

Кольцевые тектономагматогенные структуры в зонах повышенной геодинамической нестабильности — первоочередные объекты поисков месторождений водорода

А.Е. Лукин¹, В.М. Шестопапов^{1,2}, 2021

¹Институт геологических наук НАН Украины, Киев, Украина

²Научно-инженерный центр радиогидрогеоэкологических полигонных исследований НАН Украины, Киев, Украина

Поступила 9 апреля 2021 г.

На основе сопоставления миграционной активности углеводородов, гелия и водорода обоснованы типы пород-покрышек для скоплений (залежей) водорода, которые наиболее способствуют его частичному экранированию при устойчивой подпитке. Такими породами-покрышками являются существенно смектитовые глины, чистая (без включений) соль на глубинах более 1—2 км, нетрещиноватые песчаники на глубинах более 4 км, эффузивы и гипабиссальные интрузивные породы, а также породы фундамента, не охваченные процессами разуплотнения. Эндогенный водород рассматривается в качестве главного фактора формирования диссипативных структур. Возникновение водородных, углеводородных и рудных макроскоплений представляет собой своего рода энергетические, информационно-геохимические флуктуации — промежуточные состояния диссипативных структур, подчиненные планетарным процессам тепломассопереноса, что обусловлено глубинной дегазацией Земли. В этой связи природу геодинамической неустойчивости (активизации вертикальных движений, сдвиговых смещений, растягивающих и сжимающих напряжений) можно рассматривать как нарастающую последовательность диссипативных процессов, связанных с энергетической перколяционной ролью эндогенного водорода. В иерархии кольцевых структур (КС) от элементарных (западных до крупных — в десятки километров в диаметре) особое внимание заслуживают структуры типа Сребненской в Днепровско-Донецкой впадине и Калужской в северо-западной части периклинали Воронежской антеклизы, генетически связанные со взрывными или вулканическими кальдерами и характеризующиеся древним заложением (протерозой) и длительным развитием (вплоть до нео- и актуотектонических этапов). На интенсивную водородную дегазацию в Сребненской КС указывает наличие микро- и нановключений в черносланцевых доминикойдных породах продуктивных горизонтов в виде частиц самородных металлов, включая оксифильные элементы Al, Zn, W и др., природных сплавов и интерметаллидов — трассеров восходящих потоков глубинных восстановленных флюидов. Есть основание предполагать существование в пределах Сребненской КС крупного водородного либо гибридного гелиево-водородного месторождения (группы месторождений) в породах нижнего визе, нижнего башкира и нижней перми, экранированного нижнепермскими соленосными отложениями.

Ключевые слова: глубинный водород, углеводороды, кольцевые структуры, Сребненская, Калужская структуры, месторождения водорода.

Введение. Дегазация Земли (ДЗ) является главным фактором образования полезных ископаемых, включая, наряду с различными газами, нефти, каустобиолиты, эндогенные и, частично, экзогенные руды, некоторые минеральные воды и т.д. Участвуя в их формировании, водород в то же время кардинально отличается от

других видов полезных ископаемых, включая различные газы. Гелий с этой точки зрения занимает промежуточное положение между водородом и другими газами. Совместно с водородом он активно участвует в разуплотнении вмещающих пород и деструкции земной коры (имплантация легких газов в «горные материалы», по И.Л. Гуфельду [2007]).

Огромный водородный потенциал земных недр в свете результатов современных геолого-геофизических, геохимических, петрологических исследований (работы В.Н. Ларина, Н.Л. Добрецова, Ф.А. Летникова, А.А. Маракушева, И.Д. Рябчикова, Г.И. Войтова, И.Л. Гуфельда, С.П. Левшуновой, В.Л. Сывороткина, А. Gilat и A. Vol, N. Smith и др.) постепенно становится реальностью. Несмотря на фрагментарный характер изученности водородной ДЗ, имеющихся данных вполне достаточно, чтобы рассматривать ее как наиболее универсальный (по сравнению с другими генетическими типами ДЗ) глобальный процесс. Эндогенный водород играет определяющую, потенциал задающую роль как в «горячей», так и в «холодной» (в понимании П.Н. Кропоткина) ДЗ, которые различаются не столько температурой, сколько окислительно-восстановительными параметрами [Лукин и др., 1994б; Шестопалов и др., 2018].

«Холодная» ДЗ характеризуется геохимическими процессами, в которых участвуют восстановленные (на водородно-углеводородной основе) флюиды, тогда как основным фактором «горячей» ДЗ является (в условиях высоких температурных градиентов) окисление водорода.

Наиболее интенсивным сжиганием эндогенного водорода характеризуется вулканизм, особенно эксплозивный. Тем не менее, согласно [Портнов, 2005; Шестопалов и др., 2018], именно такие вулканы, для которых характерны взрывные кратеры-кальдеры, являются наиболее перспективным типом месторождений водорода. Отдавая должное этой идее, тем не менее следует отметить, что освоение таких месторождений — достаточно сложная про-

блема, которая вряд ли осуществима в обозримом будущем. Не отрицая перспективности «перехвата» вулканогенных потоков глубинного водорода, что к тому же перспективно с точки зрения предотвращения катастрофических извержений, по нашему мнению, все же на начальном этапе освоения неисчерпаемых запасов глубинного водорода следует сосредоточиться на процессах водородонакопления, связанных с «холодной» ДЗ, которая определяет парагенетические ассоциации углеводорода, гелия и водорода. Впрочем, для Украины направление освоения источников водорода, связанных с современным вулканизмом, не актуально.

Специфика понятия «месторождение» применительно к водороду. Характеризуя перспективы освоения водородного потенциала земных недр, целесообразно разобраться с дефинициями. Согласно [Геологический ..., т. I, 1978, с. 423], месторождение — это природное скопление полезного ископаемого, «которое в количественном и качественном отношении может быть предметом промышленной разработки при данном состоянии техники и экономики». Сам термин «месторождение» является не вполне корректным. Далеко не все полезные ископаемые «рождены» на месте их залегания. В строгом значении этот термин применим к твердым полезным ископаемым, причем далеко не ко всем, а к таким, как бокситы, каолин, уголь, стратиформные руды и т. п. К газам же и особенно к водороду этот термин применим лишь сугубо условно и корректнее было бы применить термин «местоскопление» или «газоаккумулирующая система».

Природа ловушек и резервуаров скоплений водорода. Вопрос о реальности формирования скоплений («залежей») водорода остается открытым прежде всего благодаря практически неизученным закономерностям его миграции, экранирования и аккумуляции в геологических формациях. Ключевым является вопрос о том, действуют ли в данном случае природные факторы экранирования и, в частности, существуют ли надежные покрывки

для аккумуляции водорода в природных резервуарах и удерживающих их (хотя бы в режиме перманентного восполнения) по крайней мере на десятки—сотни лет. Для гелиеносных газов такие условия существуют [Якуцени, 1968; Лукин и др., 2016], что позволяет предполагать и для водорода возможность природной аккумуляции.

Специфической особенностью водорода является активное взаимодействие со средой миграции и аккумуляции.

Если исходить из возможной аналогии закономерностей аккумуляции метана, гелия и водорода, то не требует особой аргументации необходимость наиболее жестких условий при формировании скопленных водородсодержащих газов. Диапазон экранирующих свойств пород-покрышек очень велик. Так, для Днепровско-Донецкой впадины (ДДВ) [Гавриш и др., 1989; Атлас ..., 1981] в зависимости от состава глинистых минералов, степени катагенетического уплотнения, а также гранулометрии и других структурно-текстурных особенностей максимальная величина диаметра пор варьирует от 10 до $\leq 0,01$ мкм, проницаемость по газу (метану) — от $1,02 \cdot 10^{-17}$ до $1,02 \cdot 10^{-21}$ м², давление прорыва сквозь насыщенную керосином породу — от 0,5 до $\geq 12,0$ МПа. Наиболее надежными покрытиями для газовых залежей со сверхгидростатическим давлением являются глины с преобладающим содержанием смектитовых (монтмориллонит, смешаннослойные минералы типа слюда-монтмориллонит). Согласно данным Г.Г. Булатова по подземному хранению водорода, коэффициенты фильтрационного сопротивления при фильтрации H₂ значительно ниже, чем для CH₄, а эффект проскальзывания H₂ исчезает при $P \geq 10$ кг/см². Это, наряду с опытом закачки техногенного водорода в поровые коллекторы и его хранения в подземных газохранилищах (доклады на Международной конференции «Технологии хранения водорода», Москва, 28—29 октября 2009 г.), позволяет предполагать возможность формирования скопленных («залежей») водорода в песчаных пластах, экранируемых покрытиями класса А —

существенно смектитовыми глинами. Их экранирующая роль для водорода обусловлена не указанными фильтрационными параметрами (размеры поровых каналов и т. д.) (для H₂ микро- и нанопористость это не экран), а гидрофильностью разбухающих смектитовых фаз и высоким содержанием связанной воды, в которой водород весьма слабо растворим.

Как показали исследования в области ядерно-физического материаловедения, их диффузия в различные материалы обуславливает неустойчивость последних [Гуфельд, 2007; Гуфельд, Матвеева, 2011]. Аналогичный, но еще более многообразный (структурные перестройки и аморфизация кристаллического минерального вещества, возникновение газовой пористости и т. д.) эффект оказывает имплантация водорода и гелия в породы (и другие минеральные агрегаты) литосферы, что было подтверждено как геофизическими, так и экспериментальными данными. Здесь следует отметить, что приведенные в упомянутых работах данные свидетельствуют о ведущей роли водорода (при участии гелия) в указанных процессах. Именно его внедрение в кристаллические решетки различных минералов (кварц, полевые шпаты, пироксен, оливин, слюды и т. д.) вызывает лабильность и разрушение структуры. Здесь следует подчеркнуть иерархичность проявлений различных эффектов гелиево-водородной имплантации — от нано- и микроуровня (разнообразные дефекты кристаллических решеток различных минералов, кластеры и частицы самородных металлов и природных сплавов, силицидов, карбидов, силикатные и силикатно-металлические сферулы) до явлений дробления и брекчирования магматических, метаморфических и осадочных пород в широком диапазоне их природы и размерности (включая блоки кристаллического фундамента, интрузивные и вулканогенные тела, карбонатные рифы и т. п.). В контексте рассматриваемой в данной статье проблемы особый интерес представляют такие проявления структурной неустойчивости горных пород, как саморазрушение

керна глубоких скважин при его подъеме на поверхность. Согласно теоретически и экспериментально обоснованному мнению И.Л. Гуфельда [2007], это обусловлено не тектоническим напряжением и другими тектоно-физическими нагрузками (общепринятая точка зрения), а имплантацией гелия или водорода. Явление саморазрушения (дискование, дробление, дезинтеграция) широко проявляется в центральном сегменте ДДВ над апикальной частью мантийного диапира. Его интенсивность и, вместе с тем, неравномерность возрастают с глубиной (рис. 1).

Дискование керна является признаком так называемых суперколлекторов [Жабрев, 1982], которые впервые были открыты в известняках и доломитах каменноугольных и нижнепермских карбонатных комплексов Прикаспийской впадины (Оренбургское, Карачаганак и другие газоконденсатные и нефтяные месторож-



Рис. 1. Разрушение керна очень прочных карбонатных пород на тонкие пластинки с промазками конденсата и легкой нефти (ДДВ, скв. 17-Семиренковская, интервал глубин 6186,1—6193,6 м).

Fig. 1. Destruction of core samples of very strong carbonate rocks into thin plates lubricated with condensate and light oil (DDB, well 17-Semirenski, depth interval 6186.1—6193.6 m).

дения). Резко выраженная неравномерность распределения интенсивности дискования и дробления легко объяснима неравномерностью насыщения пород легкими газами и, прежде всего, водородом, абсорбция которого определяется литологическими и петрофизическими факторами. Феномен суперколлекторов, как отмечалось, наиболее интенсивно проявляется в породах нефтегазоносных рифогенно-карбонатных комплексов в широком литофациальном диапазоне — от зарифовых и ядерно-рифовых до предрифовых и депрессионных, включая уолсортские фации [Лукин и др., 2016]. При этом последним свойственна аномально высокая гелиеносность [Лукин и др., 2012а], тогда как в целом ведущую роль играет избыточное депонирование водорода в карбонатах [Левшунова, 1994].

Кардинальное отличие пенетрационных свойств H_2 от других газов, в частности такого показателя, как зависимость коэффициента динамической вязкости от температуры (рис. 2), дает основание предполагать, что формирование скоплений водорода в природных резервуарах требует гораздо более высоких изолирующих свойств газопоров, чем углеводородно-газовые и, тем более, газоконденсатные залежи. Таким газопором является чистая (без сульфатных, карбонатных и прочих включений) каменная соль на глубинах свыше 1—2 км. Этим условиям удовлетворяет нижнепермская соленосная формация, толщина которой в центральной части ДДВ превышает 1000 м. При этом ее нижняя часть в объеме никитовской и славянской свит представляет собой фациально-циклическое чередование галитовых пачек с сульфатными, карбонатными и песчаными породами-коллекторами, а верхняя — в объеме краматорской свиты — практически полностью состоит из соли. В верхней части этой существенно соляной субформации присутствуют калийно-магнезиальные соли, что еще более повышает газопорные свойства краматорской свиты, играющей роль главного газопора. Здесь следует отметить, что в подошве кра-

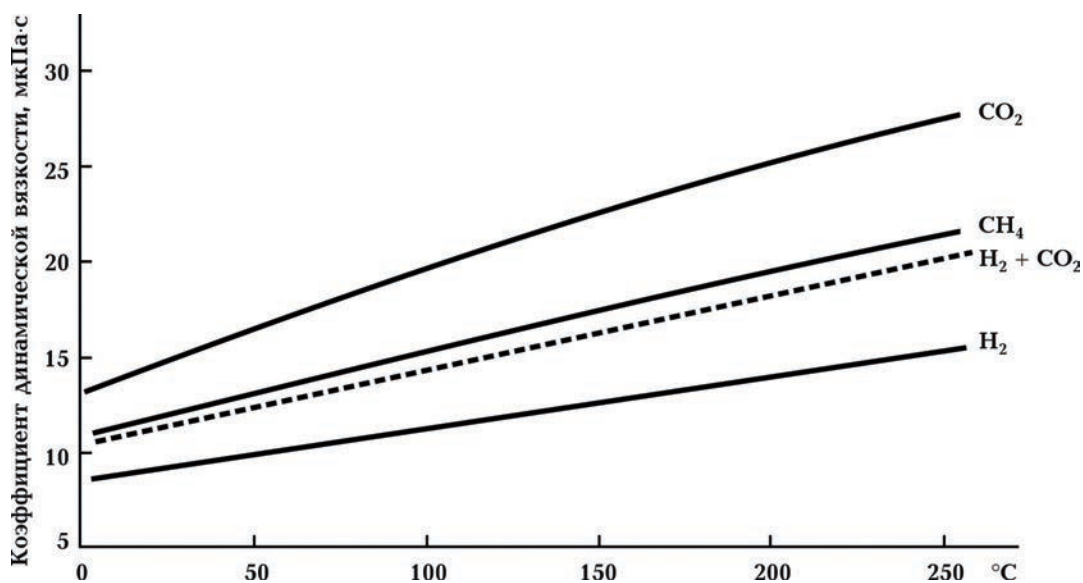


Рис. 2. Зависимости коэффициента динамической вязкости от T при $P_{ат}$ (по К.С. Басниеву, 2009).

Fig. 2. Dependences of the dynamic viscosity coefficient on T at $P_{ат}$ (according to K.S. Basniev, 2009).

маторской свиты присутствует пачка (до 30 м) песчано-карбонатных коллекторов (аналоги белбасовского горизонта северо-западных окраин Донбасса), с которыми может быть связана водородная или водородно-метановая залежь. Другие залежи могут быть приурочены к карбонатным коллекторам, экранируемым соляными пачками славянской и никитовской свит, а также песчаным пластам картамышской свиты и верхнего карбона.

Однако не следует ограничивать интервал возможного присутствия водородсодержащих газовых залежей в ДДВ нижней пермью — верхним карбоном. Перспективны в этом отношении песчаные и карбонатные породы нижнего карбона, а также вулканиты верхнего девона. Здесь следует учесть относительное разнообразие типов подземных хранилищ техногенного водорода, включающих, согласно К.М. Басниеву (2016), «истощенные месторождения углеводородов (УВ), водоносные пласты, подземные солевые отложения, многолетнемерзлые породы, подземные полости и каверны, пещеры, разрабо-

танные шахты». Это позволяет рассчитывать на относительное многообразие морфогенетических типов ловушек (резервуаров) H₂-содержащих газов, несмотря на кардинальное несоответствие характерных времен существования водородных и углеводородных залежей в этих ловушках.

Определяя критерии прогноза и поисков водородных месторождений, необходимо сначала выяснить их специфику по сравнению с месторождениями других газов. Аномально высокие (по сравнению с метаном, а также газообразными УВ, CO₂, N₂) пенетрационные свойства позволяют предполагать смещение водородоносности в область так называемых плотных коллекторов (tight reservoirs) с низкими и весьма низкими фильтрационно-емкостными свойствами, диапазон которых соответствует их V—VII классам [Геологический ..., 1978; Словарь ..., 1988]. Более того, значительная часть водорода абсорбирована породами, которые относятся к покрывкам классов С—Е. Соотношение водорода в составе свободного газа в эффективно-поровом коллекторе и в виде газа, депони-

рованного в малопроницаемых породах зависит от литологии (максимально — в гидрофобизованных карбонатных породах, минимально — в гидрофильных глинах), природы и структуры порового пространства, соотношения гидрофильности и гидрофобности. Следует ожидать, что в трехслойном газовом резервуаре максимум содержания водорода должен быть приурочен к так называемым ложным покрышкам — гидрофобизованным (повышенные сопротивления на каротажных диаграммах) породным телам между эффективно-поровыми коллекторами и истинной покрышкой [Лукин и др., 2012а].

О несовпадении максимумов накопления CH_4 и H_2 в газовой залежи свидетельствует сопоставление режимов отбора-закачки CH_4 и H_2 на Якшуновском подземном хранилище газа (ПХГ) (рис. 3), которое вместе с Калужским ПХГ приурочено к Калужской КС (см. ниже). Для успешного освоения водородных месторождений необходимы специальные промыслово-геологические, промыслово-геофизиче-

ские, геохимические и петрофизические исследования, включая ревизию данных по наиболее перспективным на водород газовым и газоконденсатным месторождениям (в восточном нефтегазоносном регионе это Шебелинское, Западно-Крестищенское, Ефремовское, Яблуновское и др.).

Надежно экранировать восходящие потоки водорода и служить покрывкой водородно-газовых скоплений, как уже отмечалось, могут прежде всего нетрещиноватые породы с практически непроницаемой матрицей. Помимо галогенных пород (пластовая и штоковая каменная соль на глубинах свыше 1000 м с реологическими структурно-текстурными признаками), это катагенные кварцитопесчаники на глубинах свыше 4 км, эффузивы и гипабиссально-интрузивные породы (долериты, габбро-диабазы), а также породы фундамента, не затронутые метасоматическими процессами разуплотнения (т. е. не превращенные в тектониты и метасоматиты). Именно такие природные минеральные агрегаты можно рассматривать как твердые тела. В

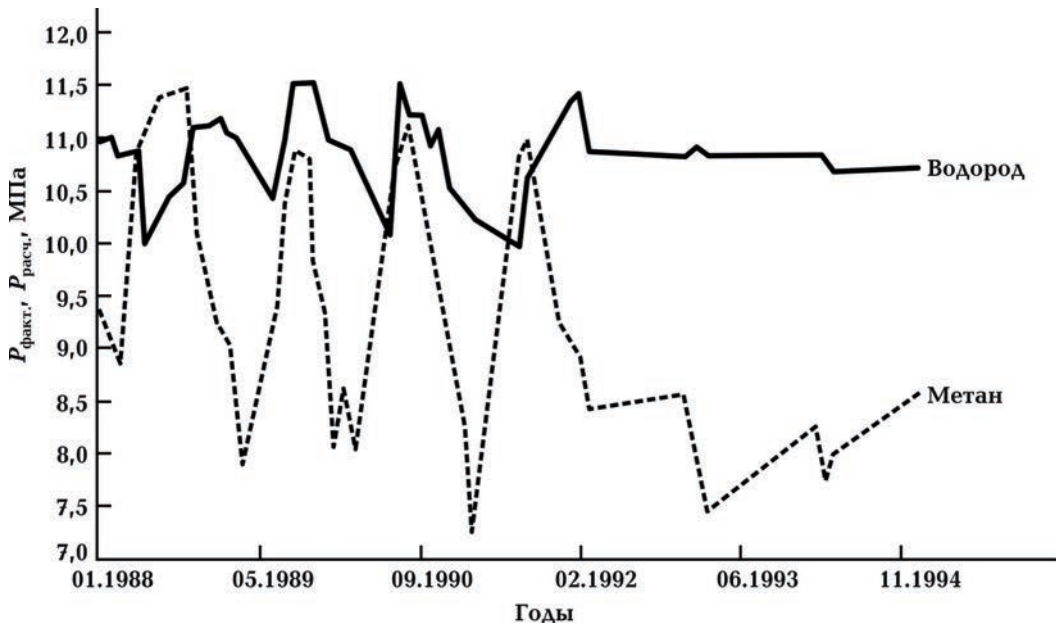


Рис. 3. Отбор — закачка CH_4 и H_2 на Якшуновском ПХГ (по К.С. Басниеву, 2009).

Fig. 3. Withdrawal — injection of CH_4 and H_2 at Yakshunovo UGS facility (according to K.S. Basniev, 2009).

качестве косвенного показателя их высоких газупорных (и, в частности, водородупорных) свойств можно рассматривать результаты экспериментов И.М. Свореня, свидетельствующие о том, что «водород в любой форме не проникает в чистые бездефектные ... кристаллические материалы» [Сворень, 1985, с. 21]. Из всех «кристаллических материалов» (в данном случае — природных кристаллических агрегатов) к бездефектным приближается реологически перекристаллизованная под действием давления и повышенных температур соль.

Тектоноформационные факторы формирования водородного месторождений в Мали. Несмотря на огромное количество установленных разнообразных природных водородопроявлений, месторождение водорода в указанном смысле пока известно только в африканском государстве Мали (50 км севернее г. Бамако) [Briere et al., 2016; Prinzhofner et al., 2018; Шестопалов и др., 2018]. Здесь возле поселка Буракебугу с целью его водоснабжения была пробурена скважина глубиной 110 м, подающая на протяжении последних 5 лет газ с содержанием водорода 98 %, который используется для производства электроэнергии. Суббассейн Тамбура, к которому приурочено это пока единственное месторождение водорода, соответствующее приведенному определению, судя по имеющимся далеко не полным геологическим характеристикам, сложено мощной толщей верхнепротерозойских отложений — чередованием песчаных и грубообломочных пород с мергелями, известняками и пластовыми долеритовыми интрузиями. В формационном отношении — это аналоги рифея авлакогенов Восточно-Европейской платформы, в частности, тех из них, которые связаны с деструктивно-тектоническими процессами в пределах Сарматского щита (в пределах Африканской платформы эта тектоническая деструкция проявилась гораздо интенсивнее — с большим количеством относительно небольших террейнов и интенсивным трапповым магматизмом). В литогеохимическом отношении — это сочетание рифейских тафрогенных

(формирование рифейских грабенов) и вендских трапповых формаций [Лукин, 1997]. Они, как и фациально-циклические соленосные формации, характеризуются многослойными резервуарами, коллекторы в которых представлены в различной степени водоносными песчаниками и грубообломочными породами, покрывки — пластовыми интрузиями долеритов и диабазов (на территории Украины сходные тектоно-магматогенные структуры присутствуют в системе грабенов Полесско-Днестровского перикратона и Днепровско-Донецкого авлакогена — ДДА).

Достоверная модель водородного месторождения в Мали в известных нам публикациях отсутствует. Можно предположить, что покрывками являются слабо проницаемые долеритовые пластовые интрузии (силлы, покровы), а коллекторами — экранируемые долеритами песчаники и гравелиты. О миграции водорода через долериты свидетельствуют аномалии дегазирующего водорода, выявленные в западинах, расположенных на земной поверхности над долеритами. При этом водородные скопления могут быть приурочены к водоносным пластам. В отличие от обычных газовых месторождений (CH_4 с тем или иным содержанием более тяжелых газообразных УВ , CO_2 , N_2 , He), скопления водорода, учитывая высокие темпы его диффузии, а главное — исключительные пенетрационные способности (миграция по микро- и нанотрещинам и открытым поровым каналам), дают основание предполагать, что эта водородно-газовая система является динамической и скопления (но не залежи в прямом смысле этого старого термина) находятся в состоянии перманентного восполнения. Как уже отмечалось [Шестопалов и др., 2018], о перманентной подпитке этого месторождения глубинным водородом свидетельствуют присутствие примеси CO — весьма активного геохимического реагента, а также изотопно-геохимические данные [Briere et al., 2016]. Однако в указанной статье в качестве наиболее вероятного источника водорода без каких-либо доказательств предполагается водная

серпентинизация ультраосновных пород. Косвенным подтверждением глубинной природы водородного феномена в Мали являются данные тектоно-геодинамических исследований [Шестопалов и др., 2018], согласно которым северо-западная Африка является регионом современной тектоно-термальной активизации, обусловленной активным плюмом. Это позволяет предположить суперглубинный источник водорода, связанный со слоем D'' и жидким ядром [Шестопалов и др., 2018].

Для прогнозирования месторождений водорода кардинальным является ответ на вопрос: к какому типу ловушки (природного резервуара) приурочено месторождение в Мали. Учитывая его связь с верхнепротерозойской трапповой формацией, можно предположить, что это — локальная вулкано-тектоническая структура. Именно такие структуры — локальные области сложного строения, «размеры которых варьируют от десятков км до 100—150 км и более» — выделяются «на территории сравнительно однородного по структуре базальтового поля со сложной вулканотектонической структурой» [Рябов, Лапковский, 2008, с. 490]. У наиболее крупных из них, играющих роль рудных узлов (это, в частности, Норильский, Талнахский, Южно-Норильский, Веткинский и др.), металлогения и геохимия свидетельствуют, как известно, о связи с суперглубинными флюидами. Такие узловые вулканотектонические структуры, согласно общепринятым представлениям, тяготеют к краевым частям «базальтового поля платформы», располагаясь в зонах пересечения региональных долгоживущих глубинных разломов. Их ключевым сегментом являются крупные кальдеры, взрывные кольцевые структуры, вулканоплутоны и диатремы, формирование и активизация которых обуславливает декомпрессионное стягивание (термин Г.Л. Поспелова) глубинных флюидов, с разгрузкой которых связаны процессы метасоматоза и рудогенеза, а также нефтидогенеза. Последний представлен здесь как битумными и рудобитумными, так и нефтяными и газовыми

месторождениями, включая такие углеводородные гиганты, как Куюмбинское, Юрубченское и др.

Именно эти тектоно-магматические сквозьформационные флюидопроводящие системы наиболее полно воплощают понятие трубы дегазации (в понимании П.Н. Кропоткина), работающие в режиме «горячей» и «холодной» дегазации.

Восходящие потоки глубинных флюидов и их разгрузка возможно могут инициироваться также крупными астроблемами, но лишь в тех случаях, когда импактное событие происходит в зоне значительной плюмтектонической активности.

Эндогенный водород — главный фактор формирования диссипативных структур. Фундаментальным отличием водорода — мощного теплоносителя, главного фактора энергетической перколяции [Горяинов, 2011] от N₂, CO₂ и других газов — является еще не получившая должной оценки роль «легких газов» в структурообразовании.

Подавляющее большинство геологических структур (систем) являются диссипативными, в понимании И.Р. Пригожина, и их саморазвитие сопровождается скачкообразными изменениями состояния [Николис, Пригожин, 1977; Пригожин, Стенгерс, 1986]. Ярким примером таких структур (систем) являются нефтегазоносные бассейны (НГБ) и их сегменты (от суббассейнов до локальных структур-месторождений). Сами по себе углеводородные и рудные макроскопления (месторождений, залежей) представляют собой аномальные с точки зрения термодинамики образования — своего рода энергетические и иноморфационно-геохимические флуктуации в литосфере. Возникновение этих энергетических аномалий соответствует положенному И.Р. Пригожиным в основу термодинамики неравновесных открытых систем принципу наименьшего производства энтропии. Их можно рассматривать как флуктуации — промежуточные состояния диссипативных структур. Возникновение НГБ на основе осадочных бассейнов и (или) кристаллических массивов и их дальней-

шая эволюция полностью соответствует поразительно емкому названию одной из основополагающих монографий И.Р. Пригожина (в соавторстве с Г. Николисом): «Самоорганизации в неравновесных системах. От диссипативных структур к упорядоченности через флуктуации» [выделено авторами — А.А., В.Ш.].

Ярким проявлением диссипативного характера НГБ и их сегментов (вплоть до локальных структур, месторождений и отдельных залежей) является дискретное распределение в 134 НГБ Мира самых различных их количественных показателей: от гипсометрической локализации продуктивных горизонтов, геологических параметров НГБ (мощности осадочного чехла, объемы НГБ и т. п.) и их литологического состава (содержание песчаников, карбонатных пород, черных сланцев и т. п.) до фазово-геохимических параметров, количества месторождений-гигантов, ресурсов и запасов [Лукин, 2004]. Эта фундаментальная закономерность, во-первых, подтверждает диссипативный характер НГБ и их сегментов различного порядка как геосистем, а во-вторых, свидетельствует о связи их формирования и развития с планетарными процессами тепломассопереноса, т. е. с глубиной ДЗ.

НГБ, которые возникают при взаимодействии ДЗ с тектоносферой, являются ее основными очагами как в кристаллическом фундаменте («гранитном слое»), так и вулканогенно-осадочной оболочке (стратосфере). Главным энергоносителем и основным геохимическим и петрологическим фактором является водород благодаря его уникальным физическим свойствам и универсальной химической активности. С восходящими потоками эндогенного водорода связаны, в частности, многие западины и подзападинные трубы, которые пользуются широким распространением на платформах [Шестопалов и др., 2018] и могут рассматриваться как элементарные диссипативные структуры. Их размеры и морфологические особенности (в частности — степень выраженности труб, которые можно рассматривать как элементар-

ные трубы водородной дегазации) разнообразны и определяются конкретными геологическими условиями.

В сложнопостроенных структурах, а это практически все крупные рудные, нефтяные, а также газовые месторождения, ведущая роль восходящих потоков эндогенного водорода маскируется теми процессами, которые он инициирует (вулканизм, галокинез, разнообразные формы разуплотнения породных массивов, гипогенный аллогенез). Согласно [Larin et al., 2015; Larin et al., 2015], элементарные структуры собственно водородной дегазации «были открыты недавно в центре континентов». Структуры, дегазирующие водород, представляют собой небольшие понижения рельефа округлой формы диаметром от сотни метров до нескольких километров. Здесь, однако, следует уточнить, что сами эти структуры известны давно. Они детально охарактеризованы в монографии [Шестопалов и др., 2018]. Ячеистый характер их распространения на суше (см. рис. 4.2 и др. в указанной монографии) — яркое подтверждение их диссипативной природы. Это — современные процессы самоорганизации геоинформационной среды, обусловленные водородной дегазацией.

В последние годы эти процессы привлекают особое внимание в связи с геологическими проблемами подземного хранения газа в России и других странах [Казанкова, Корнилова, 2009]. Составленная в Институте проблем нефти и газа РАН геодинамическая карта Восточно-Европейской платформы с целью выбора территорий, благоприятных для размещения ПХГ, представляет сложную мозаику участков с различной степенью геодинамической стабильности (от условно стабильных до повышенной геодинамической неустойчивости) (рис. 4). Природа геодинамической неустойчивости различна и обусловлена: а) вертикальными движениями; б) сдвиговыми смещениями; в) растягивающими напряжениями; г) напряжениями сжатия, а для зоны максимальной неустойчивости — сейсмической

активностью. Указанная последовательность может рассматриваться не только с точки зрения геодинамики, тектоники (формирование различных короткопериодических деформаций, характер которых определяется типом движений, смещений, напряжений), но и как последовательность диссипативных процессов — мерила степени (тектоно-)геодинамической неустойчивости. Учитывая особую роль эндогенного водорода как фактора энергетической перколяции, можно предположить, что согласно этой последовательности возрастет интенсивность его восходящей миграции и, возможно, глубинности корней его активизации. Для проверки этой гипотезы пока недостаточно данных. Однако предварительные данные ей не противоречат. Здесь уместно отметить, что рассматриваемые в этой статье Калужская и Сребненская КС находятся в зонах повышенной геодинамической неустойчивости (см. рис. 4). К ним же (по предварительным данным) приурочены и группировки западин, и другие проявления водородной дегазации, включая деструктивно-тектоническую зону ДДА. Здесь, в частности, показательна тектоно-геодинамическая позиция Ельской депрессии, где, как отмечалось, установлена интенсивная водородная аномалия, парагенетичная скоплениям тяжелых высоковязких нефтей (см. рис. 4).

Природа мозаичного (ячеистого) распределения территорий с различной степенью геодинамической стабильности, участков вертикальных движений и сдвиговых смещений пока недостаточно изучена. Однако ее связь с диссипативным характером современных тектоно-геодинамических процессов структурообразования не вызывает сомнений. По поводу конкретных тектоно-геодинамических факторов существуют различные мнения: от связи участков сжатия и растяжения с узлами и пучностями стоячих волн до механизма «солитонного скручивания» [Петров, 1971; Нелинейная ..., 1994; Казанкова, Судо, 2000; Лукин, 2004; Казанкова, Корнилова, 2015]. Не отрицая волновой природы тектонофизических процессов в формировании современно-

го геодинамического поля Восточно-Европейской платформы и других сегментов континентальных структур, мы полагаем, что триггером и мультипликатором этих процессов является ДЗ и, в первую очередь, водородная дегазация. Более того, есть основания предполагать огромную структурообразующую роль водородной дегазации. «Механизмы» структурообразования в кристаллическом фундаменте и осадочной (точнее — стратосферной вулканогенно-осадочной) оболочке связываются с дилатационными процессами и, по-видимому, многообразны. В частности, важным фактором формирования структур является глубинная гидрогеологическая инверсия, обусловленная как процессами имплантации водорода в геотекстуры, так и генерацией ювенильных пресных вод, с вторжением которых в гидросферу связаны процессы разуплотнения и деформации в массивных («гранитный слой») и слоистых (стратосфера) геологических средах [Лукин, 2004]. В связи с этим первоочередной задачей является выяснение связи выделяемых структур, дегазирующих водород, с тем или иным современным геодинамическим режимом.

Среди водородных КС центральных частей континентов, наряду с огромным (до нескольких десятков на квадратный километр [Larin et al., 2015; Шестопалов и др., 2018]) количеством мелких (от десятков и сотен метров до первых километров в диаметре) западин, встречаются крупные (десятки километров в диаметре) КС сложного строения с признаками интенсивного разуплотнения кристаллического фундамента и магматизма различной интенсивности. Характерной их особенностью является наличие в нижней части осадочного чехла и в фундаменте импактноподобной, скорее взрывной или вулканической кальдеры. С энергетических позиций возникновение этих структур родственно природе мощных землетрясений, убедительно установленной в работе [Gilat, Vol, 2012]. Их тектонотипами являются соответственно Калужская и Сребненская КС. Они занимают существенно разное (в тек-

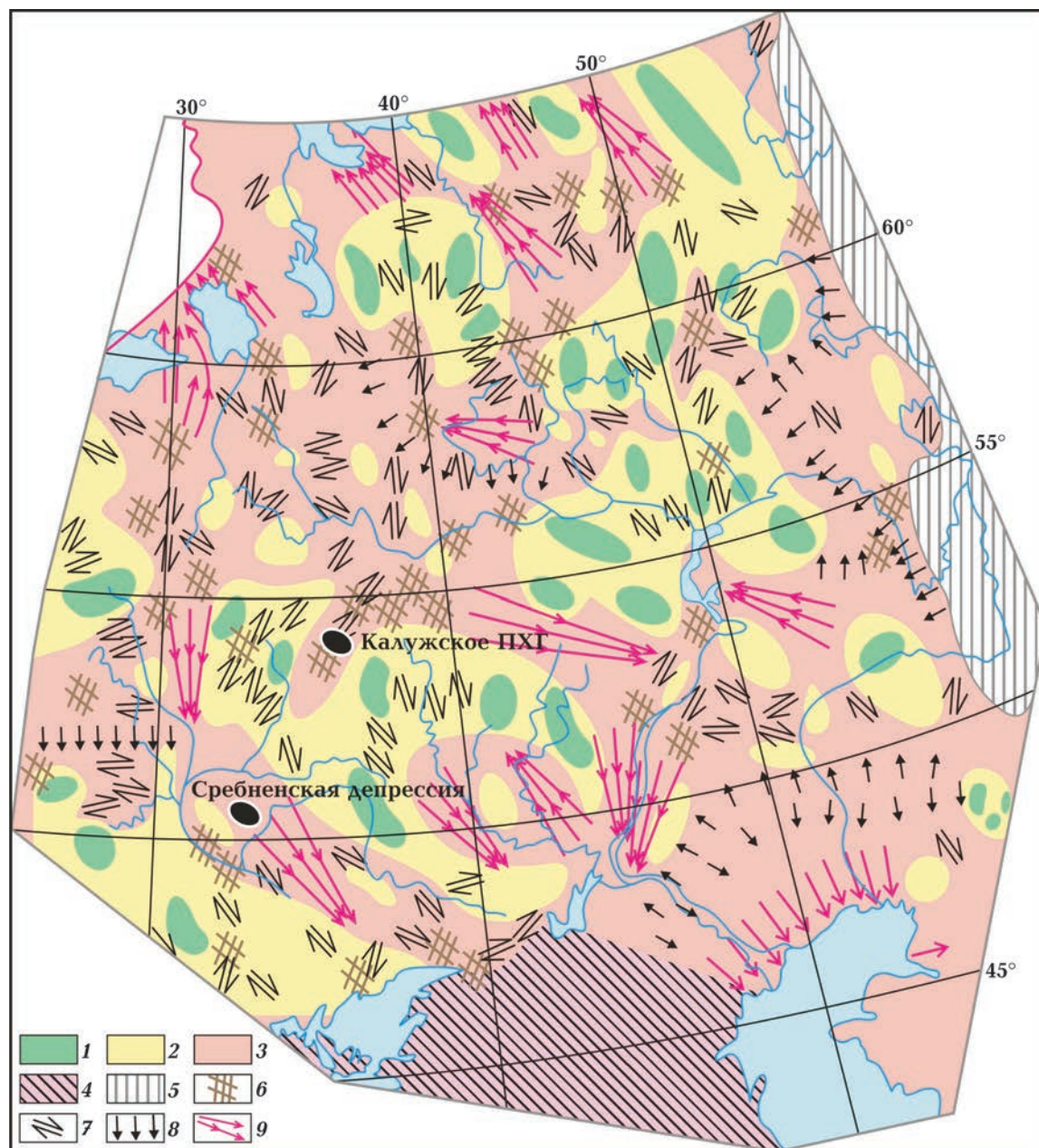


Рис. 4. Геодинамическая карта Восточно-Европейской платформы (Институт проблем нефти и газа РАН, 2005) (с изменениями): 1 — территория условно геодинамической стабильности; 2 — территория геодинамической неустойчивости; 3 — территория повышенной геодинамической неустойчивости; 4 — территория сейсмической активности; 5 — складчатые обрамления платформы; участки возможного возникновения короткопериодных деформаций, связанных с преобладанием: 6 — вертикальных движений, 7 — сдвиговых смещений, 8 — растягивающихся напряжений, 9 — напряжений сжатия.

Fig. 4. Geodynamic map of the East European Platform (Institute of Oil-and-Gas Problems, Russian Academy of Sciences, 2005) (with changes): 1 — area of conventional geodynamic stability; 2 — area of geodynamic instability; 3 — area of increased geodynamic instability; 4 — area of seismic activity; 5 — folded framing of the platform; areas of possible occurrence of short-period deformations associated with the prevalence of: 6 — vertical movements, 7 — shear displacements, 8 — tension stresses, 9 — compression stresses.

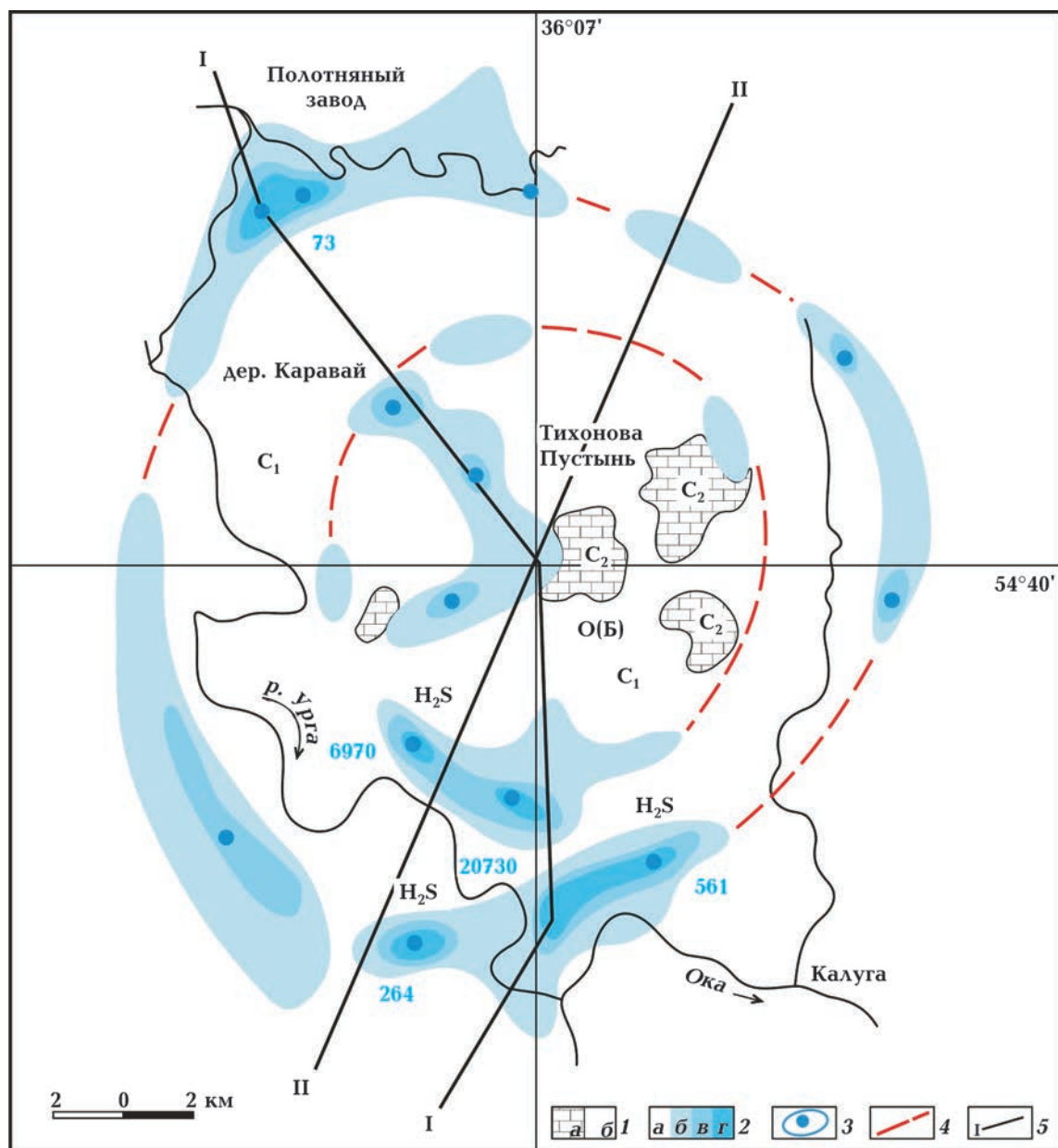


Рис. 5. Схематическая карта Калужской кольцевой структуры с нанесенными профилями эманационных и электрических исследований [Петров, 1971]: 1 — известняки, доломиты среднего карбона (а), глины, алевролиты нижнего карбона (б); 2 — шкала концентраций гелия в подземных водах от 10 мл/л: менее 10 (а), 10—20 (б), 20—40 (в), свыше 40 (г); 3 — контуры водородно-гелиевых аномалий и концентраций гелия в их эпицентрах, мл/л; 4 — активные глубинные разломы; 5 — профили наблюдений радона, водорода и АЭП.

Fig. 5. Schematic map of the Kaluga ring structure with plotted profiles of emanation and electrical surveys [Петров, 1971]: 1 — limestones, dolomites of Middle Carboniferous (a), clays, aleurolites of Lower Carboniferous (b); 2 — scale of helium concentrations in groundwater from 10 ml/l: less than 10 (a), 10—20 (b), 20—40 (v), over 40 (r); 3 — contours of hydrogen-helium anomalies and helium concentrations in their epicenters in ml/l; 4 — active deep faults; 5 — observation profiles for radon, hydrogen and atmospheric electric field.

тоно-геодинамическом отношении) положение на «Геодинамической карте Восточно-Европейской платформы» (см. рис. 4), но, в то же время, контролируются общей системой региональных глубинных разломов, что очень важно для понимания их генезиса.

Калужская кольцевая структура. В контексте данной проблемы особый интерес представляют сведения по геологии и процессам дегазации Калужской структуры (Калужского кратера), к которой приурочены ПХГ — Калужское и Якшуновское, причем в последнее, наряду с метаном, осуществляли закачку водорода (см. рис. 3).

Это — округлая в плане (диаметром 15—17 км) (рис. 5), четко выраженная и в архейско-нижнепротерозойском фундаменте, и в осадочном чехле (~1000 м), депрессия (Камельчинская мульда), ограниченная кольцевыми разломами и окруженная кольцевым валом. Доминирующим комплексом осадочного чехла являются средне- и верхнедевонские вулканогенно-осадочные отложения. Кроме того, в его составе присутствуют вендские, нижне- и среднекаменноугольные терригенно-карбонатные, а также четвертичные отложения (см. рис. 5). Структура приурочена к северо-западной периклинали Воронежской антеклизы, т. е. находится в зоне перикратонных опусканий. Наряду с двумя другими КС (Юхновской и Дугнинской) она контролируется Калужско-Бельским глубинным разломом [Петров, 1969].

О природе Калужской КС существуют различные мнения. В Википедии она названа одним из крупных ударных кратеров (астроблем) России. Это мнение базируется на данных о присутствии в ее разрезе импактитов (зювиты, аутигенные брекчии, интенсивно трещиноватые архейские гнейсы и граниты с диаплетным кварцем и плагиоклазом, а также смятым биотитом) [Масайтис, 1975; Маракушев, 1981]. Возраст кратера оценивается в 380 ± 5 млн лет, что соответствует верхнему эйфелю (D_2), но противоречит установленному по данным бурения вертикальному формационному ряду (рис. 6). В соответствии с диаметром

ударного кратера (15—17 км) размер метеорита («ударника») по данным А. А. Маракушева составлял около 1,5 км, скорость его движения ~30 км/с, а энергетический импульс при столкновении «ударника» с мишенью составлял порядка 10^{26} — 10^{27} эрг. Однако, несмотря на столь впечатляющие предполагаемые характеристики, главные индикаторы импактного события столь огромной мощности (наличие коэсита и стишовита, сопутствующие событию катастрофические явления в эйфеле на смежных территориях) не были обнаружены.

Первооткрыватель Калужской КС В. Г. Петров [Петров, 1969, 1971] рассматривал ее как вулкано-тектоническую структуру. Это не объясняет указанные выше ее формационные особенности и, в частности, недостаточную вулканическую активность, которая незначительно проявилась в венде (прослой туффитов в переслаивании с аргиллитами и песчаниками) и в среднем девоне (аллогенные взрывные и пирокластические брекчии среди терригенных отложений). Здесь уместно отметить, что в Калужской структуре соотношение авто- и аллогенных брекчий трудно интерпретировать как с эндогенной (вулканогенной), так и с экзогенной (импактной) точки зрения.

Эту точку зрения разделяют те исследователи, которые рассматривают базовые округлые депрессии как кальдеры, образованные взрывными извержениями, энергетика которых сопоставима, а порою и существенно превышает энергетику крупных импактных событий [Ваганов и др., 1985]. Так или иначе, главным сегментом Калужской КС является кальдероподобная депрессия в кристаллическом фундаменте, которая связана с субвертикальной зоной разуплотнения («каналом») и, судя по литогеодинамическим показателям в вышележащих отложениях [Лукин, 1997], многократно активизируется (эффект «просвечивания»).

Признаки такого «просвечивания» отмечены в Калужской КС (наличие на нескольких уровнях, начиная с архейско-нижнепротерозойского фундамента, сравнительно незначительные проявления среднего и

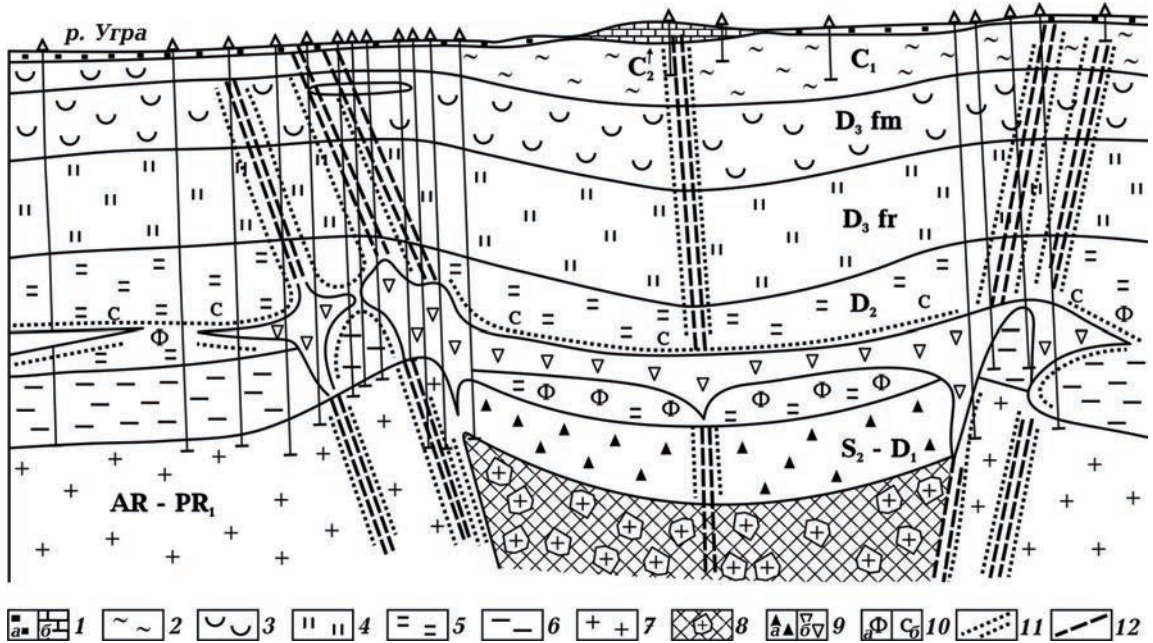


Рис. 6. Геологический разрез через Калужскую кольцевую структуру по профилю II—II: ход атмосферного электрического поля, ход радона и водорода [Петров, 1971]: 1 — четвертичные отложения (а) и известняки, доломиты среднего карбона (б); 2 — глины, алевролиты нижнего карбона; 3 — карбонатные отложения фаменского яруса верхнего девона с горизонтами и вкрапленностью гипса, кремнистого вещества, доломита; 4 — алевролиты, глины, известняки и доломиты франского яруса верхнего девона; 5 — глины, алевролиты, песчаники среднего девона; 6 — вендские аргиллиты, песчаники, туффиты с глауконитом, углеродистым веществом; 7 — гнейсы, гранито-гнейсы и граниты архея и нижнего протерозоя; 8 — аутигенные брекчии гнейсов, гранито-гнейсов и гранитов; 9 — аллогенные, взрывные и пирокластические брекчии с эффузивами среднего и основного состава (а) и флюидизированные брекчии осадочных и других пород с ангидрит-карбонатно-кремнистым цементом (б); 10 — фосфориты (а) и сульфаты (б), сингенетичные с осадочными породами; 11 — гидротермально измененные породы; 12 — активные глубинные разломы.

Fig. 6. Geological section through the Kaluga ring structure along profile II—II: course of atmospheric electric field, course of radon and hydrogen [Петров, 1971]: 1 — Quaternary deposits (a) and limestones, dolomites of Middle Carboniferous (b); 2 — clays, siltstones of Lower Carboniferous; 3 — carbonate deposits of Upper Devonian (Famennian stage) with horizons and inclusion of gypsum, siliceous substance, dolomite; 4 — siltstones, clays, limestones and dolomites of Upper Devonian (Famennian stage); 5 — clays, siltstones, sandstones of Middle Devonian; 6 — Vendian argillites, sandstones, tuffites with glauconite and carbonaceous substance; 7 — gneisses, granite-gneisses and granites of Archean and Lower Proterozoic; 8 — authigenic breccias of gneisses, granite-gneisses and granites; 9 — allogenic, explosive and pyroclastic breccias with effusives of medium and basic composition (a) and fluidized breccias of sedimentary and other rocks with anhydrite-carbonate-siliceous cement (b); 10 — phosphorites (a) and sulphates (b), syngenetic with sedimentary rocks; 11 — hydrothermally altered rocks; 12 — active deep faults.

основного вулканизма — туффиты в венде и аллогенные взрывные и пирокластические брекчии с эффузивами в верхнем силуре — нижнем девоне).

Затруднительность однозначного ответа на вопрос о природе конкретной КС свидетельствует о необходимости более широкого подхода к решению данной проблемы.

Она диктуется прежде всего глобальными тектоно-геодинамическими закономерностями. Кольцевые и криволинейные тектоно-геодинамические тренды наряду с прямолинейными (линеаментами) определяют ту «канву», которая контролирует размещение глубинных разломов и грабенов, осадочных бассейнов, рифогенно-карбо-

натных поясов (в частности, барьерных рифов, атоллов и мегаатоллов), аллювиально-дельтовых систем, различных форм вулканизма и т. д. При этом зачастую роль КС недооценивается, и они рассматриваются либо как производные линеаментной тектоники (узлы пересечения прямолинейных разломов), либо как вообще не связанные с тектоникой и геодинамикой импактные структуры. Не отрицая реальности существования последних, считать импактогенез главным или даже единственным фактором образования КС недопустимо с разных точек зрения. В частности, опыт изучения крупных деформаций земной поверхности при достаточно сильных землетрясениях свидетельствует о вращательном («крутильном») характере тектонофизического режима [Казанкова, Корнилова, 2019]. Независимым подтверждением роли вихревых тектоно-геодинамических процессов являются данные исследований Г. И. Дьяченко по геометрии размещения урановых, полиметаллических и других рудных месторождений в различных регионах (Казахстан, Алтае-Саянская обл., Канада, Чехия и др.) [Лукин и др., 1994б]. Оказалось, что их размещение контролируется системой окружностей различного диаметра, причем их система характеризуется признаками фрактальности. Это, в частности, свидетельствует о ведущей роли труб ДЗ как диссипативного фактора [Лукин и др., 1994б].

Характеризуя общие тектоно-геодинамические факторы процессов ДЗ, следует учитывать кардинальные различия соотношения линейных и кольцевых структур-нотектонических элементов континентального и океанического блоков литосферы. Континентальный блок характеризуется преобладающим режимом сжатия [Кропоткин, 1987]. Это относится к геодинамической специфике континентального рифтогенеза, что особенно ярко проявляется в особенностях тектоники ДДА — тектонотипа континентальных рифтогенов. Весьма показательна в этом отношении система краевых разломов ДДА в зонах сочленения верхнедевонского палеорифта с Воро-

нежской антеклизой и Украинским щитом, закартированных по комплексу геолого-геофизических и аэрокосмических исследований [Гавриш и др., 1989]. Как уже отмечалось [Лукин и др., 2012б], здесь проявились имманентные континентальному рифтогенезу особенности разломообразования. Они четко сегментированы, причем сегменты имеют не прямолинейный, как у океанических рифтов, а в различной степени криволинейный, местами дугообразный характер. Дугообразность является признаком присутствия глубокозалегающих сложнопостроенных КС, в формировании которых участвовали магматические и галокинетические факторы [Лукин и др., 2012б]. В ряде работ обосновывается, что овоидно-кольцевые системы (нуклеары) континентов являются центрами дифференциации мантии, возникшими в процессе активизации конвективного тепло-массопереноса из недр в «лунную» стадию развития Земли. Они стали центрами мощных процессов катархейского и архей-протерозойского вулканизма и постепенно закрепились в литосфере. Для них характерны длительность существования и периодическая фрагментарная активизация отдельных сегментов — криволинейных разломов, отдельных блоков и т. п. Внешние части нуклеаров характеризуются устойчивой во времени мобильностью и проницаемостью. К ним нередко и приурочены взрывные кольцевые структуры. Таким образом, формирование этих структур — ведущий фактор континентального рифтогенеза. Их ярким примером является Сребненская КС, сыгравшая особую роль в формировании ДДА — тектонотипа континентальных рифтогенов и функционирующая как труба «горячей» и «холодной» дегазации (в понимании П.Н. Кропоткина), начиная с позднего протерозоя до нео- и актуотектонического этапов. Что касается Калужской КС, то вероятно режимы «горячей» дегазации в ней были относительно слабо выраженными и по геологическим меркам скоротечными, перешедшими в более устойчивую «холодную» фазу дегазации.

При выборе варианта генезиса КС необходимо также учитывать мнение профессионалов, занимавшихся этой проблемой и изучавших физику процесса вхождения космического тела в атмосферу Земли, взаимодействия с ней и характера воздействия на твердую землю. Так, в отличие от представлений А.А. Маракушева (см. выше), согласно оценкам известного советского астрофизика В.Г. Фесенкова [1949], космическое тело, входя в атмосферу Земли, испытывает с нарастающей силой сопротивление ее молекул, приводящее к частичной дезинтеграции, плавлению и испарению части его вещества. Скорости соударения космического тела с Землей, с учетом его взаимодействия с атмосферой, уменьшаются до первых км/с. А это, естественно, обуславливает существенное уменьшение ударной силы при столкновении.

Указанные оценки хорошо согласуются с данными, полученными группой исследователей при выявлении причин массового вымирания на границе мел—палеоген и увязываемой обычно с падением астероида Чиксулуб в районе полуострова Юкатан в Мексике [Keller et al., 2007; Mateo et al., 2019; Sanders et al., 2019; Schoene et al., 2019; Keller et al., 2020]. Доказывая, что массовое вымирание произошло на сотни тысяч лет позднее в результате нарастающего во времени извержения вулканов в Западной Индии, известный геолог Герда Келлер и ее коллеги показали, что удар астероида на п-ове Юкатан, приведший к образованию обширной импактной структуры, не вызвал вымирание фауны даже в относительной близости от места удара, не говоря уже о глобальном вымирании.

Сребненская кольцевая структура.

Континентальные рифтогены, тектонотипом которых является ДДА, в отличие от океанических рифтов представляют собой сложный пространственно-временной кол-

лаж различных по морфологии и размерам грабенов (линейных — простых и ступенчатых, клинораздвигов, грабен-котловин) и тектоно-магматических КС. Формирование последних в сочетании с различными сдвиговыми структурами (pull-apart structures и др.) является основным фактором проградирующего рифтогенеза в пределах континентального блока в условиях преимущественно тектонофизического режима сжатия. С ними связаны разнообразные криволинейные тренды рудообразования и нефтегазонакопления. Это позволяет предполагать, что формирование тектоно-магматических КС, обусловленных мантийным диапиризм той или иной природы, является ведущим механизмом континентального рифтогенеза. Если это предположение справедливо, то должны существовать такие структуры, которые инициировали начало континентального рифтинга с наиболее древними проявлениями и, в то же время, максимально широким диапазоном тектоно-термальной активизации. Сравнительное изучение разнообразных разновозрастных тектоно-магматических КС различных регионов свидетельствует о том, что фаза «горячей» ДЗ с активным вулканизмом сменяется гораздо более длительным этапом поствулканической «холодной» ДЗ.

В ДДА такой исходной тектоно-магматической КС, с которой начался рифтинговый распад Сарматского щита [Лукин и др., 1992], является приуроченная к северо-западному сегменту осевой зоны ДДВ Сребненская депрессия (СД), четко выделяющаяся в гравитационном и геомагнитном полях (рис. 7, 8). Это сложнопостроенная позднепротерозойско-палеозойская (с признаками неоднократной активизации в мезозое и кайнозое) синклиналичная структура с осадочным чехлом широкого стратиграфического и формационного диапазона (рис. 9).

→

Рис. 7. Сребненская депрессия и ее обрамление: *а* — на фрагменте «Схемы гравитационного поля Украины», масштаб 1 : 1 000 000, Т.С. Нечаева и др., 2002 г.; *б* — на фрагменте «Карты остаточных аномалий гравитационного поля Украины ($R = 10\ 000\ \text{м}$)», масштаб 1 : 1 000 000, Т.С. Нечаева и др., 2002 г.

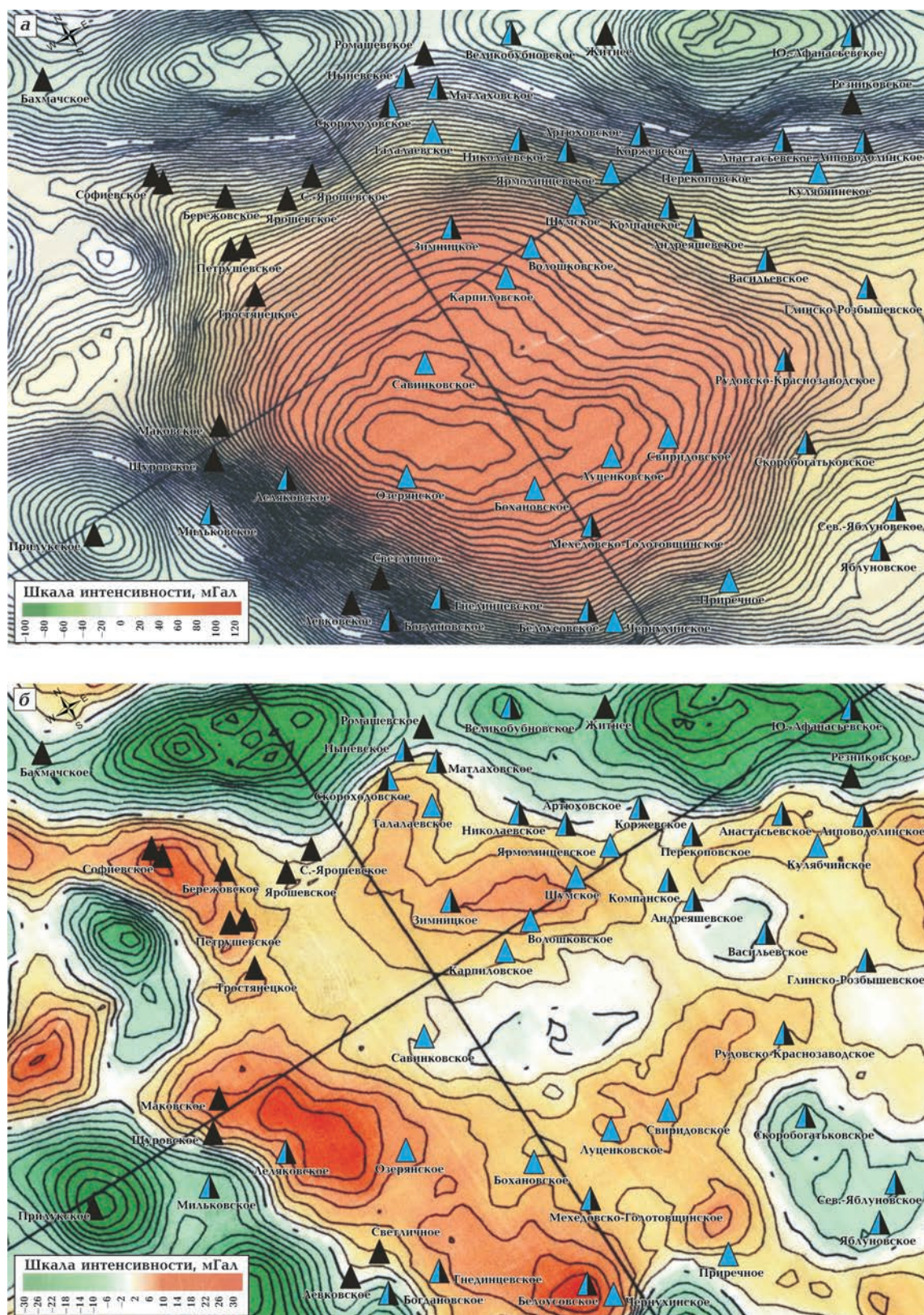


Fig. 7. Sribne depression and its framing out lined: *a* — on a fragment of the «Scheme of the gravity field of Ukraine», scale 1 : 1 000 000, T.S. Nechaeva et al, 2002; *б* — on a fragment of the «Map of residual anomalies in the gravity field of Ukraine ($R = 10\,000\text{ m}$)», scale 1 : 1 000 000, T.S. Nechaeva et al., 2002.

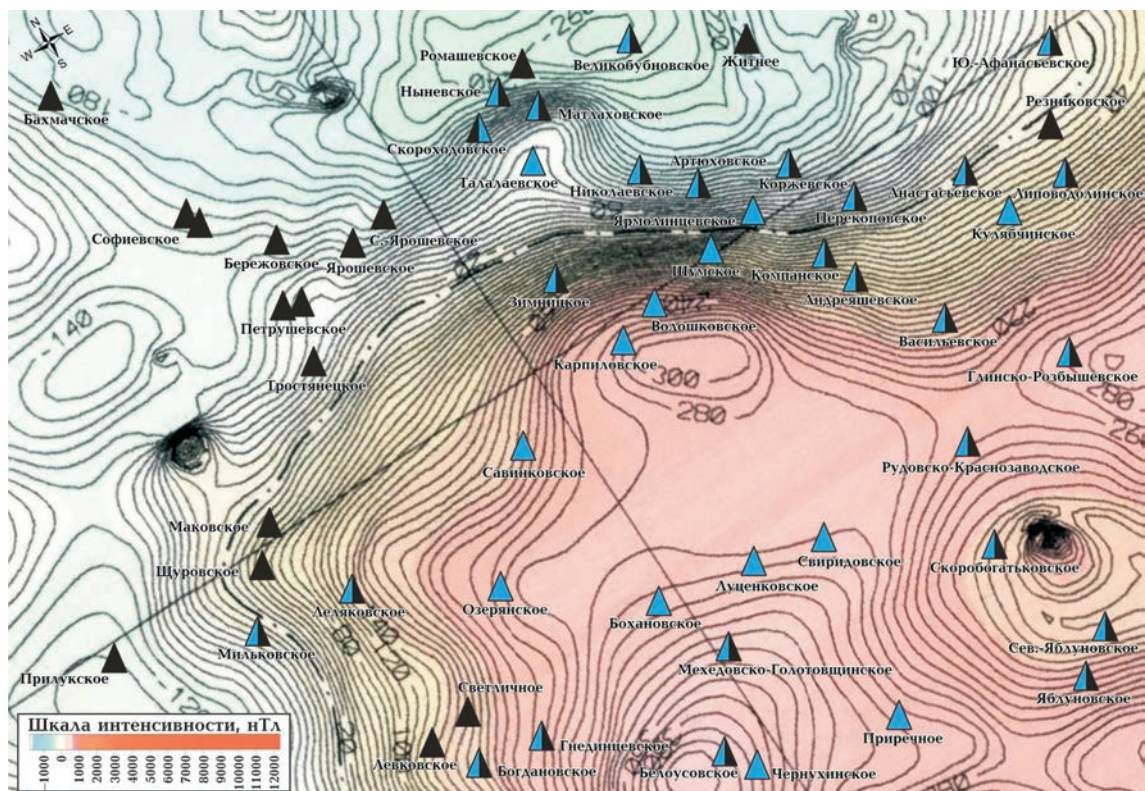


Рис. 8. Сребненская депрессия и ее обрамление на фрагменте «Карты аномального магнитного поля Украины», высота 200 м, масштаб 1 : 1 000 000, Т.С. Нечаева и др., 2002 г.

Fig. 8. Sribne depression and its framing outlined on a fragment of the «Map of the Anomalous Magnetic Field of Ukraine», elevation of 200 m, scale 1 : 1 000 000, T.S. Nechaeva et al., 2002.

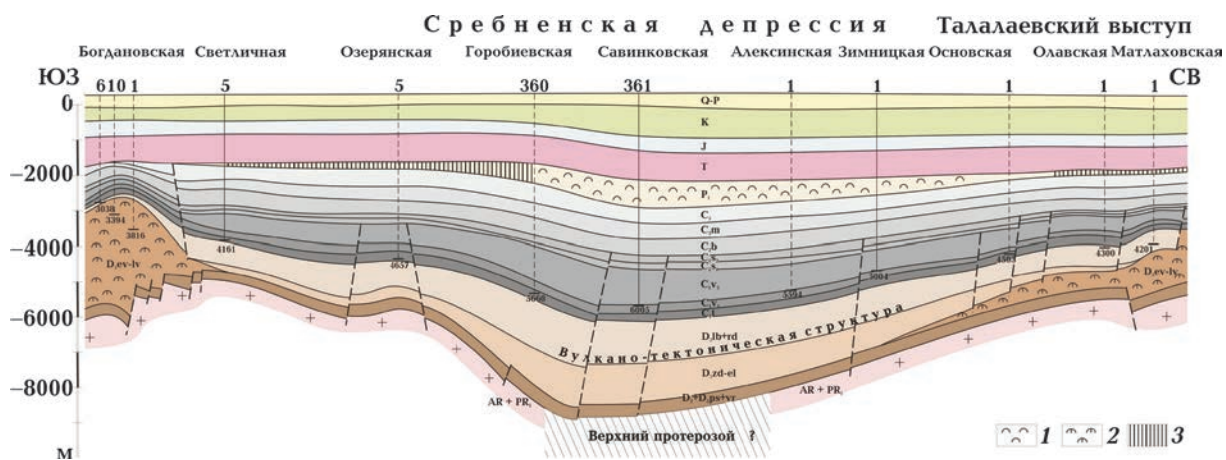


Рис. 9. Геологический разрез Сребненской депрессии и ее обрамления по профилю Пирятин—Талалаевка (по Ю.А. Арсирию и др., 1980 г., с изменениями): 1 — соленосные отложения (P_1); 2 — соляные штоки (D_3); 3 — рифогенно-карбонатные фации.

Fig. 9. Geological section of the Sribne depression and its framing along the Piryatin—Talalaevka profile (by Yu.A. Arsiiry et al., 1980, with changes): 1 — saliferous deposits (P_1); 2 — salt domes (D_3); 3 — rhyphogenic-carbonate facies.

Ее размеры $\sim 55 \times 25$ км, площадь ~ 1 тыс. км². Глубина залегания поверхности докембрийского кристаллического фундамента превышает 8 км [Арсирый и др., 1980]. В 1981 г. по данным сейсморазведки методом ОГТ (сейсмопартия 3/81 КГРЕ ПО «Укргеофизика», В.И. Бельский и др.) в пределах СД внутри фундамента установлены интенсивные отражения (рис. 10). Здесь следует подчеркнуть, что они были получены по обычной методике ОГТ (24-кратные перекрытия с шагом между приборами 50—100 м) на профилях площадной сейсмораз-

ведки без применения специальных (для изучения градиентной среды ниже поверхности докембрийского фундамента) методов. Анализ кинематических и динамических параметров этих волн позволил отнести их к одноразовым отраженным волн [Ермаков и др., 1988].

Природа этих отражений была неясной, поскольку плотностные и сейсмоакустические различия основных петрофизических типов пород фундамента (граниты, гнейсы, амфиболиты, кристаллические сланцы) невелики и недостаточны для объяснения ука-

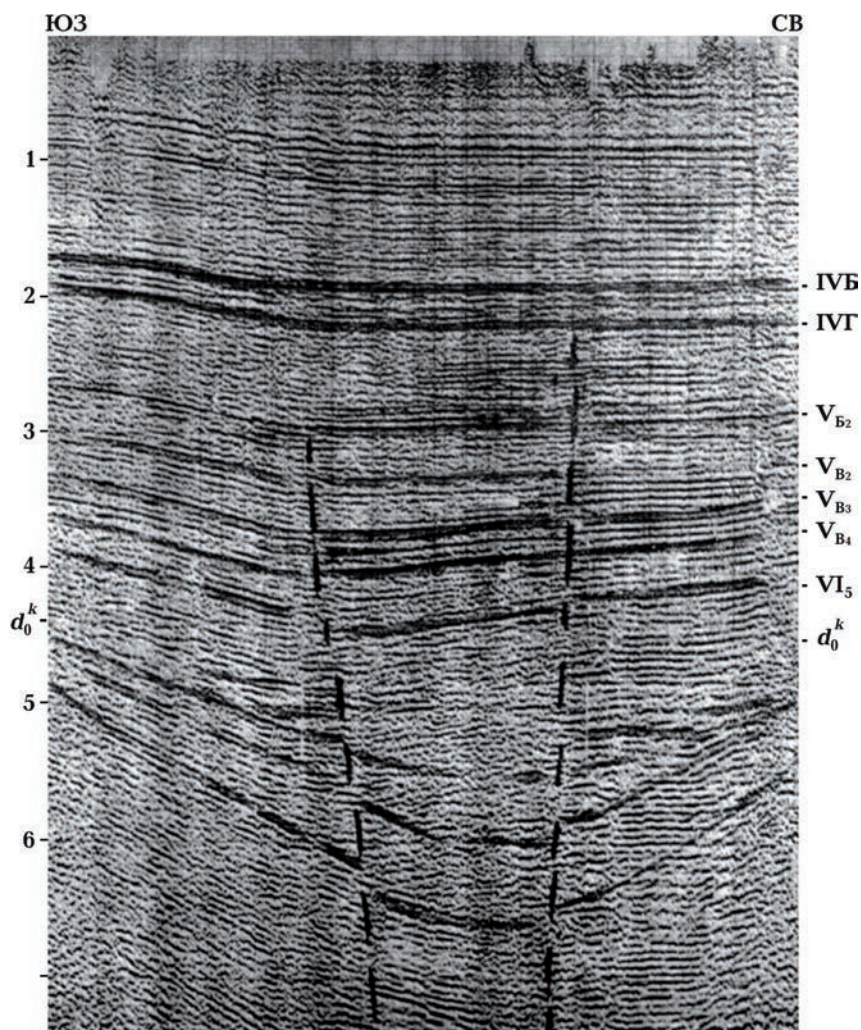


Рис. 10. Фрагмент сейсмического разреза СД по профилю 6824 [Ермаков и др., 1988].

Fig. 10. Fragment of the seismic section SD along the profile 6824 [Ермаков и др., 1988].

занных явлений. Эта «сейсмическая мутность среды» усиливается благодаря взаимодействию пород кристаллического фундамента с диффузионным потоком водорода и гелия [Гуфельд, Матвеева, 2011, с. 253], а также их насыщенности газовой жидкостью и газовыми включениями. Это подтверждается отсутствием таких динамически выраженных отражений и относительной сейсмической однородностью поля на тех площадях, где они охарактеризованы данными бурения. Поэтому было высказано предположение о наличии здесь мощных верхнепротерозойских магматических и метасадочных пород промежуточного комплекса, соответственно с промежуточными между архейско-нижнепротерозойскими кристаллическими и палеозойскими осадочными породами [Ермаков и др., 1988; Лукин и

др., 1992]. Толщина этого комплекса в центральной части СД достигает 7—8 км (рис. 11). О его вещественном составе можно судить по многочисленным псефитовым обломочным включениям в девонских и нижнекаменноугольных формациях палеотипичных эффузивов, метапесчаников, черных сланцев, различных кремнистых (фтаниты, яшмы и т.д.) и других пород, степень метаморфизации которых соответствует метазенезу и начальному региональному метаморфизму (зеленокаменная стадия) [Лукин, 1997].

Прямым подтверждением присутствия в СД промежуточного верхнепротерозойского комплекса оказались результаты бурения Салогубовской скв. 388 [Лукин и др., 1992]. Пробуренная в северном сегменте СД (рис. 12) эта параметрическая скважина

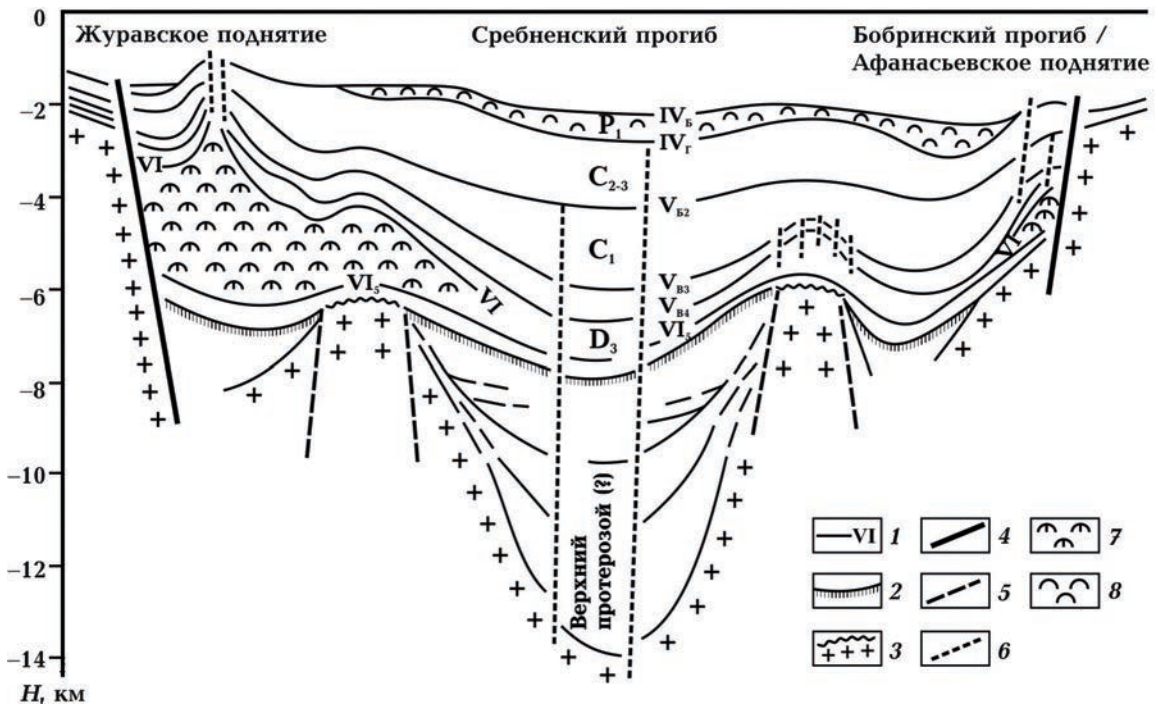


Рис. 11. Сейсмогеологический разрез Днепровско-Донецкой впадины по профилю Журавка—Афанасьевка [Ермаков и др., 1988]: 1 — отражающие горизонты; 2 — подошва осадочного чехла (по данным М.Г. Манюты и др.); 3 — поверхность кристаллического фундамента; 4 — краевые нарушения; 5 — предполагаемые разломы в докембрийском кристаллическом фундаменте; 6 — разрывные нарушения в осадочном чехле; 7 — девонская соль; 8 — нижнепермская соль.

Fig. 11. Seismic geological section of the Dnieper-Donets Basin along the Zhuravka—Afanasievka profile [Ермаков и др., 1988]: 1 — reflecting horizons; 2 — bottom of sedimentary cover (according to M.G. Manyuta and others); 3 — surface of crystalline basement; 4 — marginal faults; 5 — suspected faults in Precambrian crystalline basement; 6 — disjunctive dislocations in sedimentary cover; 7 — Devonian salt; 8 — Lower Permian salt.

на глубине 5043 м под верхнефранскими соленосными и вулканогенными отложениями вскрыла магматическое тело, по которому прошла 557 м (забой на глубине 5600 м), не достигнув его подошвы (рис. 13). Данные петрографических и петрохимических исследований свидетельствуют о том, что это — гипабиссальная долеритовая интрузия, которая по петрохимическим и геохимическим особенностям резко отличается от девонских базальтов и диабазов, вскрытых этой же скважиной (см. рис. 13). В то же время отмечено их сходство с верхнерифейско-вендской базальт-долеритовой (трапповой) формацией авлакогенов Восточно-Европейской платформы и, в частности, ти-

танистой слабо дифференцированной габбро-долеритовой формацией, залегающей среди верхнерифейских отложений полеской серии Вольно-Оршанской впадины [Гоньшакова и др., 1989]. Степень постмагматических изменений гипабиссальной интрузии (хлоритизация, альбитизация и т.д.) возрастает в ее прикровельной части. Изотопный возраст (калий-аргоновая геохронологическая лаборатория ИГ НАН УССР, аналитик А. К. Бойко) диабазов в средней и нижней частях вскрытого интервала составляет 780 ± 45 млн лет, что соответствует позднему рифею. Возраст пород прикровельной части, измененных постмагматическими углекислыми гидротермами, со-

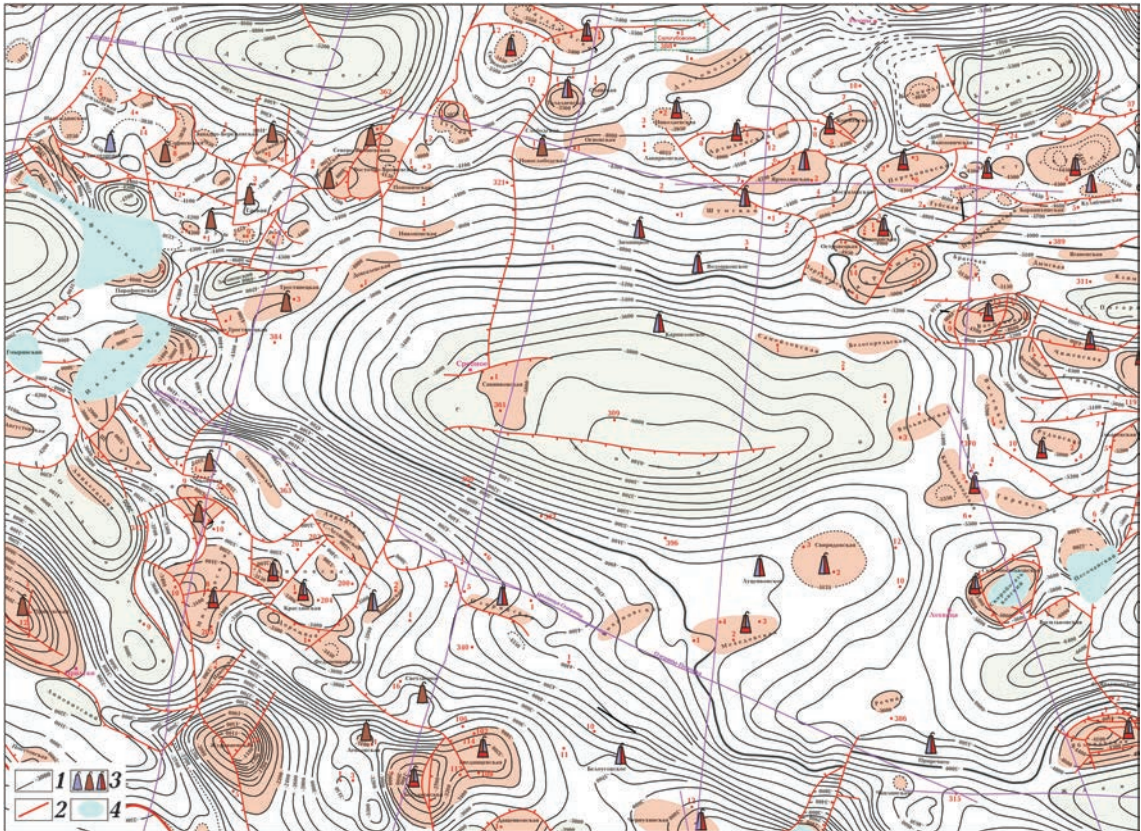


Рис. 12. Сребненская депрессия и ее обрамление (на фрагменте структурно-тектонической карты каменноугольных отложений украинской части ДДА, под. ред. О.Г. Цехи, 2011 г.): 1 — изолинии подошвы верхнего визе; 2 — тектонические нарушения; 3 — месторождения (газовые, нефтяные, газоконденсатные); 4 — соляные штоки.

Fig. 12. Sribne depression and its framing (outlined on a fragment of the structural-tectonic map of the Carboniferous deposits for the Ukrainian part of the DDA, edited by O.G. Tsekha, 2011): 1 — bottom contour lines of the Upper Visean deposits; 2 — tectonic deformation; 3 — gas, oil-and-gas-condensate fields; 4 — salt domes.

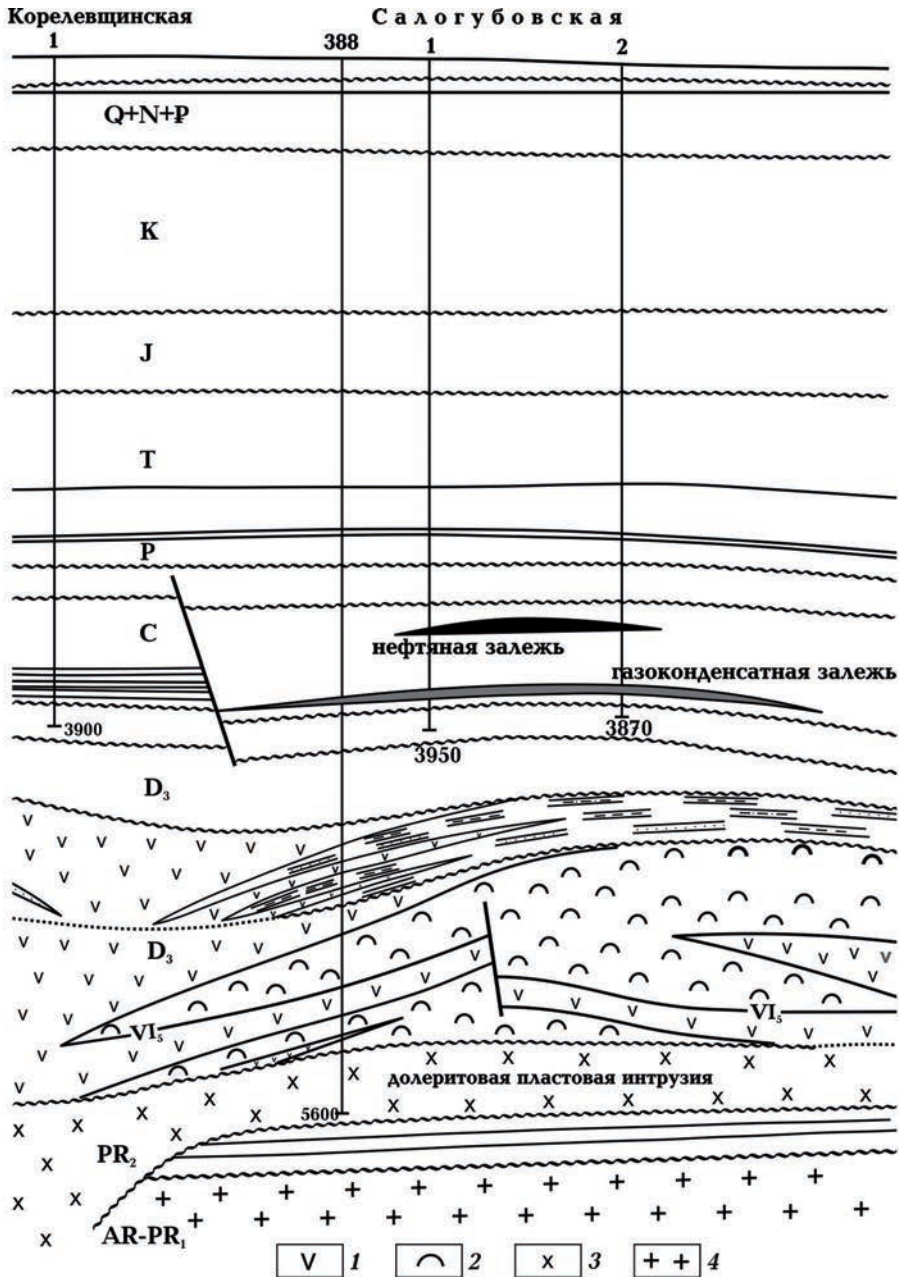


Рис. 13. Салогубовская площадь: две фазы нефтегазоаккумуляции — два разных источника УВ (ДДВ, Сребненская депрессия): 1 — вулканиты; 2 — соль; 3 — долеритовая пластовая интрузия; 4 — кристаллические породы докембрийского фундамента.

Fig. 13: Salogubovka pool: two phases of oil-and-gas accumulation — two different HC sources (DDB, Sribne depression): 1 — vulcanite; 2 — salt; 3 — dolerite sheet intrusion; 4 — crystalline rocks of Precambrian basement.

ставляет 600 ± 35 млн лет, что соответствует позднему венду. Приведенные цифры при всей их приблизительности свидетельствуют о большой продолжительности поздне-

протерозойской тектоно-магматической (и соответственно — тектонотермальной) активизации СД — длительно развивавшейся структурой древнего заложения. Это хо-

рошо согласуется с данными о закономерностях катагенеза и нефтегазонакопления в ее пределах [Арсирый и др., 1980], свидетельствующими о длительности существования (в течение всего фанерозоя), связанной с СД геотермической и флюидодинамической аномалии, которая проявилась и на нео-, актуотектоническом этапах. В этом отношении показательно сравнение СД с близкой по размерам позднепалеозойской Стрельцовской кальдерой (Восточное Забайкалье, Россия), к которой приурочены гидротермальные молибденурановые месторождения уникального по запасам Стрельцовского рудного поля [Мальковский др., 2008]. Авторы указанной публикации оценили время остывания магматических пород под Стрельцовской кальдерой от 56 до 133 тыс. лет (рассматривался только термокондуктивный отток тепла, без учета обусловленной флюидодинамикой конвективной составляющей теплопереноса). Согласно этим расчетам, верхняя граница магматической (базальтовый расплав) камеры была расположена на глубине 24 км. Минералого-геохимические особенности этой группы месторождений позволяют предположить ведущую роль поствулканической водородной дегазации в его формировании.

Геотермическая эволюция Сребненской КС гораздо более длительная и сложная, что отражается в многообразии аномалий в геофизических и геохимических полях. Развивавшаяся в позднем протерозое и девоне как вулканотектоническая структура, на следующих этапах она, взаимодействуя с конкретными палеогеографическими и палеоклиматическими условиями, контролировала распределение рифогенно-карбонатных тел (нижневизейский и нижнепермский мегаатоллы), регулярные группы песчаных аккумулятивных тел различной природы (баровые «лестницы» и др.) вплоть до проявления этих седиментационно-палеогеоморфологических трендов в современном ландшафте [Лукин и др., 1978]. Указанное взаимодействие проявлялось на этапах ослабления (вплоть до полного прекращения) терригенной седи-

ментации. Так, в раннем визе на обрамлении СД сформировалась кольцевая зона развития рифогенно-карбонатных тел, к которым приурочены разновозрастные битумные, нефтяные и газоконденсатные залежи (рис. 14). В центральной части СД залегают доманикоиды — «черные сланцы» (black shales). Особенности их геохимии и минерального состава (присутствие анальцима, редкоземельных фосфатов, сфалерита и других сульфидов [Лукин, 2020]) свидетельствуют об интенсивной ДЗ, промежуточной между ее «горячей» и «холодной» фазами [Лукин, 1997, 2020].

Активизация процессов глубинной дегазации с криптовулканогенными и гидротермально-экспазионными проявлениями в пределах СД наблюдается также в ранней перми, позднем мелу и палеогене [Лукин, 1989].

О современной эндогенной флюидодинамической активности свидетельствуют результаты изучения отдельных сегментов территории СД так называемыми структурно-атмогеохимическими методами [Багрий та ін., 2016; Глонь, 2019]. Природа этих аномалий, где на смежных или одних и тех же пунктах наблюдений отмечены повышенные, частично геохимически несовместимые концентрации водорода, предельных и непредельных УВ, CO_2 , гелия, радона и торона, пока не ясна.

Таким образом, как Калужская, так и Сребненская тектоно-магматические КС достаточно четко проявляются по аномально повышенным содержаниям H_2 , He , а также N_2 и CO_2 в атмосфере почв над этими структурами. При этом следует отметить неодинаковую степень изученности указанных газо-геохимических аномалий. Калужская КС в этом отношении изучена гораздо лучше, что позволило авторам [Козлова и др., 1999, с. 507] сделать важный вывод о ведущей роли в процессах ДЗ глубинного водорода, который обладает наибольшей среди газов теплопроводностью и «совершенными диффузионными параметрами, позволяющими ему легко перемещаться в пористых средах и быть активным газоносителем для радона и торона». Это

позволяет рассматривать апробированную на Калужской КС (в связи с сооружением ПХГ) водородно-торонную съемку [Козлова и др., 1999] как один из методов поисков водородных месторождений. В хорошо выраженных тектоно-магматических КС, в качестве тектонотипа которых можно рассматривать Сребненскую КС, есть основания полагать еще более интенсивную водородную дегазацию. Здесь целесообразно подчеркнуть, что и Сребненская, и Калужская КС приурочены к территории повышенной геодинамической неустойчивости (см. рис. 4), что позволяет предполагать интенсивные дилатансионные процессы при взаимодействии эксплозивно-вулканических факторов с нелинейными геодинамическими фоновыми процессами. При этом следует подчеркнуть, что газовые аномалии различного состава в той или иной мере смещены, что, с одной стороны, можно рассматривать как дифференциацию очагов генерации глубинных флюидов на автономные квазистационарные системы (в понимании Ф.А. Летникова), а с другой — связывать это с различными скоростями диффузии и фильтрации. В частности, это относится к водороду и газообразным УВ. Поля их повышенных концентраций, как показывает опыт газовой съемки в различных регионах, не совпадают. Об этом, в частности, свидетельствуют данные геохимических исследований на газовом месторождении Газли (Узбекистан), расположенном в пределах одноименного выступа Бухарской ступени молодой (эпигерцинской) Туранской платформы. Его газоносность связана с меловыми терригенными отложениями. По данным [Словарь ..., 1988], газ метановый, среднее содержание: CH_4 — 95, N_2 — до 3, CO_2 — до 0,4, тяжелые газообразные УВ — 1,6 %. В то же время в зоне расположения месторождения Газли установлен общий транзит водорода и гелия при ведущей роли глубинной водородной дегазации, с которой связано «поле водорода», охватывающее данное месторождение, но более активное за его пределами [Перевозчиков, 2012].

Восходящей миграцией водорода в кро-

вельные отложения кайнозоя обусловлено образование контрастных восстановительных геохимических барьеров (на контакте водородных потоков с содержащими уран и другие поливалентные элементы инфильтрационными кислородными водами), на которых формируются промышленные залежи урана [Перевозчиков, 2012]. Аналогичные явления наблюдаются на ряде месторождений других регионов. Так, в ДДВ на многопластовых месторождениях мезозоя и кайнозоя отмечены залежи и рудопроявления урана, которые очевидно связаны не столько с диффузией газообразных УВ, сколько с восходящей миграцией водорода — наиболее мощного природного восстановителя. Особенно ярко это проявляется на месторождениях, приуроченных к окаймлению СД (Лемяковское, Гнединцевское) или к смежным с ней структурам (Яблуновское, Глинско-Разбышевское и др.) [Лукин, 2004]. В связи с этим важным индикатором восходящей современной струйной миграции водорода являются аномально повышенные содержания урана в поверхностных водах на территории СД и ее обрамления (рис. 15), установленные в свое время известным специалистом по гидрогеологии урановых месторождений Н.Н. Макаренко (эти исследования были проведены в рамках договора с «Укрнафтою» по оценке перспектив нефтегазоносности рифогенно-карбонатных коллекторов Сребненского мегаатолла, руководитель А.Е. Лукин, 1994 г.). Тогда такие аномалии рассматривались как индикаторы восходящих углеводородно-газовых потоков. Однако, учитывая данные, приведенные в статье [Перевозчиков, 2012], и современные представления по геохимической роли водорода, их следует в первую очередь связывать с геохимической ролью водорода — наиболее мощного природного восстановителя. Об этом свидетельствует четкое смещение в плане этих урановых аномалий относительно большинства месторождений углеводородов (см. рис. 15).

Большой интерес представляет и гелиевая аномалия, установленная в нефтегазоносных нижневизейских карбонатных кол-

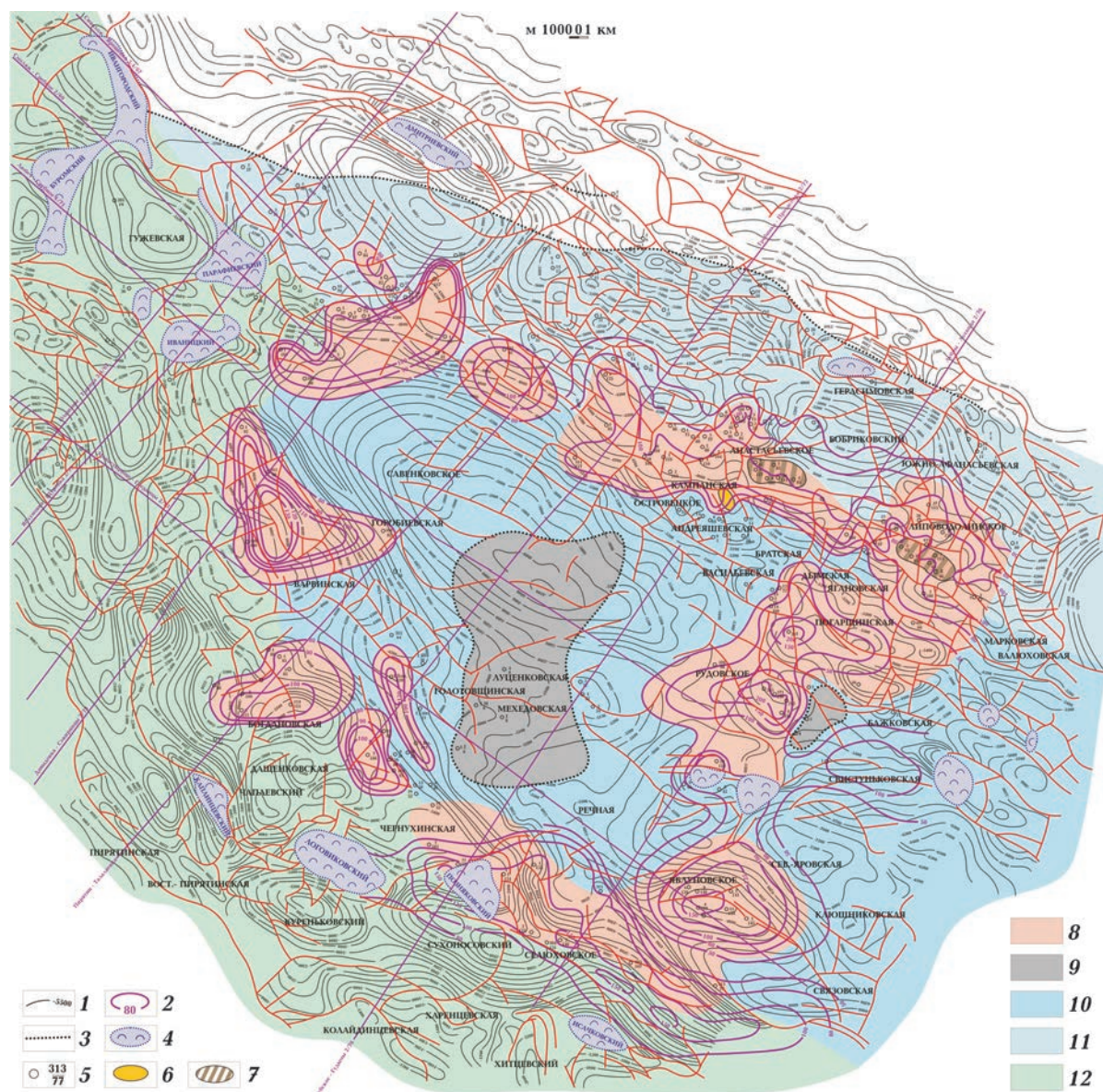


Рис. 14. Сребненский нижневизейский мегаатол. Мощности, фации, современная геологическая структура, перспективы нефтегазоносности (по А.Е. Лукину, П.М. Чепилу): 1 — изогипсы отражающих горизонтов нижнего карбона; 2 — толщины карбонатов нижневизейской плиты; 3 — линия выклинивания карбонатов нижнего визе; 4 — соляные штоки; 5 — номер скважины/толщина карбонатов нижнего визе; УВ-залежи в карбонатных коллекторах C_1v_1 ; 6 — газоконденсатные, 7 — нефтяные; 8 — участки развития карбонатных органогенных построек и аккумулятивных тел (биогермы, банки и др.); 9 — морские депрессионные терригенно-кремнисто-глинисто-доманикоидные отложения; 10 — морские депрессионные карбонатно-кремнисто-доманикоидно-глинистые отложения; 11 — шельфовые карбонатные отложения; 12 — лагунно-шельфовые терригенно-карбонатные отложения.

Fig.14: Sribne megaatoll of Lower Viseanage. Thickness, facies, modern geological structure, oil-and-gas prospects (according to A.E. Lukin, P.M. Chepil): 1 — isohypses of Lower Carboniferous reflecting horizons; 2 — thickness of carbonates of the Lower Visean plate; 3 — pinch-out line for the Lower Visean carbonates; 4 — salt domes; 5 — well number/ thickness of Lower Visean carbonates; HC pools in C_1v_1 carbonate reservoirs: 6 — gas condensate, 7 — oil; 8 — areas of organogenic carbonate structures and accumulative bodies (bioherms, banks, etc.); 9 — terrigenous-siliceous-clayey-domanicoid sediments of marine depressions; 10 — carbonate-siliceous-domanicoid-clayey sediments of marine depressions; 11 — shelf carbonate sediments; 12 — lagoon-shelf terrigenous-carbonate sediments.

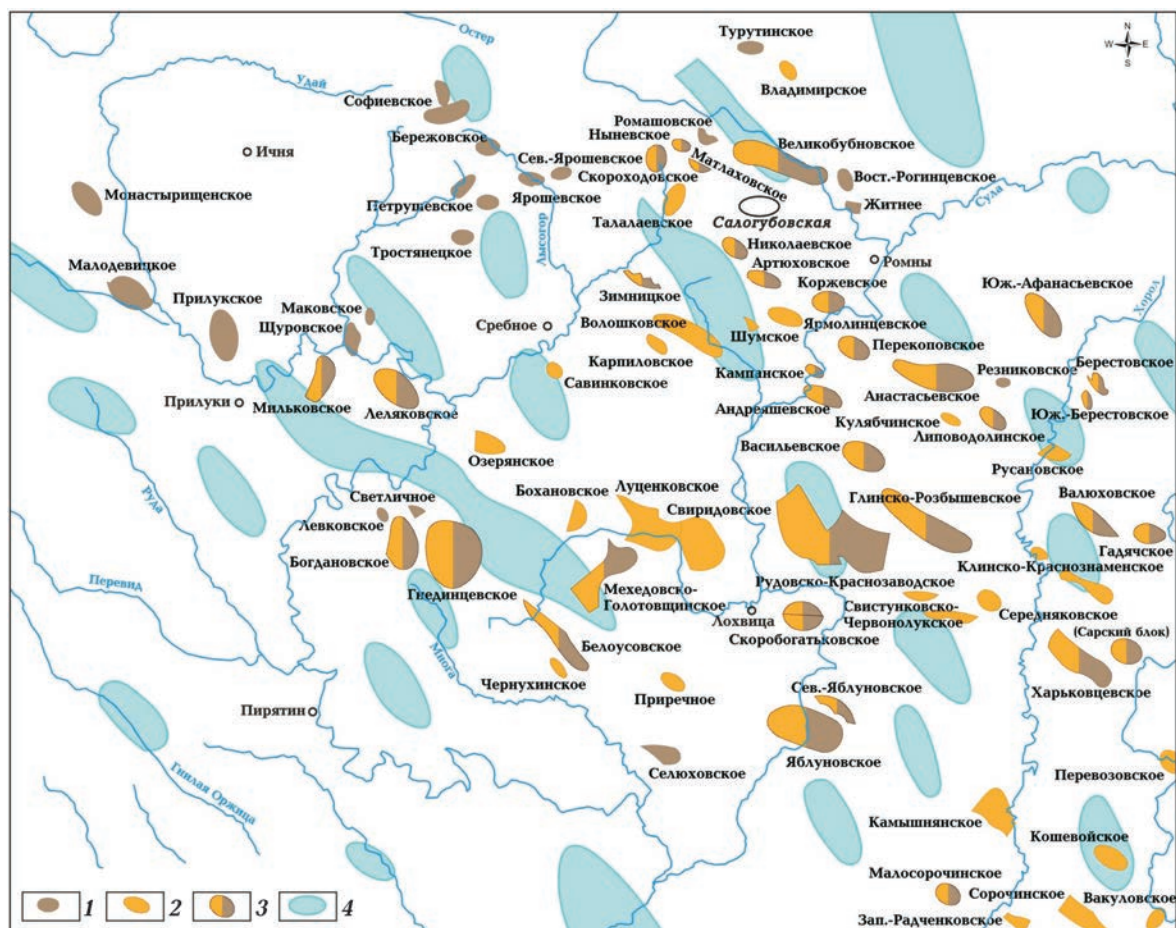


Рис. 15. Повышенные содержания урана в поверхностных водах Сребненской депрессии и ее обрамления (по Н.Н. Макаренко, с изменениями). Месторождения: 1 — нефтяные, 2 — газоконденсатные, 3 — нефтегазоконденсатные; 4 — повышенное содержание урана.

Fig. 15: Increased concentrations of uranium in surface water of Sribne depression and its framing (according to N.N. Makarenko, with changes). Fields: 1 — oil, 2 — gas-condensate, 3 — oil-gas-condensate; 4 — increased concentration of uranium.

лекторах расположенного в юго-восточном сегменте СД Светличного месторождения [Лукин и др., 2012а]. Здесь было получено наибольшее значение концентрации гелия — 1,78 % (масс.) или 10,72 % (мольн.).

Рифогенно-карбонатные массивы нижневизейского Сребненского мегаатолла [Лукин и др., 1994а] характеризуются большим морфогенетическим разнообразием. Наряду с обширными уплощенными органогенными постройками внешнего обрамления, на периферии собственно депрессионной области присутствуют также их сателлиты — предрифово-шлейфовые аккумулятивные тела, а также рифы-пиннак-

лы. По-видимому, такова природа прогнозного рифогенно-карбонатного тела на Светличном месторождении (рис. 16, 17), которое существенно отличается от основных построек внешнего обрамления (нижневизейские карбонатные тела на Гнединцевском и Богдановском месторождениях) по форме и высоким градиентам толщины. Это — валоподобное предрифово-шлейфовое аккумулятивное тело, осложненное рифом-пиннаклом на его южном окончании, где открыто газоконденсатное месторождение. Для оценки перспектив нефтегазоносности его остальной части с нефтяными залежами в нижневизейских пес-

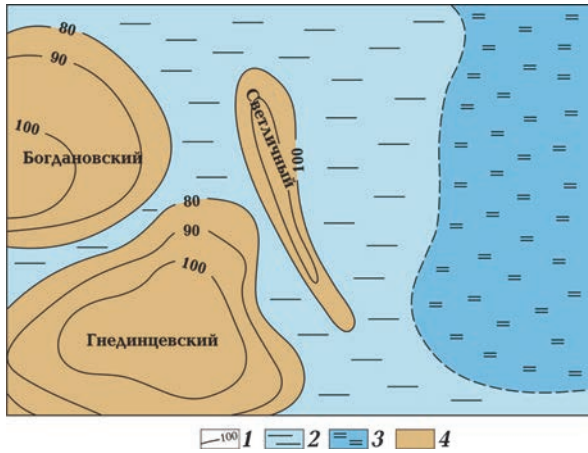


Рис. 16. Сегмент Сребненского нижневизейского мегаатолла [Лукин и др., 2012а]: 1 — изопакиты нижневизейских рифогенных карбонатов; 2 — темно-цветные глинисто-карбонатные отложения; 3 — доманикиты; 4 — рифогенно-карбонатные массивы.

Fig. 16. Segment of the Sribne megaatollof of the Lower Viseanage [Лукин и др., 2012а]: 1 — isopachites of Lower Visean reef carbonates; 2 — dark-colored clay-carbonate sediments; 3 — domanikites; 4 — reef-carbonate massifs.

чаниках горизонта В-26 была пробурена специальная скважина, которая в интервале 3791—3818 м вскрыла нижневизейские известняки (продуктивный горизонт В-25).

При испытании из указанного интервала были получены притоки воды с повышенным содержанием растворенного газа. При отстаивании отобранных проб жидкости минеральная взвесь осаждалась на дно, на поверхности образовывалась гидрофобная масляная пленка, над жидкос-

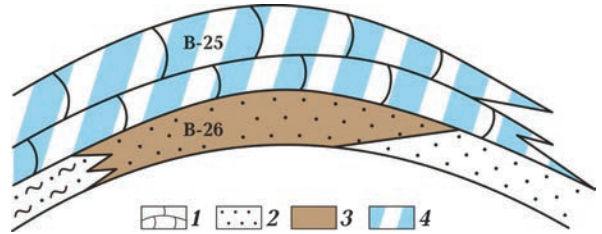


Рис. 17. Разрез нижневизейских продуктивных горизонтов Светличного месторождения [Лукин и др., 2012а]: 1 — рифогенно-карбонатные коллекторы; 2 — песчаные коллекторы; 3 — нефтяная залежь; 4 — предполагаемое газонасыщение.

Fig. 17. Section of the Lower Visean productive horizons within the Svetlichnoye field [Лукин и др., 2012а]: 1 — reef-carbonate reservoirs; 2 — sand reservoir; 3 — oil pool; 4 — estimated gas saturation.

тью скапливался газ. Вещественный состав указанных продуктов фазовой дифференциации был изучен в лабораториях Черниговского отделения УкрГГРИ.

Жидкость является типичной для глубоководолагающих горизонтов (зона весьма затрудненного водообмена) высокоминерализованной (свыше 150 г/кг) пластовой водой хлоркальциевого типа с отношением $Na/Cl = 0,55$ и повышенным содержанием брома, бора, аммония и калия. Пленка, образовавшаяся на поверхности воды, имеет конденсатно-нефтяную природу и представляет собой смесь нефтяных, метановых и ароматических УВ.

Твердофазный осадок представляет собой смесь различных минералов (рис. 18), представленных каолинитом, хлоритом,

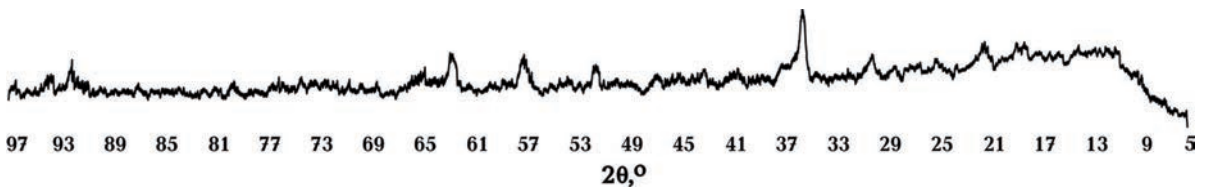


Рис. 18. Дифрактограмма (ДРОН-3) взвеси в пластовой жидкости (скв. Светличная-1, инт. 3791—3818 м; горизонт В-25). Минеральный состав: магнетит, гетит, кальцит, анкерит, сидерит, антраксолит, полевой шпат, анатаз, цинкит, барит, циркон, медь самородная, каолинит, хлорит [Лукин и др., 2012а].

Fig. 18: Diffractogram (DRON-3) of suspension in reservoir fluid (well Svetlichnoye-1, depth interval 3791—3818 m; B-25 horizon). Mineral composition: magnetite, goethite, calcite, ankerite, siderite, anthrazolite, feldspar, anatase, zincite, barite, zircon, native copper, kaolinite, chlorite [Лукин и др., 2012а].

магнетитом, гетитом, анкеритом, сидеритом, твердым битумом типа антраксолита, полевым шпатом, анатазом, цинкитом, баритом, цирконом, а также частицами самородных металлов (медь, цинк). В целом указанная минеральная ассоциация соответствует составу вторичных коллекторов глубокозалегающих продуктивных горизонтов нижнего карбона ДДВ, сформированных в результате гипогенно-метасоматических процессов преобразования как карбонатных, так и терригенных (песчаных) пород [Лукин, 2002]. Следует отметить сходство этой дифрактограммы с дифрактограммами инъекций темноцветного пелитоморфного полиминерального вещества по трещинам естественного фрекинга в глубокозалегающих породах нижнего карбона центрального сегмента ДДВ [Лукин, 2000]. Возможно, это — продукты аморфизации, обусловленные, согласно [Гуфельд, Матвеева, 2011, с. 253], уже упоминавшейся «имплантацией легких газов в разнообразные природные минеральные агрегаты».

В свете указанных особенностей природы и вещественного состава жидкой и твердой фаз продуктов опробования нижневизейских карбонатных коллекторов Светличного месторождения особого внимания заслуживает гелиево-углеводородно-азотный состав газа (см. таблицу). Отсутствие в изученных пробах даже следов кислорода (в сочетании с аномально высоким содержанием гелия и повышенной ролью гомологов метана) позволяет исключить загрязнение воздухом и рассматривать этот газ как аутентичный глубинный. В связи с этим возникает вопрос об источниках азота и гелия. Согласно наиболее обоснованным представлениям [Соколов, 1971], источник больших концентраций молекулярного азота в газовых залежах на глубинах свыше 2—3 км связан с метаморфическими или магматическими породами. Это находится в соответствии с геохимией азота в алмазоносных кимберлитах и лампроитах (а также в самих алмазах) и экспериментальными исследованиями состава газов, выделяющихся из различных кристаллических пород при нагревании. При этом

Состав газа	% мольн.	% масс.
O ₂	0,00	0,00
CO ₂	0,23	0,42
N ₂	55,93	64,90
He	10,72	1,78
метан	22,75	15,11
этан	4,42	5,50
пропан	3,95	7,21
i-бутан	0,54	1,30
n-бутан	1,08	2,61
пентан + высшие УВ	0,08	0,38

Примечание. Водород не определялся.

наибольшие (7—18 %) концентрации N₂ были установлены в газах, полученных при нагревании разнообразных вулканических пород (базальтов, андезитов, липаритов и др.), что находится в соответствии с вышеуказанными особенностями строения СД — наличием в ее основании крупной рифейско-девонской вулканотектонической структуры. Кроме того, при этом (особенно при нагревании базальтов) выделяется значительное количество CO₂, содержание которого в изученных пробах также повышено по сравнению с обычным свободным газом месторождений ДДВ.

Более сложным является вопрос об источнике гелия. Как отмечалось, повышенная гелиеность газов свойственна нефтегазоносным провинциям древних платформ, достигая максимума в базальных слоях осадочного чехла и разуплотненных породах докембрийского фундамента. Это вполне соответствует базирующимся на геологических и изотопно-геохимических закономерностях гелиености представлениям о господстве в земной коре радиогенного гелия (изотоп ⁴He — продукт α-распада радиоактивных элементов в земных недрах) и доминирующей роли среди его источников пород «гранитного слоя» (и,

в частности, верхней его аккреционной кромки — кристаллического фундамента нефтегазоносных осадочных бассейнов). В данном случае, учитывая большие (свыше 8 км) глубины залегания фундамента, для появления этой гелиевой аномалии следует предполагать наличие внутривулканитовых источников гелия, к которым помимо девонских вулканитов возможно относятся обогащенные ураном доманикоидные (черносланцевые) фации (рудовские слои), парагенетичные нижневизейскому рифогенно-карбонатному комплексу (на стратиграфически скользящих границах рифогенных карбонатов и черных сланцев присутствуют радиоактивные реперы). Вместе с тем, не следует игнорировать и возможную роль гораздо более глубоких источников гелия, причем связанных не только с нижележащими (на расстоянии 300—500 м ниже подошвы нижневизейских рифогенно-карбонатных коллекторов) верхнедевонскими эффузивами, а также породами рифея [Лукин и др., 1992] и архейско-протерозойского фундамента, но и с мантией. В связи с этим, следует учесть, что центральная часть ДДВ (данные по Глинско-Розышевскому, Яблунскому и другим месторождениям), включая СД (данные по Светличному, Ярошевскому, Талалаевскому месторождениям), характеризуется повышенными (до $16,7 \cdot 10^{-8}$) значениями отношения $^3\text{He}/^4\text{He}$ [Травникова, Астахов, 1981; Гордиенко, Тарасов, 2001].

Аномально высокое содержание гелия в карбонатных коллекторах в сочетании с данными [Левшунова, 1994] о поглощении водорода карбонатными породами, особенно интенсивном в темноцветных пелитоморфных известняках уолсортских иловых холмов нижнего карбона [Лукин и др., 2016], подтверждает разуплотняющий эффект имплементации легких газов [Гуфельд, Матвеева, 2011].

К сожалению, газ Светличного и других месторождений СД и ее обрамления не анализировался на содержание водорода. В связи с этим особого внимания заслуживают упоминавшиеся (см. рис. 15) урановые аномалии в поверхностных водах на территории СД и ее обрамления, обусловленные,

как уже отмечалось, восходящим потоком водорода — мощного восстановителя, о чем свидетельствуют уже упоминавшиеся данные изучения парагенеза углеводородных и урановых месторождений (Газли и др.).

Об интенсивной водородной дегазации на разных этапах эволюции Сребненской тектоно-магматической структуры (СД и ее обрамление) свидетельствуют также микро- и нановключения в песчаных, карбонатных и пелитоморфных (черносланцевых, доманикоидных) породах продуктивных горизонтов частиц самородных металлов (включая оксифильные элементы Al, Zn, W и др.), природных сплавов и интерметаллидов, трассеров восходящих потоков глубинных восстановленных флюидов [Лукин, 2005]. Присутствие среди них разнообразных микро- и нановключений интерметаллидов и природных сплавов, а также уникальная находка силицида железа [Лукин, Новгородова, 1994] в сочетании с геофизическими данными может рассматриваться как косвенное подтверждение представленной В. Н. Ларина о металлосфере и интерметаллидно-силицидном диапиризме [Лукин, Шестопалов, 2020]. Весьма интенсивная специфической конфигурации Сребненская геомагнитная аномалия (см. рис. 8), в сочетании с указанными геохимическими индикаторами (урановые аномалии, включения самородных металлов, интерметаллидов и др.), длительность и характер петрохимической эволюции магматизма свидетельствуют о возможной связи Сребненской КС с таким интерметаллидно-силицидным диапиром. Это наиболее приемлемое объяснение природы Сребненской комплексной геофизической аномалии, если учесть большой удельный вес и ферромагнитность силицида железа — зюссита [Лукин, Новгородова, 1994].

Таким образом, есть основания предполагать существование в пределах СД крупного водородного либо гибридного гелиево-водородного месторождения (группы месторождений), которое в отличие от углеводородно-газовых представляет собой сложную газовую систему, включающую восходящий поток легких газов, экраниро-

вание его нижнепермскими соленосными отложениями, а также депонирование водорода в породах нижнего визе, нижнего башкира и нижней перми.

Заключение. 1. Весьма благоприятными для освоения водородного потенциала земных недр являются кольцевые тектоно-магматические структуры. Именно с ними связаны длительно действующие трубы водородной дегазации. Тектоно-формационная эволюция таких структур благоприятна для формирования месторождений эндогенного водорода, которые представляют собой динамические газоаккумулирующие системы, отдельные сегменты которых благоприятны для формирования водородных «залежей».

2. Базовым сегментом этих КС является эксплозивно-вулканогенная депрессия — кальдера. На первом этапе развития таких структур они представляют собой трубы «горячей» дегазации (сгорание водорода как главный фактор эксплозивного вулканизма), который затем сменяется длительным этапом «холодной» дегазации и водородно-диссипативными процессами.

3. Тектонотипом наиболее перспективной на водород КС является СД, с которой возможно связано возникновение ДДА — тектонотипа континентальных рифтогенов.

Геолого-геофизические данные свидетельствуют о процессах длительной водородной дегазации в пределах СД и ее обрамления, для более детального изучения которой целесообразно провести комплекс геофизических и геохимических полигонных исследований, включающих:

- 3D-сейсморазведку ОГТ;
- детальные геомагнитные, гравиметриче-

ские и геотермические исследования; — газогеохимическую съемку с целью выявления водородных и гелиево-водородных аномалий с детализацией в пределах мелких КС — западин (наиболее информативным является метод гелиево-водородно-торонной съемки, разработанной в Институте физики Земли РАН, успешно апробированной на Калужской и других КС [Козлова и др., 1999]);

– бурение сверхглубокой параметрической скважины в центральной части СД (информация о предпочтительных участках дополнительных исследований для обоснования мест заложения скважины будет представлена) с проведением комплекса современных промыслово-геофизических методов, включая газовый (гелиевый и водородный) каротаж. Учитывая особую роль СД в формировании Днепровско-Донецкого палеорифта и ее возможную связь с интерметаллидно-силицидным мантийным диапиром, эта скважина может рассматриваться в статусе опорной.

4. Как уже отмечалось в работе [Шестопалов, 2020], в связи со значительным резервом неразведанных ресурсов углеводородов и существенным объемом дегазации водорода, превышающим затраты на формирование скоплений углеводородов, *в дальнейшем целесообразно выполнять поисково-разведочные работы на углеводороды и водород как единую комплексную задачу. Целесообразность такой комплексности особенно возрастает в связи с увеличением объемов бурения на большие глубины, в пределах которых концентрации водорода, как правило, возрастают.*

Список литературы

Арсирый Ю.А., Кабышев Б.П., Лебедь В.П., Лукин А.Е., Шевченко А.Ф. Перспективы нефтегазоносности Сребненской депрессии в Днепровско-Донецкой впадине. *Геология нефти и газа*. 1980. № 5. С. 18—23.

Атлас геологического строения и нефтегазо-

носности Днепровско-Донецкой впадины. Киев: ГКП ЦТЭ, 1981. 190 с.

Багрий І.Д., Карпенко О.М., Семенюк В.Г., Глонь В.А. Геолого-структурні термо-атмогеохімічні технології прогнозування, пошуку і розвідки родовищ вуглеводнів: навч. по-

- сіб. Київ: Вид. ІГН НАН України, 2016. 309 с.
- Ваганов В.И., Иванкин П.Ф., Кропоткин П.Н., Трухалев А.И., Семененко Н.П., Цымбал С.Н., Татаринцев В.И., Глуховский М.З., Булгаков Е.А. Взрывные кольцевые структуры щитов и платформ. Москва: Недра, 1985, 200 с.
- Гавриш В.К., Забелло Г.Д., Рябчун Л.И., Лукин А.Е., Недошовенко А.И. Геология и нефтегазоносность Днепровско-Донецкой впадины. Глубинное строение и геотектоническое развитие. Киев: Наук. думка, 1989. 208 с.
- Геологический словарь. Отв. ред. К.Н. Паффенгольц. Москва: Недра, 1978. Т. 1. 488 с.
- Глонь В.А. Особливості формування та прогнозування нафтогазоносності Срібнянського прогину комплексом структурно-термо-атмогеохімічних досліджень: *Автореф. дис. ... канд. геол. наук.* Київ, 2019. 21 с
- Гоньшакова В.И., Чернышев Н.М., Волкова В.М. Расчленение докембрийских трапповых формаций юго-запада Восточно-Европейской платформы. *Советская геология.* 1989. № 9. С. 65—72.
- Гордиенко В.В., Тарасов В.Н. Современная активизация и изотопия гелия территории Украины. Киев: Знання, 2001. 100 с.
- Горяинов П.М., Иванюк Г.Ю. Энергетическая перколяция — ресурс новых идей в геотектонике. *Вестник Воронеж. ун-та. Геология.* 2011. Вып. 11. С. 7—22.
- Гуфельд И.Л. Сейсмический процесс. Физико-химические аспекты. Москва: ЦНИИ-Маш, 2007. 160 с.
- Гуфельд И.Л., Матвеева М.И. Барьерный эффект дегазации и деструкция земной коры. *Докл. РАН.* 2011. Т. 438. № 2. С. 253—258.
- Ермаков И.М., Лукин А.Е., Турчаненко Н.Т. Додевонский грабен Днепровско-Донецкого авлакогена. *Докл. АН УССР.* 1988. № 3. С. 10—13.
- Жабрев И.П. Суперколлекторы и их роль в управлении системой разработки. *Геология нефти и газа.* 1986. № 8. С. 1—6.
- Казанкова Э.Р., Корнилова Н.В. Геоэкологические аспекты функционирования Северо-Старопольского подземного хранилища газа (с позиции нелинейной геодинамики). *Грозненский естественнонаучный бюллетень.* 2019. Т. 4. № 3(17). С. 41—48. <https://doi.org/10.25744/genb.2020.17.3.005>.
- Казанкова Э.Р., Корнилова Н.В. Геоэкологические проблемы подземных хранилищ газа (на примере Московского региона). *Бюллетень МОИП, отд. биол.* 2009. Т. 114. Вып. 3. Приложение 1, часть 1. С. 388—397.
- Казанкова Э.Р., Корнилова Н.В. Калужская кольцевая структура — результат самоорганизации геологического пространства. *Георесурсы, геознергетика, геополитика.* 2015. № 1(11). 11 с. Режим доступа: <http://www.oilgasjournal.ru>.
- Казанкова Э.Р., Судо Р.М. Нелинейная геодинамика и экология недр (с позиции самоорганизации полей напряжений). В кн.: *Фундаментальный базис новых технологий нефтяной и газовой промышленности.* Москва: ГЕОС, 2000. С. 359—364.
- Козлова И.С., Рудаков В.П., Шулейкин В.И., Войтов Г.И., Баранова Л.В. Эманационные и электрические эффекты в атмосфере подпочв над Калужской импактной кольцевой структурой. *Российский журнал наук о Земле.* 1999. Т. 1. № 6. С. 503—510.
- Кропоткин П.Н. Тектонические напряжения в земной коре по данным непосредственных измерений. В кн.: *Напряженное состояние земной коры.* Москва: Наука, 1973. С. 21—31.
- Кропоткин П.Н., Ефремов В.Н. Тектонические напряжения на платформах и глобальные вариации цикличности. *Геотектоника.* 1987. № 1. С. 3—25.
- Левшунова С.П. Водород и его биогеохимическая роль в образовании углеводородных газов в осадочных породах земной коры: Автореф: дис. ... д-ра геол.-мин. наук. Москва, 1994. 39 с.
- Летников Ф.А. Сверхглубинные флюидные системы Земли. Новосибирск: Наука, 1992. 150 с.
- Летников Ф.А. Синергетика геологических систем. Новосибирск: Наука, 1992. 232 с.
- Летников Ф.А., Карпов И.К., Киселев А.И., Шкондрый Б.О. Флюидный режим земной коры и верхней мантии. Москва: Наука, 1977. 214 с.

- Лукин А.Е. Гипогенно-аллогенетическое разуплотнение — ведущий фактор формирования вторичных коллекторов нефти и газа. *Геол. журн.* 2002. № 4. С. 15—32.
- Лукин А.Е. Глубинная гидрогеологическая инверсия как глобальное синергетическое явление: теоретические и прикладные аспекты. Статья 2. Тектоно-геодинамические аспекты глубинной гидрогеологической инверсии. *Геол. журн.* 2005. № 1. С. 50—67.
- Лукин А.Е. Инъекции глубинного углеводородно-полиминерального вещества в глубокозалегающих породах нефтегазоносных бассейнов. Киев: Наук. думка, 1997. 225 с.
- Лукин А.Е. Инъекции глубинного углеводородно-полиминерального вещества в глубокозалегающих породах нефтегазоносных бассейнов: природа, прикладное и гносеологическое значение. *Геол. журн.* 2000. № 2. С. 7—21.
- Лукин А.Е. Литогеодинамические факторы нефтегазоаккумуляции в авлакогенных бассейнах: *Автореф. дис. ... д-ра геол.-мин. наук.* Киев, 1989. 42 с.
- Лукин А.Е. Проблемы нефтидосинергетики — нелинейной геологии нефти и газа. *Геол. журн.* 2004. № 1. С. 21—39
- Лукин А.Е. Ранневизейский эвксинский бассейн в системе Палеотетиса (в свете современных данных). *Геологія і корисні копалини Світового океану.* 2020. Т. 16. № 2. С. 24—48.
- Лукин А.Е., Владимиров А.С., Ермаков И.М., Турчаненко Н.Т. Проблема додевонского рифтогенеза в Днепровско-Донецком авлакогене. *Геотектоника.* 1992. № 2. С. 30—46.
- Лукин А.Е., Гафич И.П., Макогон В.В., Холодных А.Б. Перспективы нефтегазоносности глубокозалегающих уолсортских карбонатных куполов в центральной части Днепровско-Донецкой впадины. *Доп. НАН України.* 2016. № 8. С. 70—78.
- Лукин А.Е., Довжок Е.И., Книшман А.Ш., Гончаренко В.И., Дзюбенко А.И. Гелиевая аномалия в нефтегазоносных визейских карбонатных коллекторах Днепровско-Донецкой впадины. *Доп. НАН України.* 2012а. № 7. С. 97—104.
- Лукин А.Е., Мелихов В.А., Гридин В.И. Способ выявления слабовыраженных ловушек нефти и газа. *Докл. АН СССР.* 1978. Т. 245. № 6. С. 1447—1451.
- Лукин А.Е., Новгородова М.И. О находке силицида железа внеземного происхождения. *Докл. РАН.* 1994а. Т. 334. № 1. С. 73—76.
- Лукин А.Е., Цеха О.Г., Гейко Т.С., Омельченко В.В. Тектоника северного борта Днепровско-Донецкого авлакогена в контексте общих закономерностей континентального рифтогенеза. *Геол. журн.* 2012б. № 3. С. 7—38.
- Лукин А.Е., Шестопапов В.М. Силицид железа — показатель минерального состава мантии Земли? *Геофиз. журн.* 2020. Т. 42. № 5. С. 3—15. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v42i5.2020.215069>.
- Лукин А.Е., Шпак П.Ф., Чепиль П.М., Мачулина С.В. О Сребненском средневизейском мегаатолле Днепровско-Донецкой впадины. *Доп. НАН України.* 1994б. № 8. С. 101—105.
- Лукин А.Е., Шумлянський В.А., Дьяченко Г.И., Ивантишина О.М. Проблемы холодной дегазации Земли. АН Украины. *Ин-т геол. наук. Препр.* Киев, 1994. 71 с.
- Мальковский В.И., Пэк А.А., Алешин А.П., Величкин В.И. Оценка времени застывания магматической камеры под Стрельцовской кальдерой и ее влияния на нестационарное распределение температур в верхней части земной коры (Восточное Забайкалье, Россия). *Геология рудных месторождений.* 2008. Т. 50. № 3. С. 217—224.
- Маракушев А.А. Импациты. Москва: Изд-во МГУ, 1981 240 с.
- Масайтис В.Л. Астроблемы на территории СССР. *Сов. геология.* 1975. № 11. С. 52—64.
- Нелинейная геодинамика: Сб. науч. трудов. Отв. ред. Ю.М. Пушаровский. Москва: Наука, 1994. 191 с.
- Николис Г., Пригожин И. Самоорганизация

- в неравновесных системах. Москва: Мир, 1977. 512 с.
- Перевозчиков Г.В. Поле водорода на месторождении Газли по данным геохимических исследований в нефтегазоносном регионе Средней Азии. *Нефтегазовая геология*. 2012. Т. 7. № 1. С. 1—13.
- Петров В.Г. Особенности строения Калужской структуры. *Бюлл. МОИП, Отдел. геол.* 1969. Т. 44. Вып. 6.
- Петров В.П. О выделении Калужско-Бельской структурной зоны. *Бюлл. МОИП. Отдел. геол.* Т. 46. Вып. 3. 1971.
- Портнов А.М. Энергетика вулканов. *Природа и человек*. 2005. № 4. С. 10—11.
- Пригожин. И., Стенгерс И. Порядок из хаоса. Москва: Прогресс, 1986. 432 с.
- Рябов В.В. Лапковский А.А. Вулкано-тектонические структуры в сибирских траппах как области накопления и разгрузки пластовых флюидов в процессе тектоно-магматической активизации региона. *Геология и геофизика*. 2008. № 11. С. 490—495.
- Сворень И.М. Физико-химическая модель наводороживания твердых тел: Тез. докл. 7-го Всесоюзного совещания «Термобарометрия и геохимия рудообразующих флюидов (по включениям в минералах)». Ч. 2. Львов. 1985. С. 224—226.
- Словарь геологии нефти и газа. Ред. В.Д. Наливкин. Ленинград: Недра, 1988. 680 с.
- Соколов В.А. Геохимия природных газов. Москва: Недра, 1971. 334 с.
- Травникова Л.Г., Астахов М.И. Изотопно-геохимическая характеристика природных газов Днепровско-Припятской нефтегазоносной провинции. В кн.: Происхождение и формирование состава природных газов по данным изотопной геохимии. Ленинград: Изд. ВНИГРИ, 1981. С. 83—104.
- Фесенков В.Г. Метеоры и метеориты. Алмата: Изд-во АН Каз ССР, 1949. 49 с.
- Шестопалов В.М. О геологическом водородо-де. *Геофиз. журн.* 2020. Т. 42. № 6. С. 3—35. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v42i6.2020.222278>.
- Шестопалов В.М., Лукин А.Е., Згонник В.А., Макаренко А.Н., Ларин Н.В., Богуславский А.С. Очерки дегазации Земли. Киев, 2018. 632 с.
- Якуцени В.П. Геология гелия. Ленинград: Недра, 1968. 232 с.
- Briere, D., & Jerzykiewicz, T. (2016). On generating a geological model for hydrogen gas in the southern Taoudeni Megabasin (Bourakebougou area, Mali). *International Conference and Exhibition. Barcelona, Spain, 3—6 April 2016*. 342 p. <https://doi.org/10.1190/ice2016-6312821.1>.
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2012.03.009>.
- Keller, G., Adatte, T., Berner, Z., Harting, M., Baum, G., Prauss, M., & Stueben, D. (2007). Chicxulub impact predates K-T boundary: New evidence from Brazos, Texas. *Earth and Planetary Science Letters*, 255(3—4), 339—356. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2006.12.026>.
- Keller, G., Mateo, P., Monkenbusch, J., Thibault, N., Punekar, J., Spangenberg, J.E., Abramovich, S., Ashckenazi-Polivoda, S., Schoene, B., Eddy, M.P., Samperton, K.M., Khadri, S.F.R., & Adatte, T. (2020). Mercury linked to Deccan Traps volcanism, climate change and the end-Cretaceous mass extinction. *Global and Planetary Change*, 194, 1—17. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2020.103312>.
- 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, 369—38. <https://doi.org/10.1007/s11053-014-9257-5>.
- Mateo, D., Keller, G., Adatte, T., Bitchong, A.M., Spangenberg, J.E., Vennemann, T., & Hollis, C.J. (2019). Deposition and age of Chicxulub impact spherules on Gorgonilla Island, Colombia. *GSA Bulletin*, 132, 215—232. <https://doi.org/10.1130/b35287.1>.

- Prinzhofer, A., Cisse, C.S.T., & Diallo, A.B. (2018). Discovery of a large accumulation of natural hydrogen in Bourakebougou (Mali). *International Journal of Hydrogen Energy*, 43(42), 19315—19326. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.08.193>.
- Sanders, D., Keller, G., Schlagintweit, F., & Stüdeny, M. (2019). Cretaceous-Paleocene transition along a rocky carbonate shore: Implications for the Cretaceous-Paleocene boundary event in shallow platform environments and correlation to the deep sea. In *Mass Extinctions, Volcanism, and Impacts: New Developments* (pp. 137—165). Geological Society of America. [https://doi.org/10.1130/2019.2544\(06\)](https://doi.org/10.1130/2019.2544(06)).
- Schoene, B., Eddy, M.P., Samperton, K.M., Keller, C.B., Keller, G., Adatte, T., & Khadri, S.F.R. (2019). U-Pb constraints on pulsed eruption of the Deccan Traps across the end-Cretaceous mass extinction. *Science*, 363, 862—866. <https://doi.org/10.1126/science.1267881>.
- Zgonnik, V. (2020). The occurrence and geoscience of natural hydrogen: a comprehensive review. *Earth-Science Reviews*, 203, 103140. <https://doi.org/10.1016/j.earsci-rev.2020.103140>.

Tectono-magmatogenerating structures in zones of increased geodynamic instability as priority objects for exploration of hydrogen fields

A.E. Lukin¹, V.M. Shestopalov², 2021

¹Institute of Geological Sciences of the NAS of Ukraine, Kiev, Ukraine

²Radio-Environmental Centre of the NAS of Ukraine, Kiev, Ukraine

Based on comparison of the migration activity of hydrocarbons, helium and hydrogen, the paper substantiates the types of cap rocks for hydrogen accumulations (pools), which most of all contributes to its partial shielding at steady feed. Such cap rocks are represented by predominantly smectite clay, pure (without inclusions) salt at depths over 1—2 km, non-fractured quartz sandstone at depths over 4 km, effusive and hypabissal intrusive rocks, as well as basement rocks undisturbed by metamorphic decomposition processes. Endogenous hydrogen is considered as the main factor of dissipative structures formation. Occurrence of hydrogen, hydrocarbon and ore macro accumulations is a kind of energy, information-geochemical fluctuations, which are intermediate states of dissipative structures subordinated to the planetary heat and mass transfer processes caused by the deep Earth degassing. In this context, the nature of geodynamic instability (activation of vertical movements, shifts, tensile and compressive stresses) can be considered as a growing sequence of dissipative processes associated with the energy percolation role of endogenous hydrogen. In the hierarchy of ring structures (RS) (from minor depressions to large structures of dozens kilometres in diameter) special attention should be paid to Sribne RS within the Dnieper-Donets Basin and Kaluga RS within the SW part of the Voronezh anteklisepericline. These ring structures are genetically related to explosion or volcanic calderas, and characterized by ancient origin (Proterozoic) and long-term development, including neo- and actuo-tectonic stages. Intensity of hydrogen degassing in the Sribne RS is confirmed by micro- and nano-inclusions in the black-shale domanicoid rocks of the productive horizons in the form of particles of native metals (including oxyphile elements Al, Zn, W and others), natural alloys and intermetallids, which are tracers of ascending flows of deep reduced fluids. It is reasonable to assume the occurrence of a large hydrogen or helium-hydrogen field (group of fields) within the Sribne RS in the Lower Visian, Lower Bashkirian and Lower Permian aged rocks, which are shielded by the Lower Permian salt deposits.

Key words: deep hydrogen, hydrocarbons, ring structures, Sribne and Kaluga structures, hydrogen fields.

References

- Arsiriy, Yu.A., Kabyshev, B.P., Lebed, V.P., Lukin, A.E., & Shevchenko, A.F. (1980). Prospects of oil-and-gas content in the Sribne Depression within the Dnieper-Donets Basin. *Geologiya Nefti i Gaza*, (5), 18—23 (in Russian).
- Atlas of the geological structure and oil- and-gas content in the Dnieper-Donets Basin (1981). Kyiv: GKP CTE, 190 p. (in Russian).
- Bagriy, I.D., Karpenko, O.M., Semenyuk, V.G., & Glon, V.A. (2016). Geological-structural-thermo-atmo-geochemical technologies of prediction, prospecting and exploration of hydrocarbon fields: textbook. Kyiv: Publ. of the Institute of Geological Sciences of the National Academy of Sciences of Ukraine, 309 p. (in Ukrainian).
- Vaganov, V.I., Ivankin, P.F., Kropotkin, P.N., Trukhalev, A.I., Semenenko, N.P., Tsymbal, S.N., Tatarintsev, V.I., Glukhovskiy, M.Z., & Bulgakov, E.A. (1985). *Explosion ring structures in the shields and platforms*. Moscow: Nedra, 200 p. (in Russian)
- Gavrish, V.K., Zabello, G.D., Ryabchun, L.I., Lukin, A.E., Nedoshovenko, A.I. (1989). Geology and oil-and-gas content of the Dnieper-Donets Basin. *Depth structure and geotectonic development*. Kiev: Naukova Dumka, 208 p. (in Russian).
- Paffengolts, K.N. (Ed.). (1978). *Dictionary of Geology* (Vol. 1). Moscow: Nedra, 488 p. (in Russian).
- Glon, V.A. (2019). Features of formation and forecast of oil-and-gas content of the Sribne depression based on complex of structural-thermo-atmogeochemical studies. *Extended abstract of candidate's thesis*. Kyiv, 21 p. (in Ukrainian).
- Gonshakova, V.I., Chernyshev, N.M., & Volkova, V.M. (1989). Subdivision of Precambrian trap formations in the southwest of the East European Platform. *Sovetskaya Geologiya*, (9), 65—72 (in Russian).
- Gordienko, V.V., & Tarasov, V.N. (2001). *Recent activation and helium isotope of the Ukrainian territory*. Kyiv: Znaniya, 100 p. (in Russian)
- Goryainov, P.M., & Ivanyuk, G.Yu. (2011). Energy percolation — a resource of new ideas in geotectonics. *Vestnik Voronezhskogo universiteta. Geologiya*, (11), 7—22 (in Russian).
- Gufeld, I.L. (2007). Seismic process. *Physical and chemical aspects*. Moscow: TsNIIMash, 160 p. (in Russian)
- Gufeld, I.L., & Matveeva, M.I. (2011). Barrier effect of degassing and destruction of the Earth's crust. *Doklady RAN*, 438(2), 253—258 (in Russian).
- Ermakov, I.M., Lukin, A.E., & Turchanenko, N.T. (1988). Pre-Devonian graben in the Dnieper-Donets avlacogene. *Doklady AN USSR*, (3), 10—13 (in Russian).
- Zhabrev, I.P. (1986). Super reservoirs and their role in management of the development system. *Geologiya Nefti i Gaza*, (8), 1—6 (in Russian).
- Kazankova, E.R., & Kornilova, N.V. (2019). Geoeological aspects of the functioning of the Severo-Staropolskoye underground gas storage (from the standpoint of nonlinear geodynamics). *Groznenskiy yestestvennonauchnyy byulleten*, 4(3), 41—48. <https://doi.org/10.25744/genb.2020.17.3.005> (in Russian).
- Kazankova, E.R., & Kornilova, N.V. (2009). Geoenvironmental problems of underground gas storage facilities (using Moscow region as an example). *Byulleten Moskovskogo Obshchestva Ispytatelei Prirody. Otdel Biologicheskii*, 114(3). Annex 1, part 1, 388—397 (in Russian).
- Kazankova, E.R., & Kornilova, N.V. (2015). Kaluga ring structure as a result of self-organization of geological media. *Georesursy, Geoenergetika, Geopolitika*, (1), 11 p. Retrieved from <http://www.oilgasjournal.ru> (in Russian).
- Kazankova, E.R., Sudo, R.M. (2000). Non-linear geodynamics and ecology of the Earth's interior (in terms of self-organization of stress fields). In *Basis research for new technologies in oil-and-gas industry* (pp. 359—364). Moscow: GEOS (in Russian).
- Kozlova, I.S., Rudakov, V.P., Shuleikin, V.I., Voitov, G.I., & Baranova, L.V. (1999). Emanation and electrical effects in subsoil atmosphere above the Kaluga impact ring structure. *Rossiyskiy Zhurnal nauk o Zemle*, 1(6), 503—510 (in Russian).
- Kropotkin, P.N. (1973). Tectonic stresses in the Earth's crust according to direct measure-

- ments. In *Stressed state of the Earth's crust* (pp. 21—31). Moscow: Nauka (in Russian).
- Kropotkin, P.N., & Efremov, V.N. (1987). Tectonic stresses on platforms and global variations of cyclicity. *Geotektonika*, (1), 3—25 (in Russian).
- Levshunova, S.P. (1994). Hydrogen and its biogeochemical role in the formation of hydrocarbon gases in sedimentary rocks of the Earth's crust. *Extended abstract of candidate's thesis*. Moscow, 39 p. (in Russian).
- Letnikov, F.A. (1992). *Ultradeep fluid systems of the Earth*. Novosibirsk: Nauka, 150 p. (in Russian).
- Letnikov, F.A. (1992). *Synergetics of geological systems*. Novosibirsk: Nauka, 232 p. (in Russian).
- Letnikov, F.A., Karpov, I.K., Kiselev, A.I., & Shkondriy, B.O. (1977). *Fluid regime of the Earth's crust and upper mantle*. Moscow: Nauka, 214 p. (in Russian).
- Lukin, A.E. (2002). Hypogenous-allogenic compression — a leading factor in the formation of secondary oil-and-gas reservoirs. *Geologichnyi Zhurnal*, (4), 15—32 (in Russian).
- Lukin, A.E. (2005). Deep hydrogeological inversion as synergistic global phenomenon: theoretical and applied aspects. Article 2: Tectonic and geodynamic aspects of deep hydrogeological inversion. *Geologichnyi Zhurnal*, (1), 50—67 (in Russian).
- Lukin, A.E. (1997). *Injections of deep hydrocarbon-polymineral substance in the deep lying rocks of oil-and-gas bearing basins*. Kyiv: Naukova Dumka, 225 p. (in Russian).
- Lukin, A.E. (2000). Injection of deep hydrocarbon-polymineral substance in the deep lying rocks of oil-and-gas bearing basins: nature, applied and epistemological significance. *Geologichnyi Zhurnal*, (2), 7—21 (in Russian).
- Lukin, A.E. (1989). Lithogeodynamic factors of oil and gas accumulation in avlacogenic basins. *Extended abstract of Doctor's thesis*. Kiev, 42 p. (in Russian).
- Lukin, A.E. (2004). Problems of naftidosynergetics — nonlinear geology of oil-and-gas. *Geologichnyi Zhurnal*, (1), 21—39 (in Russian).
- Lukin, A.E. (2020). The Early Visean Euxinic basin in the system of Paleo-Tethys (in the light of modern data). *Geologiya i korysni kopalnyy Svitovogo okeanu*, 16(2), 24—48 (in Russian).
- Lukin, A.E., Vladimirov, A.S., Ermakov, I.M., & Turchanenko, N.T. (1992). Problem of Pre-Devonian riftogenesis in the Dnieper-Donets avlacogen. *Geotektonika*, (2), 30—46 (in Russian).
- Lukin, A.E., Gafich, I.P., Makogon, V.V., & Kholodnykh, A.B. (2016). Prospects for gas-petroleum potential of deep-lying Waulsortian carbonate bosses in the central part of the Dnieper-Donets Depression. *Dopovidi NAN Ukrainy*, (8), 70—78 (in Russian).
- Lukin, A.E., Dovzhok, E.I., Knishman, A.Sh., Goncharenko, V.I., & Dzyubenko, A.I. (2012a). Helium anomaly in petroliferous Visean carbonate reservoirs of the Dnieper-Donets Depression. *Dopovidi NAN Ukrainy*, (7), 97—104 (in Russian).
- Lukin, A.E., Melikhov, V.A., & Gridin, V.I. (1978). Method of detecting poorly marked oil-and-gas traps. *Doklady AN USSR*, 245(6), 1447—1451 (in Russian).
- Lukin, A.E., & Novgorodova, M.I. (1994). On discovery of iron silicide of extra-terrestrial origin. *Doklady RAN*, 334(1), 73—76 (in Russian).
- Lukin, A.E., Tsekha, O.G., Geyko, T.S., & Omelchenko, V.V. (2012b). Tectonics of the northern flank of the Dnieper-Donets avlacogen in the context of general regularities of continental riftogenesis. *Geologichnyi zhurnal*, (3), 7—38 (in Russian).
- Lukin, A.E., & Shestopalov, V.M. (2020). Ferrosilicide as indicator of mineral composition of the Earth's mantle? *Geofizicheskiy Zhurnal*, 42(5), 3—15. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v42i5.2020.215069> (in Russian).
- Lukin, A.E., Shpak, P.F., Chepil, V.P., & Machulin, S.V. (1994a). On the Sribne Middle Visean megaatoll in the Dnieper-Donets Depression. *Dopovidi NAN Ukrainy*, (8), 101—105 (in Russian).
- Lukin, A.E., Shumlyanskiy, V.A., Diachenko, G.I., & Ivantishina, O.M. (1994b). Problems of cold degassing of the Earth. Kyiv, *Prepr. IGS NASU*, 71 p. (in Russian).

- Malkovskiy, V.I., Pek, A.A., Aleshin, A.P., & Velichkin, V.I. (2008). Estimation of the time of magma chamber solidification under Streltsovo caldera and its influence on non-stationary distribution of temperatures in the upper part of the Earth crust (Eastern Trans-Baikal Region, Russia). *Geologiya rudnykh mestorozhdeniy*, 50(3), 217—224 (in Russian).
- Marakushev, A.A. (1981). *Impactites*. Moscow: Moscow: Publishing house of the Moscow State University, 240 p. (in Russian).
- Masaitis, V.L. (1975). Astroblemes on the territory of the USSR. *Sovetskaya Geologiya*, (11), 52—64 (in Russian).
- Pushcharovskiy, Yu.M. (Ed.) (1994). *Nonlinear geodynamics. Collected works*. Moscow: Nauka, 191 p. (in Russian).
- Nicolis, G., & Prigozhin, I. (1977). *Self-organization in nonequilibrium systems*. Moscow: Mir, 512 p. (in Russian).
- Perevozchikov, V.G. (2012). Hydrogen field within the Gazli field according to geochemical studies in the oil-and-gas region of Central Asia. *Neftegazovaya Geologiya*, 7(1), 1—13 (in Russian).
- Petrov, V.G. (1969). Structural features of the Kaluga structure. *Byulleten Moskovskogo Obshchestva Ispytatelei Prirody. Otdel Geologicheskoy*, 44(6) (in Russian).
- Petrov, V.P. (1971). On the separation of the Kaluga-Belsk structural zone. *Byulleten Moskovskogo Obshchestva Ispytatelei Prirody. Otdel Geologicheskoy*, 46(3) (in Russian).
- Portnov, A.M. (2005). Energy of volcanoes. *Priroda i chelovek*, (4), 10—11 (in Russian).
- Prigogine, I., & Stengers, I. (1986). *Order out of Chaos*. Moscow: Progress, 432 p. (in Russian).
- Ryabov, V.V., & Lapkovskiy, A.A. (2008). Volcano-tectonic structures in Siberian traps as areas of accumulation and discharge of formation fluids during tectonic-magmatic activation of the region. *Geologiya i Geofizika*, (11), 490—495 (in Russian).
- Svoren, I.M. (1985). Physico-chemical model of solids enrichment with hydrogen. *Proceedings from the 7th All-Union Conference «Thermobarometry and geochemistry of ore-forming fluids (by inclusions in minerals)»* (pp. 224—226). Part 2. Lviv (in Russian).
- Nalivkin, V.D. (Ed.). (1988). *Dictionary of Petroleum Geology*. Leningrad: Nedra, 680 p. (in Russian).
- Sokolov, V.A. (1971). *Geochemistry of natural gases*. Moscow: Nedra, 334 p. (in Russian).
- Travnikova, L.G., & Astakhov, M.I. (1981). Isotope-geochemical characteristics of natural gases of the Dnieper-Pripyat oil-gas bearing province. In: *Origin and formation of natural gas composition according to isotopic geochemistry* (pp. 83—104). Leningrad: VNIGRI (in Russian).
- Fesenkov, V.G. (1949). *Meteors and meteorites*. Alma-Ata: Publishers of the Academy of Sciences of Kaz. SSR, 49 p. (in Russian).
- Shestopalov, V.M. (2020). On geological hydrogen. *Geofizicheskij Zhurnal*, 42(6), 3—35. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v42i6.2020.222278> (in Russian).
- Shestopalov, V.M., Lukin, A.E., Zgonnik, V.A., Makarenko, A.N., Larin, N.V., & Boguslavskiy, A.S. (2018). *Essays on Earth Degassing*. Kyiv, 632 p. (in Russian).
- Yakutseni, V.P. (1968). *Helium geology*. Leningrad: Nedra, 232 p. (in Russian).
- Briere, D., & Jerzykiewicz, T. (2016). On generating a geological model for hydrogen gas in the southern Taoudeni Megabasin (Bourakebougou area, Mali). International Conference and Exhibition. Barcelona, Spain, 3—6 April 2016. 342 p. <https://doi.org/10.1190/ice2016-6312821.1>.
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2012.03.009>.
- Keller, G., Adatte, T., Berner, Z., Harting, M., Baum, G., Prauss, M., & Stueben, D. (2007). Chicxulub impact predates K-T boundary: New evidence from Brazos, Texas. *Earth and Planetary Science Letters*, 253(1-2), 105—115.

- netary Science Letters, 255(3—4), 339—356. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2006.12.026>.
- Keller, G., Mateo, P., Monkenbusch, J., Thibault, N., Punekar, J., Spangenberg, J.E., Abramovich, S., Ashckenazi-Polivoda, S., Schoene, B., Eddy, M.P., Samperton, K.M., Khadri, S.F.R., & Adatte, T. (2020). Mercury linked to Deccan Traps volcanism, climate change and the end-Cretaceous mass extinction. *Global and Planetary Change*, 194, 1—17. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2020.103312>.
- 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, 369—38. <https://doi.org/10.1007/s11053-014-9257-5>.
- Mateo, D., Keller, G., Adatte, T., Bitchong, A.M., Spangenberg, J.E., Vennemann, T., & Hollis, C.J. (2019). Deposition and age of Chicxulub impact spherules on Gorgonilla Island, Colombia. *GSA Bulletin*, 132, 215—232. <https://doi.org/10.1130/b35287.1>.
- Prinzhofer, A., Cisse, C.S.T., & Diallo, A.B. (2018). Discovery of a large accumulation of natural hydrogen in Bourakebougou (Mali). *International Journal of Hydrogen Energy*, 43(42), 19315—19326. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.08.193>.
- Sanders, D., Keller, G., Schlagintweit, F., & Stauden, M. (2019). Cretaceous-Paleocene transition along a rocky carbonate shore: Implications for the Cretaceous-Paleocene boundary event in shallow platform environments and correlation to the deep sea. In *Mass Extinctions, Volcanism, and Impacts: New Developments* (pp. 137—165). Geological Society of America. [https://doi.org/10.1130/2019.2544\(06\)](https://doi.org/10.1130/2019.2544(06)).
- Schoene, B., Eddy, M.P., Samperton, K.M., Keller, C.B., Keller, G., Adatte, T., & Khadri, S.F.R. (2019). U-Pb constraints on pulsed eruption of the Deccan Traps across the end-Cretaceous mass extinction. *Science*, 363, 862—866. <https://doi.org/10.1126/science.1269888>.
- Zgonnik, V. (2020). The occurrence and geoscience of natural hydrogen: a comprehensive review. *Earth-Science Reviews*, 203, 103140. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2020.103140>.

Кільцеві тектономагматогенні структури в зонах підвищеної геодинамічної нестабільності — першочергові об'єкти пошуків родовищ водню

О.Ю. Лукін¹, В.М. Шестопапов², 2021

¹Інститут геологічних наук НАН України, Київ, Україна

²Науково-інженерний центр радіогеогеологічних полігонних досліджень НАН України, Київ, Україна

У статті на підставі зіставлення міграційної активності вуглеводнів, гелію і водню обґрунтовано типи порід-покришок для скупчень (покладів) водню, які найбільше сприяють його частковому екрануванню за стійкого підживлення. Такими породами-покришками є суттєво смектитові глини, чиста (без включень) сіль на глибинах більш як 1—2 км, нетріщинуваті кварцові пісковики на глибинах понад 4 км, ефузивні і гіпабісальні інтрузивні породи, а також породи фундаменту, не зачеплені метаморфічними процесами розущільнення. Ендогенний водень розглянуто як головний чинник формування дисипативних структур. Виникнення водневих, вуглеводневих і рудних макроскупчень є свого роду енергетичними, інформаційно-геохімічними флуктуаціями — проміжними станами дисипативних структур, підпорядкованими планетарним процесам тепломасоперенесення, зумовленими глибинною дегазацією Землі. У цьому зв'язку природу геодинамічної нестійкості (активізації вертикаль-

них рухів, зсувів, розтяжних і стискувальних напружень) можна розглядати як наростаючу послідовність дисипативних процесів, які пов'язані із енергетичною перколяційною роллю ендегенного водню. В ієрархії кільцевих структур (КС) (від елементарних западинних до великих — десятки кілометрів у діаметрі) особливої уваги заслуговують КС типу Срібненської в Дніпровсько-Донецькій западині і Калузької у північно-західній частині перикліналі Воронезької антеклізи, які генетично пов'язані з вибуховими або вулканічними кальдерами, характеризуються древнім закладанням (протерозой) і тривалим розвитком, включаючи нео- та актуотектонічні етапи. Інтенсивність водневої дегазации Срібненської КС підтверджується наявністю мікро- і нановключень у чорносланцевих доманікоїдних породах продуктивних горизонтів у вигляді частинок самородних металів, зокрема оксифільних елементів Al, Zn, W та ін., природних сплавів та інтерметалідів, які є трасерами висхідних потоків глибинних відновлюваних флюїдів. Є підстави припускати наявність у межах Срібненської КС великого водневого або гелієво-водневого родовища (групи родовищ) у породах нижнього візе, нижнього башкиру і нижньої пермі, які екрануються нижньопермськими соленосними відкладами.

Ключові слова: глибинний водень, вуглеводні, кільцеві структури, Срібненська, Калузька структури, родовища водню.