, с относительной новизной полученных в последние годы знаний об активном определяющем воздействии глубинных процессов на приповерхностные условия не только в геологическом прошлом, но и сейчас, во-вторых, с доро-

говизной и относительной новизной ряда методов глубинных исследований. Тем не менее, нельзя забывать о том, что распространенные в советское время представления о «спокойствии» геодинамических (сейсмических, тектонических и др.) условий платформенных территорий, реализовавшиеся на всех уровнях геологического картирования, имели существенные негативные последствия, поскольку использовались проектантами таких ответственных сооружений, как АЭС.

В Украине построено и эксплуатируется пять АЭС: Запорожская, Южно-Украинская, Чернобыльская, Ровенская и Хмельницкая. Кроме того, строилась Крымская АЭС и проектировалась Одесская АТЭЦ. Из этих 7 станций — четыре АЭС (Крымская, Одесская, Ровенская, Чернобыльская) размещены в неприемлемых геологических условиях либо были приняты конструкции, неприемлемые для данных сложных геологических условий (Ровенская АЭС). Запорожская АЭС, согласно новым сейсмическим оценкам, расположена в зоне повышенного сейсмического риска [Пристер и др., 2013]. Таким образом, из 7 объектов в пяти (т. е. в 70 %) геологические условия и процессы были оценены неверно. При этом выявленные и предполагаемые риски в районах расположения Чернобыльской, Курской и Калининской АЭС [Шестопапов, 2016], связанные с глубинной водородной дегазацией, существенно повышают значение комплексного изучения глубинной геодинамики каждого региона и пристальной оценки ее воздействия на приповерхностные их проявления в геологической среде. *Попытки проектантов находить площадки для новых АЭС в постсоветское время базировались на тех же принципах, что свидетельствует о весьма и весьма слабом воздействии на проектантов сведений о современной геодинамике, излагаемое в отчетах ГДП-200.*

Весьма характерно, что в Государственных строительных нормах (ГСН, по украински ДБН) до сих пор сохраняется преступно легкомысленное отношение к

составу геолого-геофизических исследований при выборе площадок под строительство ответственных объектов.

Следует также подчеркнуть, что поисково-разведочные работы на углеводороды, нацеленные, в основном, на детальное изучение глубин более двух километров, также получают существенное преимущество в случае комплексного картирования территорий с нацеленностью на выявления глубинных процессов, проявляющих приповерхностные отклики.

Представленные в настоящей статье и в многочисленных публикациях данные свидетельствуют о том, что процессы сквозьформационные, субвертикальные, связанные с глубинной дегазацией, реализуемые в коре через тепломассоперенос флюидами и флюидизированным веществом, являются энергетически наиболее эффективными. С практической точки зрения эта превалирующая их эффективность реализуется, прежде всего, в виде связанных с трубами дегазации как многочисленных скоплений (месторождений) углеводородов и различных металлов, так и с геоэкологическими аномалиями. Следовательно, этим процессам и создаваемым ими эффектам необходимо уделять соответствующее внимание.

Реализация такого подхода возможна лишь при условии организации комплексного взаимоувязанного обязательного изучения сквозьформационных разнообразных эпигенетических изменений всех транзитных комплексов пород, соответственно существенного расширения применяемого комплекса методов исследований и максимального охвата изучением не только верхов земной коры, но и ее консолидированной части, а также верхней мантии. При этом следует еще и еще раз подчеркнуть, что при реализации такого подхода к геологическому картированию мы получим не только существенно более полные представления о геологических закономерностях конкретных регионов, но и совершим значительный прорыв в достижении практических целей — более полного познания ресурсного потенциала

и реальных экологических рисков и преимуществ конкретных территорий.

Все изложенное свидетельствует о целесообразности введения существенных дополнений к требованиям к комплексному геологическому картированию территорий, периодически осуществляемому на государственном уровне прежде всего в среднем масштабе (1:200 000).

В комплекс обязательных взаимосогласованных исследований должны быть включены:

- конкретно обоснованный комплекс геофизических методов исследований атмосферы, гидро- и литосферы, а также верхней мантии с детальностью, конкретизированной для каждого региона; в этот комплекс должны быть включены глубинное сейсмическое зондирование, сейсмическая томография, изучение тепловых полей с возможностью выделения зон конвективного тепломассопереноса и др.;

- различные дистанционные и, в частности, спектрометрические, спутниковый радиолокационный, тепловой, морфометрический и другие методы с целью выявления современной динамики отдельных блоков и зон, микрогеодинамических аномалий — западин, линеаментов, а также кольцевых структур и т. п., признаков их связи с глубинной дегазационной, геохимической, геофизической, гидрогеологической активностью;

- широкие исследования проявлений радиоактивности с изучением газовой, растворенной и минеральной компонент (радон, торон, тритий, уран, радиоактивный калий и др.) с оценкой их интенсивности в сквозьформационной миграции;

- выявление эпигенетических воздействий процессов ГДЗ и ее различных проявлений (гидротермальных, аномальных гидrogenных и др.), связанных с изменением термодинамических условий по восходящим и промежуточным латеральным потокам;

- поиск дегазационных труб разного порядка и сопутствующих им проявлений коалинизации, окварцевания, карбонатизации, сульфидизации, термальной ме-

таморфизации, обогащения глубинными геохимическими мигрантами: ртутью, бором, радиоактивными элементами, железом, хромом, никелем и др.;

– проявлений гипогенного сквозьформационного карстового процесса;

– выявление эпигенетических изменений пород под воздействием процессов ГДЗ и ее различных проявлений (гидротермальных, аномальных гидрогенных и др.), связанных с изменением термодинамических условий по восходящим и латеральным потокам;

– увязка геохимических аномалий с геофизическими аномалиями плотности, электропроводности, теплового потока и др.;

– выявление и комплексная увязка проявлений гидрохимических аномалий (демнерализации, содовой активизации, щелочно-кислотных и окислительно-восстановительных смещений и др.) с аномалиями различных геофизических полей и др.

Безусловно, этот этап комплексного геологического картирования может быть начат лишь после восстановления Геологической службы как органа, обеспечивающего важное направление деятельности и ответственности государства перед обществом.

Подготовленные для такого картирования соответствующие дополнения к существующей методической инструкции должны апробироваться на выделенных опорных участках с предварительно выявленной геофизическими и другими методами предполагаемой глубинной активизации.

Для выполнения нового этапа картирования должны быть определены и созданы базовые лаборатории с обеспечением их соответствующим современным оборудованием и подготовленным персоналом. Например, крайне необходимо создать современную лабораторию по определению изотопов гелия, который является весьма надежным индикатором глубинной активизации и дегазации.

По результатам комплексного картографического изучения следует выбрать участки для проведения длительного мониторинга режима различных полей, вклю-

чая комплекс наблюдений, позволяющий выявить пульсационные закономерности различных процессов и степень их аномальной опасности.

Финансовое обеспечение такого комплекса геологических работ по картированию потребует серьезных усилий геологического сообщества по просвещению ответственных лиц, принимающих решения, с целью их убеждения в крайней необходимости такой практики как в связи с перспективой серьезного наращивания ресурсного потенциала, так и для повышения экологической безопасности страны. Весьма важно, хотя финансово и затратно, введение в состав обязательных для выполнения картировочных работ более полного комплекса геофизических и современных геохимических, газово-изотопных и других исследований с охватом различных глубин, вплоть до верхней мантии.

Новый этап геологического картирования должен базироваться на результатах углубленных научных исследований, охватывающих всю мантию и, как минимум, жидкое ядро. В этой связи предварающая, финансово обеспеченная активизация научных исследований глубинных частей недр планеты, в первую очередь геофизическими и другими методами, является весьма актуальной задачей академической науки.

Если совершенствование принципов геологического картирования является действием стратегически важным, но реализуемым в будущем, **то применение охарактеризованных подходов к геологическому обоснованию строительства особенно ответственных объектов должно стать обязательным уже сейчас.** Без проведения взаимоувязанного комплекса геофизических, дистанционных, морфометрических, дегазационных, геохимических, геологических, гидрогеологических и других исследований в крупном масштабе с охватом изучением всей коры, участки под такое строительство вообще не должны приниматься. Крайне неудачный с геологических позиций выбор места строительства Чернобыльской, Крымской и некоторых других АЭС является суро-

вым уроком, который, в конце концов, необходимо полностью усвоить.

В связи с этим крайне актуальной задачей является пересмотр существующих

ГСН (ДБН), которые базируются на устаревших и нередко весьма ошибочных геологических представлениях 40—50 летней давности.

Список литературы

- Адушкин В. В. Кавитационный механизм нано- и микрочастиц в недрах Земли. *Докл. РАН*. 2004. Т. 399. № 1. С. 107—109.
- Анциферов А. В., Голубев А. А., Канин В. А., Тиркель М. Г., Задара Г. З., Узиюк В. И., Анциферов В. А., Суярко В. Г. *Газоносность и ресурсы метана угольных бассейнов Украины*. Донецк: Вебер, 2009. 56 с.
- Артюшков Е. В. Быстрые погружения и поднятия земной коры на континентах с потерей прочности как следствие подъема мантийных плюмов к подошве литосферы. В кн.: *Проблемы глобальной геодинамики*. Москва: ГЕОС, 2000. С. 11—35.
- Барковский Е. В. Заключение о природе так называемого «взрыва» в городе Сасово Рязанской области 12 апреля 1991 года. *Русская мысль*. 2004. № 1—12. С. 10—35.
- Белов С. В. Водородная дегазация планеты: анализ вулканических структур. *Око планеты*. 2011. <https://oko-planet.ru/phenomen/phenomscience/93242-vodorodnaya-degazaciya-planety-analiz-vulkanicheskikh-struktur.html>.
- Блюман Б. А. О трех НЕ — нелинейность, необратимость, неравновесность — геологических процессов. *Отечественная геология*. 2001. № 8. С. 64—65.
- Большаков Ю. Я. Капиллярно-экранированные залежи нефти и газа. Новосибирск: Наука, 1989. 126 с.
- Вадковский В. Н. Природа и механизм сейсмических «гвоздей»: Тез. докл. «Ломоносовские чтения 1996 г.». Москва: Изд-во МГУ, 1996. С. 63—64.
- Вадковский В. Н. Субвертикальные скопления гипоцентров землетрясений — сейсмические «гвозди». *Вестник ОНЗ РАН*. 2012. Т. 4. NZ1001. doi:10.2205/2012NZ000110.
- Васильев В. Г. Катастрофа Чернобыльской АЭС. Приближение к истине. Москва: Белые альвы, 2006. Сер. «Национальная безопасность», Вып. 3. 111 с.
- Войтов Г. И. О химическом составе газов Кривого Рога. *Геохимия*. 1971. Вып. 11. С. 1324—1331.
- Восточно-Африканская рифтовая система. Под ред. В. В. Белоусова. Москва: Наука, 1974. 350 с.
- Галимов Э. М. Изотопы углерода в нефтегазовой геологии. Москва: Недра, 1973. 384 с.
- Геворкян С. Г. Великое минойское извержение вулкана Санторин и его последствия. *Пространство и время*. 2011. № 2(4). С. 138—144.
- Геологический словарь. В 2-х томах. Отв. ред. К. Н. Паффенгольц. Москва: Недра, 1978. Т. 2. 415 с.
- Гинтов О. Б. Схема периодизации этапов разломообразования в земной коре Украинского щита — новые данные и следствия. *Геофиз. журн*. 2014. Т. 36. № 1. С. 3—18. doi: <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v36i1.2014.116145>.
- Гордиенко В. В. Природа коровых и мантийных проводников. *Геофиз. журн*. 2001. Т. 23. № 1. С. 29—39.
- Гордиенко В. В., Гордиенко И. В., Завгородняя О. В., Ковачикова С., Логвинов И. М., Тарасов В. Н. Эволюция тектоносферы Волыно-Подольской плиты. *Геофиз. журн*. 2011. Т. 33. № 6. С. 29—49. doi: <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v33i6.2011.116791>.
- Гордиенко В. В., Гордиенко И. В., Завгородняя О. В., Ковачикова С., Логвинов И. М., Тарасов В. Н., Усенко О. В. Украинский щит (геофизика, глубинные процессы). Киев: Корвін-пресс, 2005. 210 с.
- Гордиенко В. В., Гордиенко И. В., Завгородняя О. В., Логвинов И. М., Тарасов В. Н., Усенко О. В. Геотермический атлас Украины. Киев: Изд. ИГФ НАНУ, 2004. 59 с.
- Гордиенко В. В., Гордиенко И. В., Завгородняя О. В., Логвинов И. М., Шкурченко Е. И. Новые результаты геотермических и геоэ-

- лектрических исследований Днепровской зоны современной активизации. *Геофиз. журн.* 2007. Т. 29. № 1. С. 115—121.
- Гордиенко В. В., Гордиенко И. В., Завгородняя О. В., Усенко О. В. Тепловое поле территории Украины. Киев: Знание Украины, 2002. 170 с.
- Гордиенко В. В., Усенко О. В. Глубинные процессы в тектоносфере Украины. Киев: Изд. ИГФ НАНУ, 2003. 147 с.
- Гулиев И. С. Субвертикальные геологические тела: механизмы формирования и углеводородный потенциал. В кн.: *Новые идеи в геологии и геохимии нефти и газа*. Москва: ГЕОС, 2004. С. 153—155.
- Гуфельд И. Л. Геологические следствия аморфизации структуры литосферы и верхней мантии, вызванные водородной дегазацией. *Геодинамика и тектонофизика*. 2012. Т. 3. № 4. С. 417—435. <https://doi.org/10.5800/GT-2012-3-4-0083>.
- Гуфельд И. Л. Сейсмический процесс. Физико-химические аспекты. Королев: Изд. ЦНИ ИМАШ, 2007. 160 с.
- Гуфельд И. Л., Гусев Г. А., Матвеева М. И. Метастабильность литосферы как проявление восходящей диффузии легких газов. *Докл. РАН*. 1998. Т. 362. № 5. С. 677—680.
- Гуфельд И. Л., Собисевич А. Д. Импульсная региональная дегазация Земли, стимулирующая образование очагов сильных землетрясений. *Дегазация Земли: геофлюиды, нефть и газ, парагенезы в системе горячих ископаемых: Тез. докл. Междунар. конф., 30 мая — 1 июня 2006 г.* Москва: ГЕОС, 2006. С. 92—94.
- Добрецов Н. Л. Мантийные суперплюмы как причина главной геологической периодичности и глобальных перестроек. *Докл. РАН*. 1997. Т. 357. № 6. С. 797—800.
- Добрецов Н. Л., Кирдяшкин А. Г., Курдяшкин А. А. Глубинная геодинамика. Новосибирск: Изд-во СОРАН. Филиал «ГЕО», 2003. 408 с.
- Ентин В. А. Геофизическая основа Тектонической карты Украины масштаба 1:1000000. *Геофиз. журн.* 2005. Т. 27. № 1. С. 74—84.
- Иванов В. В., Гулиев И. С. Массообмен, углеводородообразование и фазовые переходы в осадочных бассейнах. Баку: Нафта-Пресс, 2002. 106 с.
- Инструкция по составлению и подготовке к изданию листов Государственной геологической карты Российской Федерации масштаба 1:200 000. Сост. А. И. Бурдэ, Ю. С. Маймин, В. В. Старченко и др. Ленинград: ВСЕГЕИ, 1995. 244 с.
- Керівний нормативний документ. Організація та проведення геологічного довивчення раніше закартованих площ масштабу 1:200 000, складання та підготовка до видання державної геологічної карти України масштабу 1:200 000. Укладачі П. Ф. Брацлавський, В. Я. Великанов, Б. Д. Возгрін та ін. Київ: Геолком України, 1999. 296 с.
- Кирдяшкин А. А., Добрецов Н. Л., Кирдяшкин А. Г. Тепло- и массообмен в термохимическом плюме, расположенном под океанической плитой вдали от оси срединно-океанического хребта. *Физика Земли*. 2008. № 6. С. 17—30.
- Киссин И. Г. Флюиды в земной коре. Геофизические и тектонические аспекты. Москва: Наука, 2009. 329 с.
- Китык В. И. Соляная тектоника Днепровско-Донецкой впадины. Киев: Наук. думка, 1970. 204 с.
- Китык В. И., Белоус И. Р., Долишний Б. В., Родина Э. К., Сливко Е. П., Флоринская В. Н. Ртутоносность соляных куполов Днепровско-Донецкой впадины. Киев: Наук. думка, 1981. 164 с.
- Климчук О. Б. Розвиток теорії гіпогенного карстогенезу: наукові та практичні застосування. *Вісник Національної академії наук України*. 2017. № 12. С. 9—28.
- Комаров П. В., Томсон И. Н. О плюмах и их влиянии на формирование благороднометалльного оруденения в углеродсодержащих породах. *Докл. РАН*. 2007. Т. 415. № 6. С. 779—781.
- Копничев Ю. Ф. Вариации поля поглощения поперечных волн перед сильными землетрясениями Северного Тянь-Шаня. *Докл. РАН*. 1997. Т. 356. № 4. С. 528—532.
- Корчин В. А., Буртный П. А. Термобарическое петрофизическое моделирование участков земной коры Украинского щита с зонами низких сейсмических скоростей.

- Геофиз. журн.* 2011. Т. 33. № 6. С. 82—95. doi: <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v33i6.2011.116795>.
- Кропоткин П. Н. Дегазация Земли и генезис углеводородов. *Журн. Всесоюз. хим. о-ва им. Д. И. Менделеева*. 1986. Т. 31. № 5. С. 540—547.
- Кузнецов О. Л. Нелинейная геофизика. Вопросы нелинейной геофизики. Москва: Изд. ОНТИ ВНИИЯГТ, 1981. С. 5—20.
- Куприенко П. Я., Макаренко И. В., Старостенко В. И., Легостоева О. В., Савченко А. С. Трехмерная плотностная модель земной коры и верхней мантии Днепровско-Донецкой впадины и Донбасса. *Геофиз. журн.* 2010. Т. 32. № 6. С. 175—214. doi: <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v32i6.2010.117461>.
- Курлов М. С. Гідрогеологічний нарис, газометрія, сучасний температурний режим. В кн.: *Криворізька наглибока свердловина НГ-8*. Кн. 5. Дніпропетровськ: КП «Південукреологія», 2003. С. 301—318.
- Ларин В. Н. Наша Земля (происхождение, состав, строение и развитие изначально гидридной Земли). Москва: Агар, 2005. 242 с.
- Ларин В. Н. Планетохимическое следствие современной космогонии. *Докл. АН СССР*. 1973. Т. 210. Вып. 5. С. 1193—1196.
- Ларин Н. В., Ларин В. Н., Горбатиков А. В. Кольцевые структуры, обусловленные глубинными потоками водорода. *Дегазация Земли: геотектоника, геодинамика, геофлюиды; нефть и газ; углеводороды и жизнь. Материалы Всерос. конф. С междунар. Участием, посвященной столетию со дня рождения акад. П. Н. Кропоткина*. Москва: ГЕОС, 2010. С. 284—287.
- Леонов М. Г., Колодяжный С. Ю., Кунина Н. М. Вертикальная аккреция земной коры — структурно-вещественный аспект. Москва: ГЕОС, 2000. 202 с.
- Летников Ф. А. Глубинные флюиды Земли. *Вестник РФФИ*. http://www.csr.spbu.ru/pub/RFBR_publications/articles/geosciences/2000/glubinnny%27e_flyuidy%27_Zemli_00_geo.pdf.
- Летников Ф. А. Сверхглубинные флюидные системы Земли и проблемы рудогенеза. *Геология рудных месторождений*. 2001. № 4. С. 291—307.
- Летников Ф. А. Сверхглубинные флюидные системы Земли. Новосибирск: Наука, 1992. 150 с.
- Лукин А. Е. Постседиментационные изменения соленосных отложений. В кн.: Галогенные формации Украины и связанные с ними полезные ископаемые. Киев: Наук. думка, 1971. С. 62—64.
- Лукин А. Е. Генетические типы вторичных преобразований и нефтегазонакопление в авлакогенных бассейнах. АН УССР, Ин-т геол. наук. Киев, 1989. 51 с. Препр.
- Лукин А. Е. Инъекции глубинного углеводородно-полиминерального вещества в глубоководных породах нефтегазоносных бассейнов: природа, прикладное и гносеологическое значение. *Геол. журн.* 2000. № 2. С. 7—21.
- Лукин А. Е. Литогеохимические факторы нефтегазонакопления в авлакогенных бассейнах. Киев: Наук. думка, 1997. 225 с.
- Лукин А. Е. Минеральные сферы — индикаторы специфического флюидного режима рудообразования и нефтидогенеза. *Геофиз. журн.* 2013. Т. 35. № 6. С. 10—53. doi: <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v35i6.2013.116450>.
- Лукин А. Е. О природе и перспективах газоносности низкопроницаемых пород осадочной оболочки Земли. *Докл. НАНУ*. 2011. № 3. С. 114—123.
- Лукин А. Е. О происхождении нефти и газа (геосинергетическая концепция природных углеводородно-генерирующих систем). *Геол. журн.* 1999. № 1. С. 30—42.
- Лукин А. Е. О промышленно газоносных палеозойских травертинах. *Докл. РАН*. 1992. Т. 326. № 1. С. 143—148.
- Лукин А. Е. О сквозьформационных флюидопроводящих системах в нефтегазоносных бассейнах. *Геол. журн.* 2004. № 3. С. 34—45.
- Лукин А. Е. Природа глубоководных нефтяногазоносных резервуаров. *Углеводородный потенциал больших глубин: энергетические ресурсы будущего — реальность и прогноз: Тез. 1-й междунар. конф. 12—14 июня 2012 г.* Баку, 2012. С. 26—28.

- Лукин А. Е. Проблемы нефтидосинергетики — нелинейной геологии нефти и газа. *Геол. журн.* 2004. № 1. С. 21—39.
- Лукин А. Е. Самородно-металлические микро- и нановключения в формациях нефтегазоносных бассейнов — трассеры суперглубинных флюидов. *Геофиз. журн.* 2009. Т. 31. № 2. С. 61—92.
- Лукин А. Е. Самородные металлы и карбиды — показатели состава глубинных геосфер. *Геол. журн.* 2006. № 4. С. 17—46.
- Лукин А. Е. Система «суперплюм — глубокозалегающие сегменты нефтегазоносных бассейнов» — неисчерпаемый источник углеводородов. *Геол. журн.* 2015. № 2. С. 7—20.
- Лукин А. Е. Углеродородный потенциал больших глубин и перспективы его освоения в Украине. *Геофиз. журн.* 2014. Т. 36. № 4. С. 3—23. doi: <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v36i4.2014.112455>.
- Лукин А. Е., Гарипов О. М. Литогенез и нефтегазоносность юрских отложений Среднеширотного Приобья. *Литология и полезные ископаемые.* 1994. № 4. С. 32—42.
- Лукин А. Е., Гончаров Г. Г. Эксплозивные брекчии — литогеодинимический индикатор начальной стадии соляного диапиризма. *Геол. журн.* 2015. № 4. С. 7—25.
- Лукин А. Е., Ларин С. Б. Генетические типы трещиноватости пород глубокозалегающих нефтегазоносных комплексов. *Геол. журн.* 2003. № 3. С. 9—25.
- Лукин А. Е., Луговая И. П., Загнитко В. Н. Природа палеогеотермических критериев нефтегазоносности. *Изв. АН СССР. Сер. геол.* 1989. № 4. С. 113—125.
- Лукин А. Е., Шпак П. Ф. Глубинные факторы формирования Припятско-Днепровско-Донецкой системы нефтегазоносных бассейнов. *Геол. журн.* 1991. № 5. С. 27—38.
- Лукин А. Е., Шумлянский В. А., Дьяченко Г. И., Ивантишина О. М. Проблемы холодной дегазации Земли. АН Украины. Ин-т геол. наук. Киев, 1994. 71 с. Препр.
- Лукин А. Е., Юзленко А. Т. Открытие газоносных коллекторов гипогенно-метасоматической природы в кристаллических породах Украинского щита. *Доп. НАН України.* 2011. № 7. С. 106—113.
- Нежданов А. А., Смирнов А. С. Поверхностные проявления флюидодинамических процессов Земли. *Материалы семинара по ямальной воронке.* Москва: Изд. Ин-та геоэкологии РАН, 2014. <https://www.youtube.com>.
- Нинкович Д., Хейзен Б. Тэфра острова Санторин. Геология и геофизика морского дна. Москва: Мир, 1969. С. 333—371.
- Новгородова М. И. Самородные металлы в гидротермальных рудах. Москва: Наука, 1983. 287 с.
- Нусипов Е. Н., Оспанов А. Б., Шацлов В. И. Скоростные модели литосферы высокой Азии по системе геотраверсов. *Вестник НЯЦ РК.* 2005. Вып. 2. С. 109—121.
- Оровецкий Ю. П., Коболев В. П. Горячие пояса Земли. Киев: Наук. думка, 2006. 311 с.
- Пашкевич И. К., Бакаржиева М. И. Мафические дайки Ингульского мегаблока (Украинский щит): связь поверхностных и глубинных структур литосферы, разломная тектоника и геодинамика. *Геофиз. журн.* 2016. № 5. С. 49—66. doi: <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v38i5.2016.107821>.
- Поспелов Г. Л. Геологические предпосылки к физике рудоконтролирующих флюидопроводников. *Геология и геофизика.* 1963. № 3. С. 18—38.
- Планета Земля. Энциклопедический справочник. Том «Тектоника и геодинамика». Ред. Л. И. Красный, О. В. Петров, Б. А. Блюманс. Санкт-Петербург: Изд-во ВСЕГЕИ, 2004. 648 с.
- Поспелов Г. Л. Парадоксы, геолого-геофизическая сущность и механизмы метасоматоза. Новосибирск: Наука, 1973. 355 с.
- Портнов А. В. Вулканы — месторождения водорода. *Промышленные ведомости.* 2010. № 10—12. <http://www.promved.ru/articles/article.phtml?id=2019&nomer=67>.
- Пристер Б. С., Ключников А. А., Шестопалов В. М., Кухарь В. П. Проблемы безопасности атомной энергетики: Уроки Чернобыля. Чернобыль: Изд. Ин-та проблем безопасности АЕС НАН Украины, 2013. 199 с.

- Пушаровский Ю. М. Нелинейная геодинамика (кредо автора). *Геотектоника*. 1993. № 1. С. 3—6.
- Пушаровский Ю. М. О тектоно-геодинамической модели Земли нового поколения — обзор проблемы. *Геотектоника*. 2006. № 3. С. 3—8.
- Пушаровский Ю. М. Сейсмотомография, тектоника и глубинная геодинамика. *Докл. РАН*. 1998. Т. 360. № 4. С. 518—522.
- Рябчиков И. Д. Высокие содержания никеля в мантийных магмах как свидетельство миграции вещества из земного ядра. *Докл. РАН*. 2003. Т. 389. № 5. С. 677—680.
- Словарь по геологии нефти и газа. Под ред. К. А. Черникова. Ленинград: Недра, 1988. 679 с.
- Старостенко В. И., Гинтов О. Б., Пашкевич И. К., Бурахович Т. К., Кулик С. Н., Куприенко П. Я., Кутас Р. И., Макаренко И. Б., Орлюк М. И., Цветкова Т. А. Металлогения Украинского щита: закономерности размещения месторождений полезных ископаемых и их связь с глубинным строением и динамикой литосферы. *Геофиз. журн.* 2007. Т. 29. № 6. С. 3—31.
- Старостенко В. И., Лукин А. Е., Цветкова Т. А., Заец Л. Н., Донцов В. В., Савиных Ю. В. Об участии суперглубинных флюидов в нефтегенезе (по данным изучения уникального нефтяного месторождения Белый Тигр). *Геофиз. журн.* 2011. Т. 33. № 4. С. 3—32. doi: <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v33i4.2011.116893>.
- Старостенко В. И., Куприенко П. Я., Макаренко И. В., Савченко А. С., Легостаева О. В. Плотностная неоднородность земной коры Ингульского мегаблока Украинского щита по данным трехмерного гравитационного моделирования. *Геофиз. журн.* 2015. Т. 37. № 3. С. 3—21. doi: <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v37i3.2015.111089>.
- Старостенко В. И., Лукин А. Е., Цветкова Т. А., Шумлянская А. А. Геофлюиды и современное проявление активизации Ингульского мегаблока Украинского щита. *Геофиз. журн.* 2014. Т. 36. № 5. С. 3—25. doi: <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v36i5.2014.111567>.
- Старостенко В. И., Пашкевич И. К., Кутас Р. И. Глубинное строение Украинского щита. *Геофиз. журн.* 2002. Т. 24. № 6. С. 36—48.
- Страхов В. Н., Старостенко В. И., Харитонов О. М., Аптикаев Ф. Ф., Барковский Е. В., Кедров О. К., Палиенко В. П. Сейсмические явления в районе Чернобыльской АЭС. *Геофиз. журн.* 1997. Т. 19. № 3. С. 3—15.
- Страхов В. Н. Как геофизики должны решать линейные некорректные задачи. *Геофиз. журн.* 2003. Т. 25. № 1. С. 11—16.
- Сывороткин В. Л. Глубинная дегазация Земли и глобальные катастрофы. Москва: Изд. ООО «Геоинформцентр», 2002. 250 с.
- Сывороткин В. Л. О геологической позиции Эль-Ниньо. *Пространство и время*. 2012. Т. 8. № 2. С. 169—173.
- Сучасна геодинаміка та геофізичні поля Карпат і суміжних територій. Ред. К. Р. Третьяк, В. Ю. Максимчук, Р. І. Кутас. Львів: Львівська Політехніка, 2015. 418 с.
- Тимурзиев А. И. Закономерности пространственно-стратиграфического распределения залежей нефти и газа Западно-Сибирской нефтегазоносной провинции на основе представлений об их глубинном генезисе, молодом возрасте и новейшем времени формирования. *Глубинная нефть*. 2013. Т. 1. № 11. С. 1720—1759.
- Толковый словарь английских геологических терминов. В 3-х томах. Под ред. М. Гера, Р. Мак-Афа, К. Вульфа. Москва: Мир, 1979. Т. 3. 544 с.
- Трубицын В. П., Харьбин Е. В. Термохимические мантийные плюмы. *Докл. РАН*. 2010. Т. 435. № 5. С. 683—685.
- Усенко О. В. Тепловой поток и современная активизация Донецкого бассейна (по новым данным). *Геофиз. журн.* 2002. Т. 24. № 5. С. 102—111.
- Хаин В. Е. Земля — уникальная планета Солнечной системы. *Вестник РАН*. 2003. № 9. С. 822—829.
- Хакен Г. Синергетика. Москва: Мир, 1985. 419 с.
- Харахинов В. В., Шленкин С. И. Структура флюидопроводящих систем нефтегазоносных бассейнов. В кн.: *Новые идеи в геологии*

- и геохимии нефти и газа. Москва: ГЕОС, 2004. С. 522—524.
- Цветкова Т. А., Бугаенко И. В., Заец А. Н. Сейсмическая визуализация плюмов и сверхглубинных флюидов в мантии под территорией Украины. *Геофиз. журн.* 2017. Т. 39. № 4. С. 42—54. doi: <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v39i4.2017.107506>.
- Чекунов А. В., Калюжная Л. Т., Рябчун Л. И. Раздел М и нефтегазоносность Днепровского грабена. *Докл. АН УССР.* 1989. № 12. С. 19—21.
- Шевченко В. И., Арефьев С. С., Лукк А. А. Близвертикальные скопления очагов землетрясений, не связанные с тектонической структурой земной коры. *Физика Земли.* 2011. № 4. С. 16—38. doi: [10.1134/S0002333711040028](https://doi.org/10.1134/S0002333711040028).
- Шестопалов В. М., Макаренко А. Н. О некоторых результатах исследований, развивающих идею В. И. Вернадского о «газовом дыхании Земли». Статья 1. Поверхностные и приповерхностные проявления аномальной дегазации. *Геол. журн.* 2013. Вып. 3. С. 7—25.
- Шестопалов В. М., Макаренко А. Н. О некоторых результатах исследований, развивающих идею В. И. Вернадского о «газовом дыхании Земли». Статья 2. Глубинные процессы дегазации недр. *Геол. журн.* 2014. Вып. 3 (348). С. 7—28.
- Шестопалов В. М. О возможных геолого-геофизических рисках и перспективах Чернобыльской зоны отчуждения (к 30-летию Чернобыльской катастрофы). *Геофиз. журн.* 2016. Т. 38. № 1. С. 3—16. doi: <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v38i1.2016.107715>.
- Шестопалов В. М., Лукин А. Е., Згонник В. А., Макаренко А. Н., Ларин Н. В., Богуславский А. С. Очерки дегазации Земли. Киев: БАДАТА-Интек сервис, 2018. 632 с.
- Шуман В. Н. Электродинамика и отклик геосреды на воздействие внешних электромагнитных полей. *Геофиз. журн.* 2013. Т. 35. № 5. С. 129—150. doi: <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v35i5.2013.116443>.
- Шумлянский В. А., Безуглая М. В. Рудоносность соляных куполов. Киев: Изд. Ин-та фундаментальных исследований, 1995. 66 с.
- Щеглов А. Д. Нелинейная металлогения. *Докл. АН СССР.* 1983. Т. 271. № 6. С. 1471—1474.
- Щеглов А. Д. Основные проблемы современной металлогении. Ленинград: Недра, 1987. 232 с.
- Юдович Я. Э., Кетрис М. П. Геохимические индикаторы литогенеза (литологическая геохимия). Сыктывкар: Геопринт, 2011. 742 с.
- Allegre, C. J., Staudacher, T. & Sandra, P. (1987). Rare gas systematics: formation of the atmosphere, evaluation and structure of the Earth's mantle. *Earth and Planetary Science Letters*, 81(2-3), 127—150. [https://doi.org/10.1016/0012-821X\(87\)90151-8](https://doi.org/10.1016/0012-821X(87)90151-8).
- Bachler, D., Kohl, T. & Rubach, L. (2002). Characteristics of upper crust convective flow in the Rhine graben: application to the Gamma fault at Landau (Germany). *Proc. Inter conf.: The Earth's Thermal Field and Related Research Methods* (pp. 10—11). Moscow: RUPF.
- Bennet, I. G. (1963). Geophysics and Human History. *Systematics, I*, 127—156.
- Caliro, S., Chiodini, G., Moretti, R., Avino, R., Granieri, D., Russo, M. & Fiebig, I. (2007). The origin of the fumaroles of La Solfatara (Campi Flegres, South Italy). *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 71(12), 3040—3055. doi: [10.1016/j.gca.2007.04.007](https://doi.org/10.1016/j.gca.2007.04.007).
- Cande, S. C. & Stegman, D. R. (2011). Indian and African plate motions driven by the push force of the Reunion plume head. *Nature*, 475, 47—52.
- Cathles, L. M., Su, Zhend & Chen, Duofu. (2010). The physics of gas chimney and pockmark formation with implications for assessment of seafloor hazards and gas sequestration. *Marine and Petroleum Geology*, 27(1), 82—91. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2009.09.010>.
- Chiodini, G., Paonita, A., Aluppa, A., Costa, A., Caliro, S., De Marino, P., Acocello, V. & Vande-meulebrouck, J. (2016). Magmas near the critical degassing pressure drive Volcanic unrest towards a critical state. *Nature Communication*, 7, Article number 13712.
- D'Auria, L., Pepe, S., Castaldo, R., Gludicepietro, F., Macedonio, G., Ricciolino, P., ... Zinno, J. (2015). Magma injection beneath the urban area of Naples: a new mechanism

- for the 2012—2013 volcanic unrest at Campi Flegrei caldera. *Scientific Reports*, (5), 1310. doi: 10.1038/srep13100.
- De Boever, E., Swennen, R. & Dimitrov, L. (2006). Lower Eocene carbonate cemented chimneys Varna, NE Bulgaria): Formation mechanisms and the (a)biological mediation of chimney growth? *Sedimentary Geology*, 185, 159—171. <https://doi.org/10.1016/j.sedgeo.2005.12.010>.
- De Boer, J. Z., Sanders, D. T., Ballard, R. D. (2004). *Volcanoes in Human History. The Far-Reaching Effects of Major Eruptions*. 2004. Princeton University Press.
- Francis, P. (1993). *Volcanoes. A Planetary Perspective*. New York: Oxford University Press inc., 443 p.
- Friedman, J. (1970). Some investigations of the deposition of travertine from Hot Springs—I. The isotopic chemistry of a travertine-depositing spring. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 34(12), 1303—1315. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(70\)90043-8](https://doi.org/10.1016/0016-7037(70)90043-8).
- Galanopoulos, A. G. (1964). Die egyptischen Plagen und der Auszug Israels aus geologischer Sicht. *Z. Alterum.*, 10, 131—137.
- Geyko, V. S. (2004). A general theory of the seismic travel-time tomography. *Geofizicheskiy zhurnal*, 26(2), 3—32.
- Gilat, A. L. & Vol, A. (2005). Primordial hydrogen-helium degassing, an overlooked major energy source for internal terrestrial processes. *HAIT Journal of Science and Engineering B.*, 2(1-2), 125—167.
- Gilat, A. L. & Vol, A. (2012). Degassing of primordial hydrogen and helium as the major energy source for internal terrestrial processes. *Geoscience Frontiers*, 3(6), 911—921. doi:10.1016/j.gsf.2012.03.009.
- Judd, A., Hovland, M. (2007). *Seabed fluid flow — impact on geology, biology and the marine environment*. Cambridge University Press, 400 p.
- Kerr, R. A. (2006). Rising plumes in Earth's mantle: phantom or real? *Science*, 313, 1726. DOI: 10.1126/science.313.5794.1726.
- Kleinekathoefen, U., Tang, K. T., Toerries, J. P. & Yiu, C. L. (1996). Potentials for some rare gas and alkali-helium systems calculated from the surface integral method. *Chemical Physics Letters*, 249(3-4), 257—263. [https://doi.org/10.1016/0009-2614\(95\)01388-1](https://doi.org/10.1016/0009-2614(95)01388-1).
- Larin, N. V., Zgonnik, V., Rodina, S., Deville, E., Prinzhofer, A. & Larin, V. N. (2015). Natural Molecular Hydrogen Seepage Associated with Surficial, Rounded Depressions on the European Craton in Russia. *Natural Resources Research*, 24(3), 369—383. doi: 10.1007/s11053-014-9257-5.
- Lindenfeld, M., Rumpker, G., Koehn, D. & Batte, A. (2012). Fluid-triggered earthquake swarms in the Rwenzori region, East African Rift — Evidence for rift initiation. *Tectonophysics*, 566-567, 95—104. doi: 10.1016/j.tecto.2012.07.010.
- Loseth, H., Wensaas, L., Arnsen, B., Hanken, N.-M., Basire, Ch. & Graue, K. (2011). 1000 m long gas blow-out pipes. *Marine and Petroleum Geology*, 28(5), 1047—1060. doi:10.1016/j.marpetgeo.2010.10.001
- Müller, R. D., Rouer, J. Y. & Lowver, L. A. (1993). Revised plate motions relative to the hotspots from combined Atlantic and Indian Ocean hot-spot tracks. *Geology*, 21(3), 275—278. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1993\)021<0275:rpm>2.3.co;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1993)021<0275:rpm>2.3.co;2).
- Morgan, W. J. (1971). Convection plumes in the lower mantle. *Nature*, 230, 42—43. <https://doi.org/10.1038/230042a0>.
- Morgan, W. J. (1972). Deep mantle convection plumes and plate motions. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 56, 203—213.
- Moss, J. L. (2010). *The spatial and Temporal distribution of pipe and pockmark formation*. PhD. Thesis, Cardiff University. 314 p. <https://orca.cf.ac.uk/54111/1/U511205.pdf>.
- Murakami, M., Hirose, K., Yurimoto, H., Nakashima, S. & Takafuji, N. (2002). Water in Earth's lower mantle. *Science*, 295(5561), 1885—1887. DOI: 10.1126/science.1065998.
- Nittmann, J., Daccord, G. & Stanley, H. (1985). When do "viscous fingers" have fractal measurement? *Nature*, 314, 141—144.
- Nuccio, P. M. & Paonita, A. (2000). Investigation of the noble gas solubility in H₂O and CO₂ bearing silicate liquids at moderate pres-

- sure: the extended ionic porosity (EIP) model. *Earth and Planetary Science Letters*, 183(3-4), 499—512. [https://doi.org/10.1016/S0012-821X\(00\)00297-1](https://doi.org/10.1016/S0012-821X(00)00297-1).
- Ohtani, E., Shibazaki, Y. & Terasaki, H. G. (2009). Distribution of Hydrogen in the Deep Earth and its Role in Earth's dynamics (invited). American Geophysical Union, Fall Meeting, abstract V14C-01.
- Okuchi, T. (1997). Hydrogen Partitioning into Molten Iron at High Pressure: Implications for Earth's Core. *Science*, 278(5344), 1781—1784. DOI: 10.1126/science.278.5344.1781.
- Pilchen, R. & Argent, J. (2007). Mega-pockmarks and linear pockmark trains on the West African continental margin. *Marine Geology*, 244(1-4), 15—32. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2007.05.002>.
- Rampino, M. & Ambrose, S. H. (2000). Volcanic Winter in the Garden of Eden: The Toba Super eruption and Late Pleistocene Human Population Crack. Geological Society of America, Special Paper 345, P. 71—82.
- Rhee, L., Gasparini, F. M., Bishop, D. (1989). Finite-size scaling of the superfluid density of He⁴ confined between silicon wafers. *Physical Review Letters*, 63(4), 410. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.63.410>
- Ross, J. A., Peakall, J. & Keevil, G. M. (2014). Facies and flow regimes of sandstone — hosted columnar intrusions: Insights from the pipes of Kodachrome Basin State Park. *Sedimentology*, 61(6), 1764—1792. <https://doi.org/10.1111/sed.12115>.
- Saunders, M., Jimenez-Vazquez, H. A., Cross, R. J., Mroczkowski, S., Freedlerg, D. I., Anet, F. A. L. (1994). Probing the interior of fullerenes by ³He NMR spectroscopy of endohedral ³He@C₆₀ and ³He@C₇₀. *Nature*, 367, 256—258.
- Simkin, T., Under, J. D., Tilling, R. I., Vogt, P. R., Spall, H. (1994). This Dynamic Planet, World Map of Volcanoes, Earthquakes, Impact Craters and Plate Tectonics: Explanatory Notes. US Geological Survey in cooperation with the Smithsonian Institution.
- Syvorotkin, V. L. (2010). Hydrogen degassing of the Earth: Natural disasters and the biosphere. In *Man and the Geosphere* (pp. 307—347). New York: Nov Science Publishers.
- Van Hinsbergen, D. J. J., Steinberger, B., Doubrovine, P. V., & Gassmöller, R. (2011). Acceleration and deceleration of India — Asia convergence since the Cretaceous: robes of mantle plumes and continental collision. *Journal of Geophysical Research*, 116, B06101. doi: 10.1029/2010JB008051.
- Vos, W. L., Finger, L. W., Hemley, A. J. & Mao, N. K. (1996). Pressure dependence of hydrogen bonding in a novel H₂O—H₂ clathrate. *Chemical Physics Letters*, 257(5-6), 524—530. [https://doi.org/10.1016/0009-2614\(96\)00583-0](https://doi.org/10.1016/0009-2614(96)00583-0).
- Wilston, J. T. (1963). A Possible origin of the Hawaiian islands. *Canadian Journal of Physics*, 41(6), 863—870, <https://doi.org/10.1139/p63-094>.
- Zarifi, Z. & Havskov, J. (2003). Characteristics of dense nests of deep and intermediate-depth seismicity. *Advances in Geophysics*, 46, 237—276. [https://doi.org/10.1016/S0065-2687\(03\)46004-4](https://doi.org/10.1016/S0065-2687(03)46004-4).
- Zgonnik, V., Beaumont, V., Deville, E., Larin, N. V., Pillot, D., Farrell, K. M. (2015). Evidence for natural molecular hydrogen seepage associated with Carolina bays (surficial, ovoid depressions on the Atlantic Coastal Plain, Province of the USA. *Progress in Earth and Planetary Science*, 2:31. doi:10.1186/s40645-015-0062-5.

From new geological paradigm to the problems of regional geological-geophysical survey

A. E. Lukin, V. M. Shestopalov, 2018

Analysis of the latest scientific achievements in different areas of geological and geophysical research showed that investigation of deep Earth degassing from its core up to the surface and atmosphere acquires status of the mainstream in the Earth sciences. Of great fundamental and applied significance is identification of the most energetically active and

powerful sub-vertical upward degassing processes, which generate trans-geosphere and cross-formational systems and are localized in the form of a hierarchy of different-sized degassing pipes — from the base plume to the elementary near-surface channel. Existence of this system is ensured by a series of successive exothermic transformations of elementary recovered gases into oxide substances. As a result of given chemical reactions these substances consistently receive new portions of energy sufficient for the gradual upward breakthrough of the mantle and crust internal substance. Interpretation of mantle plumes as the basic degassing mega-tubes allows us to unite the main aspects of endogenous ore formation, naphthidogenesis in the lithosphere and ecological processes in the earth's crust and atmosphere. The cross-formational systems serve as the structural-geological basis of degassing pipes. Given systems are the basic concentrates of the naphthides upward migration and accumulation in the multi-layered deposits. The relationship between diapirism and mega-plumes derivatives — degassing pipes becomes increasingly clear. The degassing energy is the main factor of diapirism. The locations of possible anomalous degassing in Ukraine were identified based on the analysis of geophysical and other signs of modern activation. An assumption is made of possible commercial production of natural hydrogen in some of these locations. Ecological risks of deep Earth degassing, in particular, catastrophic degassing through super volcanoes are considered. Possible directions of counteraction against these risks with the help of purposeful efforts of the progressive humanity are also discussed. There is a need to revise the strategy and methodology of further development of geological and geophysical researches in general and, in particular, the major applied research areas, such as complex geological survey, mapping, prospecting of mineral resources and geo-ecology.

Key words: plume, deep Earth degassing, degassing pipe, cross-formational system, activation zone, ecological consequences of deep degassing.

References

- Adushkin, V. V. (2004). Cavitation mechanism of nano- and microparticles formation in the interior of the Earth. *Doklady RAN*, 399(1), 107—109 (in Russian).
- Antsiferov, A. V., Golubev, A. A., Kanin, V. A., Tirkel, M. G., Zadara, G. Z., Uziyuk, V. I., Antsiferov, V. A. & Suyarko, V. G. (2009). *Gas content and methane resources of coal basins in Ukraine*. Donetsk: Weber Publ. House (in Russian).
- Artyushkov, E. V. (2000). Rapid subsidence and uplift of the Earth's crust in the continents with the loss of strength of lithosphere layer as a result of mantle plumes ascending to the base of the lithosphere. In *Global problems of geodynamics* (pp. 11—35). Moscow: GEOS (in Russian).
- Barkovsky, E. V. (2004). Conclusion on the nature of so-called «explosion» in the town of Sasovo, Ryazan region on April 12, 1991. *Russkaya Mysl* (1-12), 10—35 (in Russian).
- Belov, S. V. (2011). Hydrogen degassing of the planet: analysis of volcanic structures. *Oko planety* (in Russian). <https://oko-planet.su/phenomen/phenomenscience/93242-vodorodna-ya-degazaciya-planety-analiz-vulkanicheskikh-struktur.html>.
- Bluman, B. A. (2001). About three NON in geological processes — non-linearity, non-reversibility, non-equilibrium. *Otechestvennaya geologiya* (8), 64—65 (in Russian).
- Bolshakov, Yu. Ya. (1989). *Capillary-shielded oil and gas fields*. Novosibirsk: Nauka (in Russian).
- Vadkovsky, V. N. (1996). Nature and mechanism of seismic «nails». *Abstracts of the conference «Lomonosov Readings»* (pp. 63—64). Moscow: MSU Publ. House (in Russian).
- Vadkovsky, V. N. (2012). Subvertical congestions of the earthquake hypocenters — seismic «nails». *Vestnik ONZ RAN*, 4, NZ1001. doi:10.2205/2012NZ000110 (in Russian).
- Vasiliev, V. G. (2006). *The Chernobyl NPP Catastrophe. Approximation to the truth*. Moscow: Belye Alvy Publ. House. Series «National Security», Is. 3 (in Russian).
- Voitov, G. I., 1971. Chemical composition of gases of the Krivoy Rog basin. *Geokhimiya* (11), 1324—1331 (in Russian).

- Belousova, V. V. (Ed.). (1974). *East African rift system*. Moscow: Nauka (in Russian).
- Galimov, E. M. (1973). *Carbon isotopes in oil-and-gas geology*. Moscow: Nedra (in Russian).
- Gevorkyan, S. G. (2011). Great Minoan eruption of Santorin volcano and its consequences. *Prostranstvo i vremya*, (2), 138—144 (in Russian).
- Paffengolz, K. N. (Ed.). (1978). *Geological glossary* (Vols. 1-2). Moscow: Nedra (in Russian).
- Gintov, O. B. (2014). Scheme of periodization of faulting stages in the Earth's crust of the Ukrainian Shield — new data and consequences. *Geofizicheskiy zhurnal*, 36(1), 3—18 (in Russian).
- Gordienko, V. V. (2001). The nature of crustal and mantle conductors. *Geofizicheskiy zhurnal*, 23(1), 29—39 (in Russian).
- Gordienko, V. V., Gordienko, I. V., Zavgorodnyaya, O. V., Kovachikova, S., Logvinov, I. M. & Tarasov, V. N. (2011). Evolution of the tectonosphere of the Volyn-Podolsk plate. *Geofizicheskiy zhurnal*, 33(6), 29—49 (in Russian).
- Gordienko, V. V., Gordienko, I. V., Zavgorodnyaya, O. V., Kovachikova, S., Logvinov, I. M., Tarasov, V. N. & Usenko, O. V. (2005). *Ukrainian shield (geophysics, deep processes)*. Kiev: Korvin-press (in Russian).
- Gordienko, V. V., Gordienko, I. V., Zavgorodnyaya, O. V., Logvinov, I. M., Tarasov, V. N. & Usenko, O. V. (2004). *Geothermal atlas of Ukraine*. Kiev: IGP NASU Publ. House (in Russian).
- Gordienko, V. V., Gordienko, I. V., Zavgorodnyaya, O. V., Logvinov, I. M. & Shkurenko, E. I. (2007). Recent results of geothermal and geoelectric studies of the Dnieper zone of modern activation. *Geofizicheskiy zhurnal*, 29(1), 115—121 (in Russian).
- Gordienko, V. V., Gordienko, I. V., Zavgorodnyaya, O. V. & Usenko, O. V. (2002). *Thermal field of the territory of Ukraine*. Kyiv: Znannya Ukrainy (in Russian).
- Gordienko, V. V. & Usenko, O. V. (2003). *Deep processes in the tectonosphere of Ukraine*. Kiev: IGP NASU (in Russian).
- Guliev, I. S. (2012). Sub-vertical geological bodies: formation mechanisms and hydrocarbon potential. In *New ideas in oil and gas geology and geochemistry* (pp. 153—155). Moscow: GEOS (in Russian).
- Gufeld, I. L. (2012). Geological consequences of amorphization of the lithosphere and upper mantle structures, caused by hydrogen degassing. *Geodinamika i tektonofizika*, 3(4), 417—435 (in Russian).
- Gufeld, I. L. (2007). *Seismic process. Physico-chemical aspects*. Korolev: TsNIIMash (in Russian).
- Gufeld, I. L., Gusev, G. A. & Matveeva, M. I. (1998). Metastability of the lithosphere as a manifestation of the ascending diffusion of light gases. *Doklady RAN*, 362(5), 677—680 (in Russian).
- Gufeld, I. L., Soubisevich, A. D. (2006). Pulse regional degassing of the Earth, which stimulates formation of strong earthquakes foci. *Abstracts of the International Conference: «Degassing of the Earth: geofluids, oil and gas, parageneses in the system of fossil fuels», May 30—June 1, 2006* (pp. 92—94). Moscow: GEOS (in Russian).
- Dobretsov, N. L. (1997). Mantle superplumes as the cause of the main geological periodicity and global rearrangements. *Doklady RAN*, 357(6), 797—800 (in Russian).
- Dobretsov, N. L., Kirdyashkin, A. G., Kurdyashkin, A. A. (2003). *Deep-level geodynamics*. Novosibirsk: SB RAS Publ. House. Affiliate of «GEO» (in Russian).
- Entin, V. A. (2005). Geophysical basis for the Tectonic map of Ukraine of scale 1:1 000 000. *Geofizicheskiy zhurnal*, 27(1), 74—84 (in Russian).
- Ivanov, V. V., Guliyev, I. S. (2002). *Mass exchange, hydrocarbon formation and phase transitions in sedimentary basins*. Baku: Nafta Press (in Russian).
- Burde, A. I., Maimin, Yu. S., Starchenko, V. V. et al. (Compilers). (1995). *Instruction on compilation and preparation for publication of the State Geological Map of the Russian Federation of scale 1: 200 000*. Leningrad: VSEGEI Publ. House (in Russian).
- Bratslavsky, P. F., Velikanov, V. Ya., Vogrin, B. D. et al. (Compilers). (1999). *Regulatory guidance document. Organization and implementation of geological study of previously mapped areas of scale 1:200 000, compilation and preparation for publication of the state geological map of*

- Ukraine of scale 1:200 000*. Kiev: Geolkom Ukrainy (in Ukrainian).
- Kirdyashkin, A. A., Dobretsov, N. L., Kirdyashkin, A. G., (2008). Heat and mass transfer in a thermochemical plume under an oceanic plate far from the mid-ocean ridge axis. *Fizika Zemli*, (6), 17—30. DOI: 10.1134/S1069351308060025 (in Russian).
- Kissin, I. G. (2009). *Fluids in the earth's crust. Geophysical and tectonic aspects*. Moscow: Nauka (in Russian).
- Kityk, V. I. (1970). *Salt tectonics of the Dnieper-Donets Depression*. Kiev: Naukova Dumka (in Russian).
- Kityk, V. I., Belous, I. R., Dolishny, B. V., Rodina, E. K., Slivko, E. P., Florinskaya, V. N. (1981). *Mercury content in salt domes of the Dnieper-Donets depression*. Kiev: Naukova Dumka (in Russian).
- Klymchouk, O. B. (2017). Development of the theory of hypogene karstogenesis: scientific and practical applications. *Visnyk Natsionalnoi Akademii Nauk Ukrainy*, (12), 9—28 (in Ukrainian).
- Komarov, P. V. & Thomson, I. N., (2007). Plums and their influence on formation of precious metals mineralization in carbonaceous rocks. *Doklady RAN*, 415(6), 779—781 (in Russian).
- Kopnichev, Yu. F., (1997). Variations of the transverse wave absorption field prior to the strong earthquakes of the Northern Tien Shan. *Doklady RAN*, 356(4), 528—532 (in Russian).
- Korchin, V. A. & Burtnyi, P. A. (2011). Thermo-baric petrophysical modeling of the lithosphere for the parts of the Earth's crust of the Ukrainian Shield with zones of low seismic velocities. *Geofizicheskiy zhurnal*, 33(6) 82—95. doi: <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v33i6.2011.116795> (in Russian).
- Kropotkin, P. N. (1986). Degassing of the Earth and the genesis of hydrocarbons. *Zhurnal Vsesoyuznogo khimicheskogo obshchestva im. D. I. Mendeleeva*, 31(5), 540—547 (in Russian).
- Kuznetsov, O. L. (1981). Nonlinear geophysics. In *Problems of nonlinear geophysics* (pp. 5—20). Moscow: Publ. Department of Scientific and Technical Information All-Union Scientific Research Institute of Nuclear Geophysics and Geochemistry (in Russian).
- Kuprienko, P. Ya., Makarenko, I. V., Starostenko, V. I., Legostoyeva, O. V. & Savchenko, A. S. (2010). Three-dimensional density model of the Earth's crust and upper mantle of the Dnieper-Donets basin and Donbas. *Geofizicheskiy zhurnal*, 32(6), 175—214. doi: <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v32i6.2010.117461> (in Russian).
- Kurlov, M. S. (2003). Hydrogeological essay, gasometry, recent temperature regime. In *Kriviy Rig ultradeep borehole NG-8*. (pp. 301—318). Dnipropetrovsk: KP «Pivdenukrheolohiya» (in Ukrainian).
- Larin, V. N., (2005). *Our Earth (origin, composition, structure and evolution of primordially hydridic Earth*. Moscow: Agar Publ. House (in Russian).
- Larin, V. N., (1973). Planet-chemical consequences of modern cosmogony. *Doklady AS USSR* 210(5), 1193—1196 (in Russian).
- Larin, N. V., Larin, V. N., & Gorbatikov, A. V. (2010). Ring structures caused by deep hydrogen flows. *Degassing of the Earth: geotectonics, geodynamics, geofluids; oil and gas; hydrocarbons and life. Materials of the All-Russian Conference with international participation, dedicated to the centenary of the birth of Acad. P. N. Kropotkin* (pp. 284—287). Moscow: GEOS (in Russian).
- Leonov, M. G., Kolodyazhny, S. Yu., Kunina, N. M., (2000). *Vertical accretion of the earth's crust — structural-substantial aspect*. Moscow: GEOS, 202 p. (in Russian)
- Letnikov, F. A. (2000). Deep Earth Fluids. *Vestnik RFFI*. http://www.csr.spbu.ru/pub/RFBR_publications/articles/geosciences/2000/glubinny%27e_flyuidy%27_Zemli_00_geo.pdf (in Russian).
- Letnikov, F. A. (2001). Ultradeep fluid systems of the Earth and problems of ore formation. *Geologiya rudnykh mestorozhdeniy*, 43(4), 291—307 (in Russian).
- Letnikov, F. A. (1992). *Ultradeep fluid systems of the Earth*. Novosibirsk: Nauka (in Russian).
- Lukin, A. E. (1971). Post-sedimentation alteration of saliferous deposits. In *Halogen formations of Ukraine and associated minerals* (pp. 62—64). Kiev: Naukova Dumka (in Russian).
- Lukin, A. E. (1989). Genetic types of secondary transformations and oil-and-gas accumulation

- in aulacogenic basins. Academy of Sciences of Ukraine. Institute of Geological Sciences, Kiev. Preprint (in Russian).
- Lukin, A. E. (2000). Injections of deep hydrocarbon-polymineral substance in deep-lying rocks of oil-and-gas basins: nature, applied and epistemological significance. *Heolohichnyy zhurnal*, (2), 7—21 (in Russian).
- Lukin, A. E. (1997). *Lithogeodynamic factors of oil-and-gas accumulation in aulacogenic basins*. Kiev: Naukova Dumka (in Russian).
- Lukin, A. E. (2013). Mineral spherules — indicators a specific fluid regime of ore formation and naftidogenesis. *Geofizicheskiy zhurnal*, 35(6) 10—53. doi: <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v35i6.2013.116450> (in Russian).
- Lukin, A. E. (2011). On the nature and prospects of gas presence in low-permeable rocks of the Earth sedimentary cover. *Doklady NANU*, (3) 114—123 (in Russian).
- Lukin, A. E. (1999). On the origin of oil and gas (geosynergic concept of natural hydrocarbon-generating systems). *Heolohichnyy zhurnal*, (1), 30—42 (in Russian).
- Lukin, A. E. (1992). On the commercially gas-containing travertine of Paleozoic. *Doklady RAN*, 326(1), 143—148 (in Russian).
- Lukin, A. E. (2004). On the cross-formational fluid-conducting systems in the oil-and-gas basins. *Heolohichnyy zhurnal*, (3), 34—45 (in Russian).
- Lukin, A. E. (2012). Nature of deep-lying oil and gas reservoirs. *Abstracts of the 1st International Conference «Hydrocarbon potential of the great depths: energy resources of the future — reality and forecast»*, 12—14 June 2012 (pp. 26—28). Baku (in Russian).
- Lukin, A. E. (2004). Problems of naphthidosynergetics — nonlinear geology of oil and gas. *Heolohichnyy zhurnal*, (1), 21—39 (in Russian).
- Lukin, A. E., (2009). Native-metal micro- and nano-inclusions in the formations of oil-and-gas basins — as tracers of super-deep fluids. *Geofizicheskiy zhurnal*, 31(2), 61—92 (in Russian).
- Lukin, A. E., (2006). Native metals and carbides — indicators of composition of deep geospheres. *Heolohichnyy zhurnal*, (4), 17—46 (in Russian).
- Lukin, A. E., (2015). The system «superplume — deep-lying segments of oil and gas basins» — inexhaustible source of hydrocarbons. *Heolohichnyy zhurnal*, (2), 7—20 (in Russian).
- Lukin, A. E. (2014). Hydrocarbon potential of great depths and prospects of its mastering in Ukraine. *Geofizicheskiy zhurnal*, 36(4), 3—23. doi: <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v36i4.2014.112455> (in Russian).
- Lukin, A. E. & Garipov, O. M. (1994). Lithogenesis and oil-and-gas content of the Jurassic sediments in the Mid-latitude Priobye. *Litologiya i poleznye iskopaemye*, (4), 32—42 (in Russian).
- Lukin, A. E. & Goncharov, G. G. (2015). Plosive breccia — lithogeodynamic indicator of the initial stage of salt diapirism. *Heolohichnyy zhurnal*, (4), 7—25 (in Russian).
- Lukin, A. E. & Larin, S. B. (2003). Genetic types of rocks fracturing for deep oil-and-gas complexes. *Heolohichnyy zhurnal*, (3), 9—25 (in Russian).
- Lukin, A. E., Lugovaya, I. P. & Zagnitko, V. N. (1989). The nature of paleogeothermal criteria of oil-and-gas potential. *Izvestiya AN SSSR. Ser. Geol.*, (4), 113—125 (in Russian).
- Lukin, A. E. & Shpak, P. F. (1991). Deep factors of formation of the Pripyat-Dnieper-Donets system of oil-and-gas basins. *Heolohichnyy zhurnal*, (5), 27—38 (in Russian).
- Lukin, A. E., Shumlyansky, V. A., Dyachenko, G. I. & Ivantishina, O. M. (1994). Problems of cold degassing of the Earth. Academy of Sciences of Ukraine. Institute of Geological Sciences. Kiev. Preprint (in Russian).
- Lukin, A. E. & Yuzlenko, A. T. (2011). Discovery of hypogene-metasomatic gas collectors in crystalline rocks of the Ukrainian Shield. *Dopovidi NAN Ukrayiny*, (7), 106—113 (in Russian).
- Nezhdanov, A. A. & Smirnov, A. S. (2014). Surface manifestations of the fluid-dynamic processes of the Earth. *Workshop on the Yamal funnel*. Moscow: Institute of Geocology RAS. <https://www.youtube.com> (in Russian).
- Ninkovich, D. & Hazen, B. (1969). Tephra of the Santorin Island. In *Geology and geophysics of the sea floor* (pp. 333—371). Moscow: Mir (in Russian).
- Novgorodova, M. I. (1983). Native metals in hydrothermal ores. Moscow: Nauka, 287 p. (in Russian).

- Nusipov, E. N., Ospanov, A. B., & Shatsilov, V. I. (2005). High-speed models of the lithosphere of high Asia in the system of geotraverses. *Vestnik NYATS RK*, (2), 109—121 (in Russian).
- Orovetsky, Yu. P., Kobolev V. P. (2006). *Hot belts of the Earth*. Kiev: Naukova dumka (in Russian).
- Pashkevich, I. K. & Bakarzhieva, M. I. (2016). Mafic dykes of Ingul megablock (Ukrainian Shield): relationship of surface and deep structures of the lithosphere, fault tectonics and geodynamics. *Geofizicheskiy zhurnal*, 38(5), 49—66. doi: <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v38i5.2016.107821> (in Russian).
- Krasnyy, L. I., Petrov, O. V. & Blumans, B. A. (Eds.). (2004). Planet Earth. Vol «Tectonics and geodynamics». St. Petersburg: VSEGEI Publ. House (in Russian).
- Pospelov, G. L. (1963). Geological prerequisites to physics of ore-controlling fluid conductors. *Geologiya i geofizika*, (3), 18—38 (in Russian).
- Pospelov, G. L. (1973). *Paradoxes, geological and geophysical nature and mechanisms of metasomatism*. Novosibirsk: Nauka (in Russian).
- Portnov, A. V. (2010). Volcanoes — natural hydrogen fields. *Promyshlennye vedomosti*, (10—12) (in Russian).
- Priester, B. S., Klyushnikov, A. A., Shestopalov, V. M. & Kukhar, V. P. (2013). *Problems of nuclear energy safety: Lessons of Chernobyl*. Chernobyl: Publ. Institute for Safety Problems of NPP NAS Ukraine (in Russian).
- Pushcharovsky, Yu. M. (1993). Nonlinear geodynamics (credo of the author). *Geotektonika*, (1), 3—6 (in Russian).
- Pushcharovsky, Yu. M. (2006). A new-generation of the tectonic-geodynamic model of the Earth: Review of the problem. *Geotektonika*, (3), 3—8. doi:10.1134/S0016852106030010 (in Russian).
- Pushcharovsky, Yu. M. (1998). Seismotomography, tectonics and deep geodynamics. *Doklady RAN*, 360(4), 518—522 (in Russian).
- Ryabchikov, I. D. (2003). High content of nickel in the mantle magmas as evidence of substance migration from the Earth's core. *Doklady RAN*, 389(5), 677—680 (in Russian).
- Chernikov, K. A. (Ed.). (1988). *Glossary of oil and gas geology*. Leningrad: Nedra (in Russian).
- Starostenko, V. I., Gintov, O. B., Pashkevich, I. K., Burakhovich, T. K., Kulik, S. N., Kuprienko, P. Ya., Kutas, R. I., Makarenko, I. B., Orlyuk, M. I. & Tsvetkova, T. A. (2007). Metallogeny of the Ukrainian Shield: regularities of the location of mineral deposits and their relationship with deep structure and dynamics of the lithosphere. *Geofizicheskiy zhurnal*, 29(6), 3—31 (in Russian).
- Starostenko, V. I., Lukin, A. E., Tsvetkova, T. A., Zaets, L. N., Dontsov, V. V. & Savinykh, Yu. V. (2011). On the participation of super-deep fluids in naftidogenesis (according to the study of the unique oil deposits of the White Tiger). *Geofizicheskiy zhurnal*, 33(4), 3—32. doi: <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v33i4.2011.116893> (in Russian).
- Starostenko, V. I., Kuprienko, P. Ya., Makarenko, I. V., Savchenko, A. S. & Legostaeva, O. V. (2015). Density heterogeneity of the Earth's crust of the Ingul megablock of the Ukrainian Shield according to the data of three-dimensional gravity modeling. *Geofizicheskiy zhurnal*, 37(3), 3—21. doi: <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v37i3.2015.111089> (in Russian).
- Starostenko, V. I., Lukin, A. E., Tsvetkova, T. A. & Shumlyanskaya, A. A. (2014). Geofluids and up-to-date of activization of the Ingul megablock of the Ukrainian Shield. *Geofizicheskiy zhurnal*, 36(5), 3—25. doi: <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v36i5.2014.111567> (in Russian).
- Starostenko, V. I., Pashkevich, I. K. & Kutas, R. I. (2002). Deep structure of the Ukrainian Shield. *Geofizicheskiy zhurnal*, 24 (6), 36—48 (in Russian).
- Strakhov, V. N., Starostenko, V. I., Kharitonov, O. M., Aptikayev, F. F., Barkovsky, E. V., Kedrov, O. K. & Palienko, V. P. (1997). Seismic phenomena in the area of the Chernobyl NPP. *Geofizicheskiy zhurnal*, 19(3), 3—15 (in Russian).
- Strakhov, V. N. (2003). How geophysicists must solve linear ill-posed problems. *Geofizicheskiy zhurnal*, 25(1), 11—16 (in Russian).
- Syvorotkin, V. L. (2002). *Deep Earth degassing and global catastrophes*. Moscow: Geoinformatsentr (in Russian).
- Syvorotkin, V. L. (2012). Geological position of El Niño. *Prostranstvo i vremya*, 8(2), 169—173 (in Russian).

- Tretyak, K. R., Maksymchuk, V. Yu. & Kutas, R. I. (Eds.). (2015). *Modern geodynamics and geophysical fields of the Carpathians and adjacent territories*. Lviv: Lviv Politehnika Publ. House (in Ukrainian).
- Timurziev, A. I. (2013). Laws of spatially-stratigraphic allocation of oil and gas accumulations within the West Siberian oil-and-gas bearing province on the basis of submissions about their deep origin and the young age and middle-late Neogene time of formation. *Glubinnaya neft*, 1(11), 1720—1759 (in Russian).
- Ger, M., McAf, R., Woolf, C. (Eds.). (1979). *Glossary of English geological terms* (Vols. 1—3). Moscow: Mir (in Russian).
- Trubitsyn, V. P. & Kharybin, E. V. (2010). Thermochemical mantle plumes. *Doklady RAN*, 435(5), 683—685 (in Russian).
- Usenko, O. V. (2002). Heat flux and contemporary activation of the Donets basin (according to new data). *Geofizicheskij zhurnal*, 24(5), 102—111 (in Russian).
- Khain, V. E. (2003). Earth — a unique planet of the solar system. *Vestnik RAN*, (9), 822—829 (in Russian).
- Haken, G. (1985). *Synergetics*. Moscow: Mir (in Russian).
- Kharakhinov, V. V. & Shlenkin, S. I. (2004). Structure of fluid-conducting systems of oil-and-gas basins. In *New ideas in oil-and-gas geology and geochemistry* (pp. 522—524). Moscow: GEOS (in Russian).
- Tsvetkova, T. A., Bugayenko, I. V. & Zaets, A. N. (2017). Seismic visualization of plumes and super-deep fluids in mantle under Ukraine. *Geofizicheskij zhurnal*, 39(4), 42—54. doi: <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v39i4.2017.107506> (in Russian).
- Chekunov, A. V., Kalyuzhnaya, L. T. & Ryabchun, L. I. (1989). Section M and oil-and-gas content of the Dnieper graben. *Doklady AN USSR*, (12), 19—21 (in Russian).
- Shevchenko, V. I., Arefiev, S. S. & Lukk, A. A. (2011). Subvertical clusters of earthquake hypocenters unrelated to the tectonic structure of the Earth's crust. *Fizika Zemli*, (4), 16—38. doi: 10.1134/S1069351311030050 (in Russian).
- Shestopalov, V. M. & Makarenko, A. N. (2013). Some results of studies developing the V. I. Vernadsky's idea about «gas breathing of the Earth». Paper 1. Surface and near-surface manifestations of anomalous degassing. *Heolohichnyy zhurnal*, (3), 7—25 (in Russian).
- Shestopalov, V. M. & Makarenko, A. N. (2014). Some results of studies developing the V. I. Vernadsky's idea about «gas breathing of the Earth». Paper 2. Depth degassing process in the Earth interior. *Heolohichnyy zhurnal*, (3), 7—28 (in Russian).
- Shestopalov, V. M. (2016). On the possible geological and geophysical risks and prospects of the Chernobyl Exclusion Zone (to the 30th anniversary of the Chernobyl catastrophe). *Geofizicheskij zhurnal*, 38(1), 3—16. doi: <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v38i1.2016.107715> (in Russian).
- Shestopalov, V. M., Lukin, A. Yu., Zgonik, V. A., Makarenko, A. N., Larin, N. V. & Bohuslavsky, A. S. (2018). *Essays on Earth degassing*. Kiev: BADA-TA-Intek servis Publ. (in Russian).
- Shuman, V. N. (2013). Electrodynamics and the response of the geomedium to the effect of external electromagnetic fields. *Geofizicheskij zhurnal*, 35(5), 129—150 (in Russian).
- Shumlyansky V. A. & Bezuglaya M. V. (1995). *Ore potential of salt domes*. Kiev: Publ. Institute of Fundamental Research (in Russian).
- Shcheglov, A. D. (1983). Nonlinear metallogeny. *Doklady AN SSSR*, 271(6), 1471—1474 (in Russian).
- Shcheglov, A. D. (1987). *Major problems of contemporary metallogeny (theory and practice issues)*. Leningrad: Nedra (in Russian).
- Yudovich, Ya. E. & Ketris, M. P. (2011). *Geochemical indicators of lithogenesis (lithological geochemistry)*. Syktyvkar: Geoprint (in Russian).
- Allegre, C. J., Staudacher, T. & Sandra, P. (1987). Rare gas systematics: formation of the atmosphere, evaluation and structure of the Earth's mantle. *Earth and Planetary Science Letters*, 81(2-3), 127—150. [https://doi.org/10.1016/0012-821X\(87\)90151-8](https://doi.org/10.1016/0012-821X(87)90151-8).
- Bachler D., Kohl T. & Rubach L. (2002). Characteristics of upper crust convective flow in the Rhine graben: application to the Gamma fault at Landau (Germany). Proc. Inter conf.: *The Earth's Thermal Field and Related Research Methods* (pp. 10—11). Moscow: RUPF.

- Bennet, I. G. (1963). Geophysics and Human History. *Systematics*, 1, 127—156.
- Caliro, S., Chiodini, G., Moretti, R., Avino, R., Granieri, D., Russo, M. & Fiebig, I. (2007). The origin of the fumaroles of La Solfatara (Campi Flegres, South Italy). *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 71(12), 3040—3055. doi: 10.1016/j.gca.2007.04.007.
- Cande, S. C. & Stegman, D. R. (2011). Indian and African plate motions driven by the push force of the Reunion plume head. *Nature*, 475, 47—52.
- Cathles, L. M., Su, Zhend & Chen, Duofu. (2010). The physics of gas chimney and pockmark formation with implications for assessment of seafloor hazards and gas sequestration. *Marine and Petroleum Geology*, 27(1), 82—91. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2009.09.010>.
- Chiodini, G., Paonita, A., Aluppa, A., Costa, A., Caliro, S., De Marino, P., Acocello, V. & Vandemeulebrouck, J. (2016). Magmas near the critical degassing pressure drive Volcanic unrest towards a critical state. *Nature Communication*, 7, Article number 13712.
- D'Auria, L., Pepe, S., Castaldo, R., Gludicepietro, F., Macedonio, G., Ricciolino, P., ... Zinno, J. (2015). Magma injection beneath the urban area of Naples: a new mechanism for the 2012—2013 volcanic unrest at Campi Flegrei caldera. *Scientific Reports*, (5), 1310. doi: 10.1038/srep13100.
- De Boever, E., Swennen, R. & Dimitrov, L. (2006). Lower Eocene carbonate cemented chimneys Varna, NE Bulgaria): Formation mechanisms and the (a)biological mediation of chimney growth? *Sedimentary Geology*, 185, 159—171. <https://doi.org/10.1016/j.sedgeo.2005.12.010>.
- De Boer, J. Z., Sanders, D. T., Ballard, R. D. (2004). *Volcanoes in Human History. The Far-Reaching Effects of Major Eruptions*. 2004. Princeton University Press.
- Francis, P. (1993). *Volcanoes. A Planetary Perspective*. New York: Oxford University Press inc., 443 p.
- Friedman, J. (1970). Some investigations of the deposition of travertine from Hot Springs— I. The isotopic chemistry of a travertine-depositing spring. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 34(12), 1303—1315. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(70\)90043-8](https://doi.org/10.1016/0016-7037(70)90043-8).
- Galanopoulos, A. G. (1964). Die egyptischen Plagen und der Auszug Israels aus geologischer Sicht. *Z. Alterum.*, 10, 131—137.
- Geyko, V. S. (2004). A general theory of the seismic travel-time tomography. *Geofizicheskiy zhurnal*, 26(2), 3—32.
- Gilat, A. L. & Vol, A. (2005). Primordial hydrogen-helium degassing, an overlooked major energy source for internal terrestrial processes. *HAIT Journal of Science and Engineering B.*, 2(1-2), 125—167.
- Gilat, A. L. & Vol, A. (2012). Degassing of primordial hydrogen and helium as the major energy source for internal terrestrial processes. *Geoscience Frontiers*, 3(6), 911—921. doi:10.1016/j.gsf.2012.03.009.
- Judd, A., Hovland, M. (2007). *Seabed fluid flow — impact on geology, biology and the marine environment*. Cambridge University Press, 400 p.
- Kerr, R. A. (2006). Rising plumes in Earth's mantle: phantom or real? *Science*, 313, 1726. DOI: 10.1126/science.313.5794.1726.
- Kleinekathoefen, U., Tang, K. T., Toerries, J. P. & Yiu, C. L. (1996). Potentials for some rare gas and alkali-helium systems calculated from the surface integral method. *Chemical Physics Letters*, 249(3-4), 257—263. [https://doi.org/10.1016/0009-2614\(95\)01388-1](https://doi.org/10.1016/0009-2614(95)01388-1).
- Larin, N. V., Zgonnik, V., Rodina, S., Deville, E., Prinzhofer, A. & Larin, V. N. (2015). Natural Molecular Hydrogen Seepage Associated with Surficial, Rounded Depressions on the European Craton in Russia. *Natural Resources Research*, 24(3), 369—383. doi: 10.1007/s11053-014-9257-5.
- Lindenfeld, M., Rumpker, G., Koehn, D. & Batte, A. (2012). Fluid-triggered earthquake swarms in the Rwenzori region, East African Rift — Evidence for rift initiation. *Tectonophysics*, 566-567, 95—104. doi: 10.1016/j.tecto.2012.07.010.
- Loseth, H., Wensaas, L., Arnsen, B., Hanken, N.-M., Basire, Ch. & Graue, K. (2011). 1000 m long gas blow-out pipes. *Marine and Petroleum Geology*, 28(5), 1047—1060. doi:10.1016/j.marpetgeo.2010.10.001
- Müller, R. D., Rouer, J. Y. & Lowver, L. A. (1993). Revised plate motions relative to the hotspots from combined Atlantic and Indian Ocean hot-spot tracks. *Geology*, 21(3), 275—278. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2012.03.009>.

- doi.org/10.1130/0091-7613(1993)021<0275:rpmrtt>2.3.co;2.
- Morgan, W. J. (1971). Convection plumes in the lower mantle. *Nature*, 230, 42—43. <https://doi.org/10.1038/230042a0>.
- Morgan, W. J. (1972). Deep mantle convection plumes and plate motions. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 56, 203—213.
- Moss, J. L. (2010). *The spatial and Temporal distribution of pipe and pockmark formation*. PhD. Thesis, Cardiff University. 314 p. <https://orca.cf.ac.uk/54111/1/U511205.pdf>.
- Murakami, M., Hirose, K., Yurimoto, H., Nakashima, S. & Takafuji, N. (2002). Water in Earth's lower mantle. *Science*, 295(5561), 1885—1887. DOI: 10.1126/science.1065998.
- Nittmann, J., Daccord, G. & Stanley, H. (1985). When do "viscous fingers" have fractal measurement? *Nature*, 314, 141—144.
- Nuccio, P. M. & Paonita, A. (2000). Investigation of the noble gas solubility in H₂O and CO₂ bearing silicate liquids at moderate pressure: the extended ionic porosity (EIP) model. *Earth and Planetary Science Letters*, 183(3-4), 499—512. [https://doi.org/10.1016/S0012-821X\(00\)00297-1](https://doi.org/10.1016/S0012-821X(00)00297-1).
- Ohtani, E., Shibazaki, Y. & Terasaki, H. G. (2009). Distribution of Hydrogen in the Deep Earth and its Role in Earth's dynamics (invited). American Geophysical Union, Fall Meeting, abstract V14C-01.
- Okuchi, T. (1997). Hydrogen Partitioning into Molten Iron at High Pressure: Implications for Earth's Core. *Science*, 278(5344), 1781—1784. DOI: 10.1126/science.278.5344.1781.
- Pilchen, R. & Argent, J. (2007). Mega-pockmarks and linear pockmark trains on the West African continental margin. *Marine Geology*, 244(1-4), 15—32. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2007.05.002>.
- Rampino, M. & Ambrose, S. H. (2000). Volcanic Winter in the Garden of Eden: The Toba Super eruption and Late Pleistocene Human Population Crack. Geological Society of America, Special Paper 345, P. 71—82.
- Rhee, L., Gasparini, F. M. & Bishop, D. (1989). Finite-size scaling of the superfluid density of He⁴ confined between silicon wafers. *Physical Review Letters*, 63(4), 410. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.63.410>
- Ross, J. A., Peakall, J. & Keevil, G. M. (2014). Facies and flow regimes of sandstone — hosted columnar intrusions: Insights from the pipes of Kodachrome Basin State Park. *Sedimentology*, 61(6), 1764—1792. <https://doi.org/10.1111/sed.12115>.
- Saunders, M., Jimenez-Vazquez, H. A., Cross, R. J., Mroczkowski, S., Freedlerg, D. I. & Anet, F. A. L. (1994). Probing the interior of fullerenes by ³He NMR spectroscopy of endohedral ³He@C₆₀ and ³He@C₇₀. *Nature*, 367, 256—258.
- Simkin, T., Under, J. D., Tilling, R. I., Vogt, P. R. & Spall, H. (1994). This Dynamic Planet, World Map of Volcanoes, Earthquakes, Impact Craters and Plate Tectonics: Explanatory Notes. US Geological Survey in cooperation with the Smithsonian Institution.
- Syvorotkin, V. L. (2010). Hydrogen degassing of the Earth: Natural disasters and the biosphere. In *Man and the Geosphere* (pp. 307—347). New York: Nov Science Publishers.
- Van Hinsbergen, D. J. J., Steinberger, B., Doubrovine, P. V., & Gassmöller, R. (2011). Acceleration and deceleration of India — Asia convergence since the Cretaceous: robes of mantle plumes and continental collision. *Journal of Geophysical Research*, 116, B06101. doi: 10.1029/2010JB 008051.
- Vos, W. L., Finger, L. W., Hemley, A. J. & Mao, N. K. (1996). Pressure dependence of hydrogen bonding in a novel H₂O—H₂ clathrate. *Chemical Physics Letters*, 257(5-6), 524—530. [https://doi.org/10.1016/0009-2614\(96\)00583-0](https://doi.org/10.1016/0009-2614(96)00583-0).
- Wilston, J. T. (1963). A Possible origin of the Hawaiian islands. *Canadian Journal of Physics*, 41(6), 863—870, <https://doi.org/10.1139/p63-094>.
- Zarifi, Z. & Havskov, J. (2003). Characteristics of dense nests of deep and intermediate-depth seismicity. *Advances in Geophysics*, 46, 237—276. [https://doi.org/10.1016/S0065-2687\(03\)46004-4](https://doi.org/10.1016/S0065-2687(03)46004-4).
- Zgonnik, V., Beaumont, V., Deville, E., Larin, N. V., Pillot, D., Farrell, K. M. (2015). Evidence for natural molecular hydrogen seepage associated with Carolina bays (surficial, ovoid depressions on the Atlantic Coastal Plain, Province of the USA. *Progress in Earth and Planetary Science*, 2:31. doi:10.1186/s40645-015-0062-5.