

Перспективы Воронежской антеклизы на обнаружение природного водорода

©2022 В. М. Ненахов^{1✉}, В. П. Полеванов²,
А. В. Жабин¹, С. В. Бондаренко¹, Г. С. Золотарева¹

¹Воронежский государственный университет,
Университетская пл. 1, 394018, Воронеж, Российская федерация
²ФГКУ «Росгеолэкспертиза», ул. Малая Ордынка, 34,
115184, Москва, Российская Федерация

Аннотация

Введение: В работе рассматриваются актуальные вопросы перспективности Воронежской антеклизы на предмет выявления залежей природного водорода. Приводится краткий обзор истории изучения и проблем фундаментального и прикладного характера, связанных с проявлениями «золотого» водорода, а также его роли как идеального энергоносителя. Приведены общие сведения о строении Воронежской антеклизы (ВА), которая представляет собой крупнейший сегмент Восточно-Европейской платформы и одновременно структуру с очень важными перспективами на водород. Для подобных структур на основе мирового опыта в соответствующих разделах приведен комплексный анализ минерагенических факторов контроля и локализации природного водорода.

Факторы локализации природного водорода: Важнейшим фактором является поверхность докембрийского фундамента, изученная по геофизическим данным, бурению и эксплуатируемым карьерам. Поверхность представляет собой гигантский свод, пологий в центральной части и с заглублением к периферии и подчеркивается наличием кор выветривания различной степени сохранности. Свод окружен системой впадин и авлакогенов, что в целом благоприятно для формирования газовых эманаций. Присутствие ультраосновных и основных пород, распространенных на разных структурных и возрастных уровнях, является дополнительным вещественным фактором локализации природного водорода. Роль ультраосновных и основных пород двояка. Во-первых, они представляют собой продукты мантийного происхождения, и их транспортировка к поверхности облегчает дегазацию. Во-вторых, они слагают покровы и субпластовые тела, которые могут надежно закрывать пути транспортировки газов. С этой точки зрения наиболее перспективны тела трапповой формации новогольского комплекса и базальтовые покровы верхнего девона. Литологический фактор особенно выражен для фанерозойского чехла, в котором повсеместно распространены благоприятные для консервации природного водорода породы – глины, известняки и доломиты, а так же эвапориты.

Природные газотранспортные системы: Выделяются четыре порядка таких разновозрастных систем. К первому порядку относится Лосевская зона сшивания палеоконтинентов Сарматия и Волго-Уралья, сформировавшаяся за счет закрытия палеопротерозойского океана (именно над ней отмечается максимальное количество циркументов). Ко второму порядку отнесены Тим-Ястребовская и Белгород-Михайловская палеопротерозойские рифтовые структуры, в пределах которых фиксируются залежи железистых кварцитов. Системы первого и второго порядков «работали» длительное время в интервале 2.5–2.0 млрд лет. Системы третьего порядка (впадины и авлакогены, окружающие



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.

✉ Ненахов Виктор Миронович, e-mail: viktor.nenahov@mail.ru

ВКМ) заложены в верхнем протерозое, а их активность продолжилась до верхнего палеозоя. К четвертому порядку отнесены структуры, заложившиеся в верхнем девоне. Особая роль как газотранспортной системы отводится поверхности раздела докембрия и фанерозойского чехла.

Структурные ловушки и зоны дренирования: Поверхность несогласия докембрия и фанерозоя является транспортной системой и основной мегаловушкой, но «дырявой» из-за множества циркумментов, через которые значительная часть водорода теряется. В этом плане наиболее перспективными являются сопряженные с впадинами положительные структуры второго и третьего порядков, осложняющие периферию свода антеклизы. Кроме того, первоочередной интерес представляют подошвенные части тел новогольского комплекса и покровов девонских долеритов и базальтоидов.

Циркумменты, их морфологические особенности и сопровождающие явления: Приводится общая характеристика поверхностных кольцевых и овальных просадочных структур, их возможная генетическая природа и роль в дегазации водорода. К явлениям, сопровождающим циркумменты, относятся: «отбеливание» черноземов, опустынивание и повышение концентраций благородных металлов, прежде всего элементов платиновой группы (ЭПГ).

Заключение: Анализ минерагенических факторов, контролирующих транспортировку и накопление природного водорода в пределах ВА, в целом показывает весьма высокие перспективы рассматриваемой структуры.

Ключевые слова: природный «золотой» водород, факторы локализации, поверхность докембрийского фундамента, природные газотранспортные системы, ловушки, циркумменты

Для цитирования: Ненахов В. М., Полеванов В. П., Жабин А. В., Бондаренко С. В., Золотарева Г. С. Перспективы Воронежской антеклизы на обнаружение природного водорода // *Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология.* 2022. №2. С. 4–18. DOI: <https://doi.org/10.17308/geology.2022.2/9275>

Введение

В последние годы в мире резко повысился интерес к водороду, как источнику энергии ближайшего будущего. Это выражается в большом количестве публикаций, посвящённых этой тематике за рубежом, среди которых доминируют китайские, западногерманские, американские и австралийские издания. До последнего времени водород рассматривался как продукт искусственного получения из воды, метана, сероводорода, нефти и сопутствующего ей, так называемого, «регулируемого вещества» – смеси газов, ассоциирующихся с нефтью. При этом, водород, полученный из воды за счёт электролиза с использованием возобновляемой электроэнергии условно называется «зелёным». При получении его из метана и других углеводородных газов паровым риформингом – «голубым», при этом же способе, но из смеси сероводорода, метана, углекислого газа, гелия, азота и других газов, входящих в понятие «регулируемое вещество», получают «серый» [1].

В связи с появлением множества фактов о наличии глубинных эманаций природного водорода в различных тектонических структурах разных континентов, подтверждённых независимыми источниками [2–10 и др.], стали выделять «золотой» водород. Этот термин был впервые применён профессором Джоном Глюясом и удачно взят на вооружение одной из австралийских компаний (Gold Hydrogen Pty Ltd), получившей лицензию на право поисков, разведки и эксплуатации водородных объектов на одной из площадей Австралии. Следует отметить, что эта страна первой в мире в середине 2021 г., «узаконила» природный водород в качестве полезного ископаемого. Это

событие привело к новой «золотой лихорадке» в её юго-западных штатах, для которых менее чем за полгода отмечался бум выдачи (несколько десятков) соответствующих лицензий.

Не вдаваясь в анализ современной и будущей конъюнктуры рынка природного водорода, подчеркнём, что его использование – это новая эпоха в развитии человеческой цивилизации, по своей значимости сопоставимая, а может быть и превосходящая ядерные технологии.

В основе представлений о природе водородных эманаций на поверхности Земли лежат фундаментальные проблемы её глубинной дегазации, идеи о которой впервые были высказаны во втором десятилетии 20 века В. И. Вернадским. Он же полагал, что в недрах Земли содержатся гигантские количества водорода [11, 12]. В законченном виде модель гидридного состояния внутренних оболочек Земли была предложена в конце восьмидесятых годов двадцатого столетия В.Н. Лариным [12, 13]. Эта модель [14], к сожалению, не нашла широкой поддержки среди геологов, так как автор слишком жёстко противопоставлял её положения современной тектонике (ТЛП), дополненной плюмовой тектоникой, глубоко и всесторонне аргументированной, доказанной и признанной. На волне критических замечаний было не оценено рациональное зерно модели и, как в свое время гипотеза дрейфа континентов А. Вегенера, была предана забвению на 30–40 лет, так и представления о гидридном состоянии внутренних частей Земли ждёт своего подробного и всестороннего анализа с точки зрения ТЛП. Первые попытки адаптации представлений гидридного состояния нашей планеты и ТЛП уже делаются [15, 16, 17].

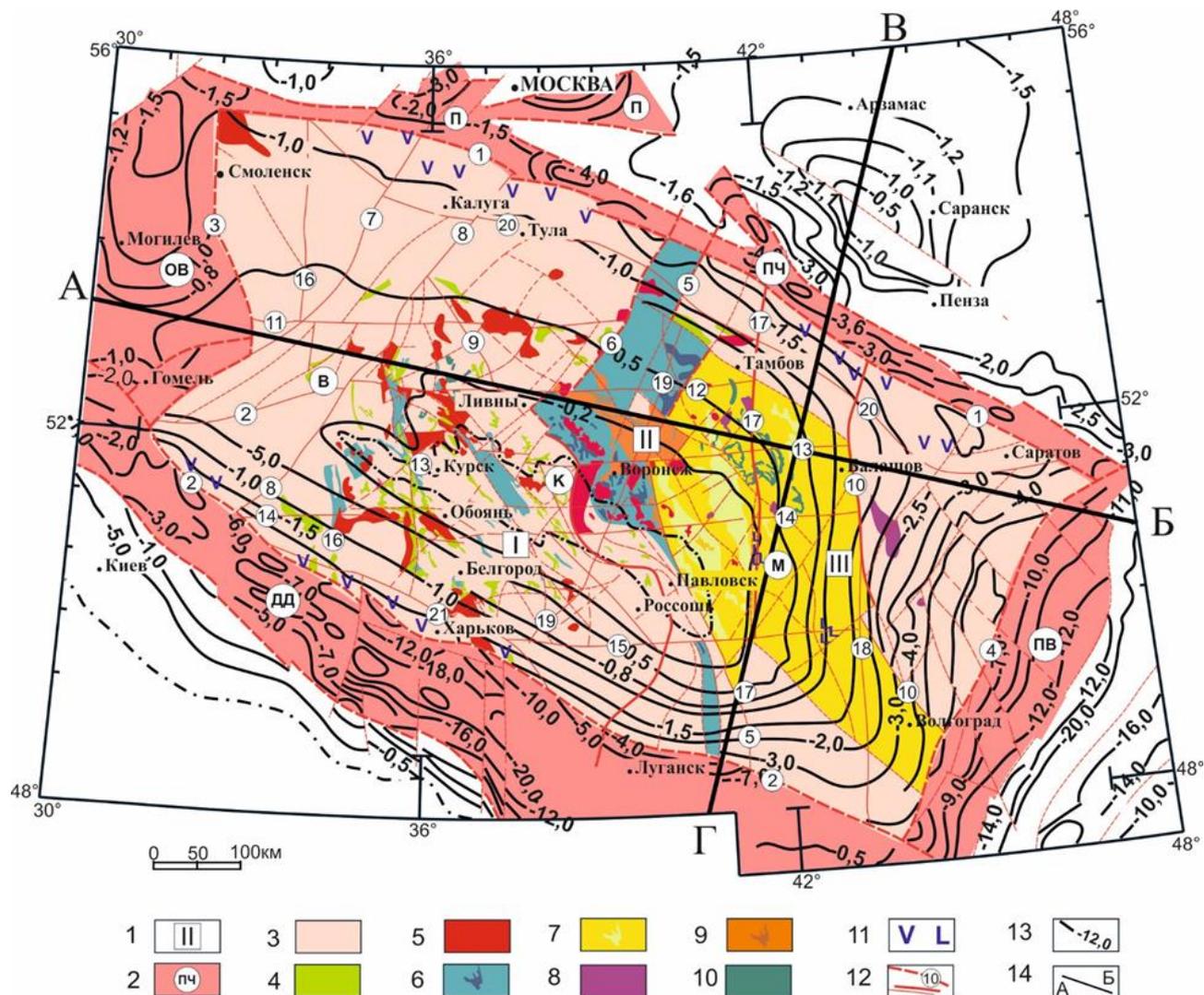


Рис. 1. Схематическая структурно-формационная карта Воронежского кристаллического массива (по Лосицкому В. И. и др., 1999). Условные обозначения: 1 – структурные элементы фундамента (магаблоки: I – КМА, II – Лосевская шовная зона, III – Хоперский блок); 2 – авлакогены и впадины (ПЧ – Пачелмский авлакоген, ДД – Днепровско-Донецкий авлакоген, П – Подмосковский авлакоген, К – Клиновский авлакоген, ОВ – Оршанская впадина, ПВ – Прикаспийская впадина); 3 – раннеархейский структурно-формационный комплекс; 4 – позднеархейские стратифицированные комплексы; 5 – позднеархейские и раннеархейские гранитоиды; 6 – стратифицированные структуры первого и второго порядков; 7 – раннепротерозойские структурно-вещественные комплексы (СВК) (воронцовская серия); 8 – базит-гипербазитовые структурно-вещественные комплексы; 9 – дацит-андезит-базальтовые СВК (воронежская свита); 10 – СВК трапных формации (новогольский и смородинский комплексы); 11 – фанерозойские базальтоидные СВК; 12 – линейные структурные элементы; 13 – изогипсы кровли кристаллического фундамента (км); 14 – линии разреза.

[Fig. 1. Schematic structural and formation map of the Voronezh crystal massif (according to Lositsky V.I. et al., 1999). Legend: (1) – structural elements of the foundation (magablocks: I – KMA, II – Losevo suture zone, III – Khopersky block); (2) – aulacogens and depressions (PS – Pachelma aulacogen, DD – Dnieper-Donetsk aulacogen, P – Moscow region aulacogen, K – Klintsovsky aulacogen, OV – Orsha depression, SP – Caspian basin); (3) – Early Archean structural and formation complex; (4) – late Archean stratified complexes; (5) – Late Archean and Early Archean granitoids; (6) – stratified structures of the first and second orders; (7) – early Proterozoic structural-material complexes (SMC) (Vorontsov series)); (8) – basite-hyperbasite structural-material complexes; (9) – dacite-andesite-basalt SVK (Voronezh formation); (10) – SVK trap formations (Novogolsky and Smorodinsky complexes); (11) – Phanerozoic basaltoid SMC; (12) – linear structural elements; (13) – isohypses of the roof of the crystal foundation (km); (14) – cut lines.]

С точки зрения прикладного значения фактов водородных эманаций первоочередное значение имеет обобщение региональных факторов локализации, а в более широком плане условий проявления дегазации водорода. К настоящему времени известно, что основным продуцентом свободного водорода являются рифтовые зоны срединно-океанических хребтов и

межконтинентального рифтогенеза [18, 19], перспективы освоения которых, в силу ряда причин, прежде всего из-за их мегагигантских размеров, в ближайшем будущем весьма туманны. Вторыми по продуктивности, но первыми по практической значимости являются континентальные рифтогенные структуры и глубокие литосферные разломы и их системы, которые

могут проявляться в виде горячих точек или горячих полей. Последние, наложенные на древние континентальные структуры, проявляются, чаще всего, в виде траппов. Таким образом, очевидно, что структурами, представляющими собой первоочередной прикладной интерес, являются древние платформы. Одной из них является Восточно-Европейская платформа (ВЕП), в том числе территория Воронежской антеклизы (ВА), крупная положительная структура общей площадью более 500000 кв. км в центре платформы. Она прослеживается с северо-запада на юго-восток на 900 км, а с юго-запада на северо-восток на 600 км. Сопряжена в юго-западной части с Днепровско-Донецкой впадиной (ДДВ), в северо-восточной с Московской синеклизой, с северо-запада с Оршанской, с юго-востока Рязано-Саратовской впадинами (рис. 1). Минимальная (50–100 м) мощность осадочного чехла отмечает-

ся в приосевой части антеклизы (ось проходит через города Севск–Курск–Старый Оскол–Павловск) и постепенно наращивается в северо-восточном, северо-западном, юго-восточном и юго-западном направлениях до 800–1000 м [18].

В основании ВА залегают раннедокембрийские породы архейского и палеопротерозойского комплексов, относящихся к древним континентальным структурам – Сарматии (блок КМА) и Волго-Уралии (Хоперский блок) (рис. 2), между которыми находится Лосевская шовная зона (ЛШЗ) в виде мощной сигмоиды. Выступ ВКМ представляет собой гигантскую структуру, в плане приближающуюся к прямоугольнику, осложненному в северо-западной части диагональными разломами. За счет этого основание осадочного чехла и ВА в целом, приближается по форме к своду корччатого типа.

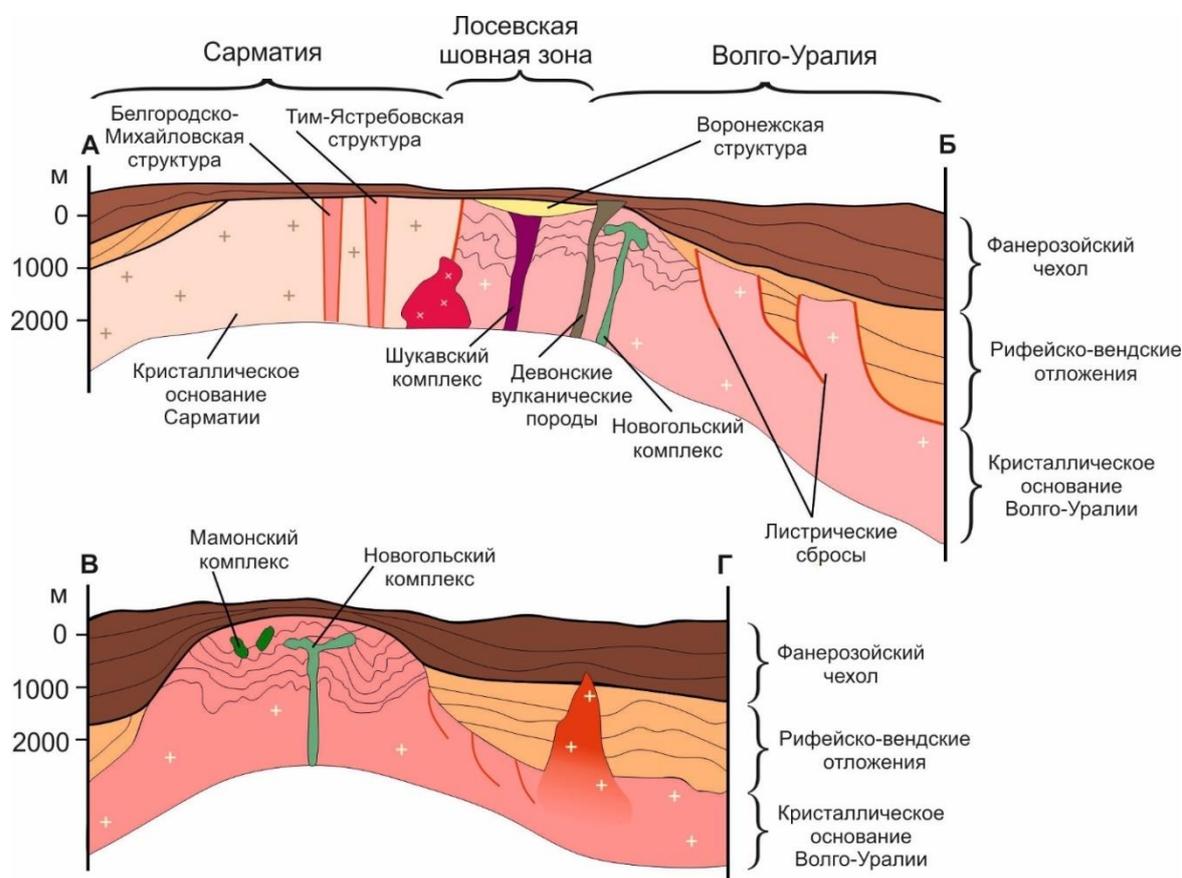


Рис. 2. Схематические геологические разрезы по линиям АБ и ВГ (по рис. 1).

[Fig. 2. Schematic geological sections along AB and VG lines (according to Fig. 1). Key: Сарматия – Sarmatia, Лосевская шовная зона – Losevo suture zone, Волго-Уралия – Volga-Uralia, Белгородско-Михайловская структура – Belgorod-Mikhailovka structure, Тим-Ястребовская структура – Tim-Yastrebovka structure, Воронежская структура – Voronezh structure, Кристаллическое основание Сарматии – The crystalline foundation of Sarmatia, Шукавский комплекс – Shukava complex, Девонские вулканические породы – Devonian volcanic rocks, Новогольский комплекс – Novogolsky complex, Листрические сбросы – Listric faults, Мамонский комплекс – Mamon complex, Новогольский комплекс – Novogolsky complex, Фанерозойский чехол – Phanerozoic cover, Рифейско-вендские отложения – Riphean-Vendian deposits, Кристаллическое основание Волго-Уралии – The crystalline foundation of the Volga-Urals.]

На примере ВА можно рассмотреть основные мигрирующие факторы, влияющие на транспортировку и локализацию залежей водорода. К числу таких факторов относятся: 1) характер границы раздела

кристаллического основания и осадочного чехла; 2) наличие в структуре основных и ультраосновных пород; 3) литологические факторы осадочного чехла (наличие в разрезе глин и глинистых сланцев, карбо-

натных пород, эвапоритов); 4) присутствие потенциальных газотранспортных систем; 5) наличие структурных ловушек и зон дренирования на земную поверхность.

Факторы локализации природного водорода

Важнейшим фактором является поверхность докембрийского фундамента, которая изучена по геофизическим данным, а также по многочисленным скважинам (более 5000), и в нескольких, представительных по площади карьерах (Павловский, Лебединский, Стойленский, Железногорский). Результаты изучения обобщены в многочисленных публикациях Н. М. Чернышова, Н. А. Плаксенко, А. Д. Савко, К. А. Савко, В. М. Ненахова, А. И. Трегуба и целого ряда других исследователей, перечисление которых займет много места. Кроме раннедокембрийских комплексов, характерных для выступа ВКМ, в его обрамлении во впадинах и авлакогенах на поверхности докембрия широко развиты пестрые по составу и формационной принадлежности рифейско-вендские образования. Это коры выветривания пород фундамента, продукты их переотложения аллювиального, пролювиального, оползневого, озёрного происхождения. В наиболее представительном виде рифейско-вендские отложения развиты в прогибах, окружающих архейско-раннепротерозойские структурно-вещественные комплексы (СВК), и слагают флексуриобразные структуры. На остальной территории они отсутствуют, хотя встречаются реликты не перемещенных кор выветривания линейного, реже площадного или комбинированного типов [20].

Образования, слагающие осадочный чехол, представлены преимущественно карбонатными и терригенно-карбонатными отложениями с подчиненным значением в разрезах девона и карбона терригенных, сульфатно-карбонатных и сульфатных пород. Подробное описание морфологии поверхности докембрия и подошвы осадочного чехла приводится в [21]. Рассматривая крылья антиклизы как моноклинали, подчеркнем, что градиент увеличения глубины кровли докембрия меняется от 1.9 м/км в северо-западной, 2.9 м/км в северо-восточной до 5–7.4 м/км в юго-западной и 27–35 м/км в юго-восточной ее частях. В подошве палеозоя отмечаются структуры второго и третьего порядка, представляющие собой валлообразные поднятия с осями, параллельными ограничениям ВКМ [22, 23, 24].

Таким образом, поверхность раздела докембрийского основания и перекрывающего его осадочного чехла представляет собой мегаструктуру сводового типа в целом благоприятную для миграции и накопления водорода. Миграционный потенциал раздела особенно высок вблизи сопряжений с окружающими ВКМ впадинами. В присводовой части происходит накопление и разрядка водорода, о чем косвенным образом свидетельствует максимальная в этой части насыщенность на поверхности рельефа кольцевых структур просадочного типа (циркумментов).

Вещественные факторы – наличие в структуре

ультраосновных и основных пород [25, 26 и др.]. В этом плане весьма перспективной выглядит вся юго-восточная часть ВКМ. Именно на юго-востоке ВКМ широко распространены мафит-ультрамафитовые СВК, среди которых наиболее представительными являются мамонский и еланский, а менее распространенными шукавский и новогольский.

Совокупная доля выходов пород мамонского и еланского комплексов на поверхности докембрийского фундамента составляет от 7 до 10%. Сами массивы пластообразной, реже штокообразной или лополитообразной формы, часто в результате тектонических деформаций выведенных из своего первоначального положения до наклонного или даже субвертикального состояния. Субвертикальное залегание тел указанных комплексов не позволяет рассматривать их как перспективные для водорода ловушки, хотя вклад их подводящих каналов в потенциал миграции и накопления газа не исключен. Форма тел шукавского, преимущественно ультрамафитового комплекса, заметно отличается от тел мамонского и еланского и в свете современных представлений это фрагменты офиолитов, маркирующих зоны сшивания (сутуры). Тела субвертикального залегания, часто с элементами протрузивного характера и интенсивного меланжирования. Как известно, офиолиты, как правило, являются результатом эволюции срединно-океанических хребтов – главных продуцентов свободного водорода [26, 27]. В этом плане очень интересен факт запечатывания шукавских серпентинитов более поздней Байгоровской вулканической структурой.

Особое место в структуре северной части юго-востока ВКМ занимают тела новогольского комплекса (рис. 3) [28]. Комплекс по своим характеристикам позиционируется как трапповая формация и сложен тремя крупными кольцеобразными в плане, лополитоподобными в разрезе телами. Размеры лополитов колеблются от 25 до 150 кв. км, над краем одного из них находится г. Борисоглебск, в районе которого отмечены реальные эманаии газа, в состав которого входит чистый водород (32%). В осадочном чехле развиты базальтовые покровы верхнедевонского возраста, образующие достаточно выдержанные по площади тела, залегающие на поверхности докембрия [29].

Роль мафит-ультрамафитовых тел двойка. С одной стороны они являются показателем мантийной активности, а с другой – экранирующими структурами, под которыми могут накапливаться значительные объемы залежей природного водорода. Особенно интересны в этом плане поля распространения пород новогольского комплекса, формирование которого относится к внутриплитной обстановке, а, следовательно, обладают слабонарушенным тектоникой внутренним строением. В основании подошвы лополитовых тел, с высокой степенью вероятности, возможны структурные ловушки, так как межпластовые тела новогольского комплекса внедрялись в деформированную структуру, сложенную воронцовской серией, и предполагающую наличие локальных ловушек.

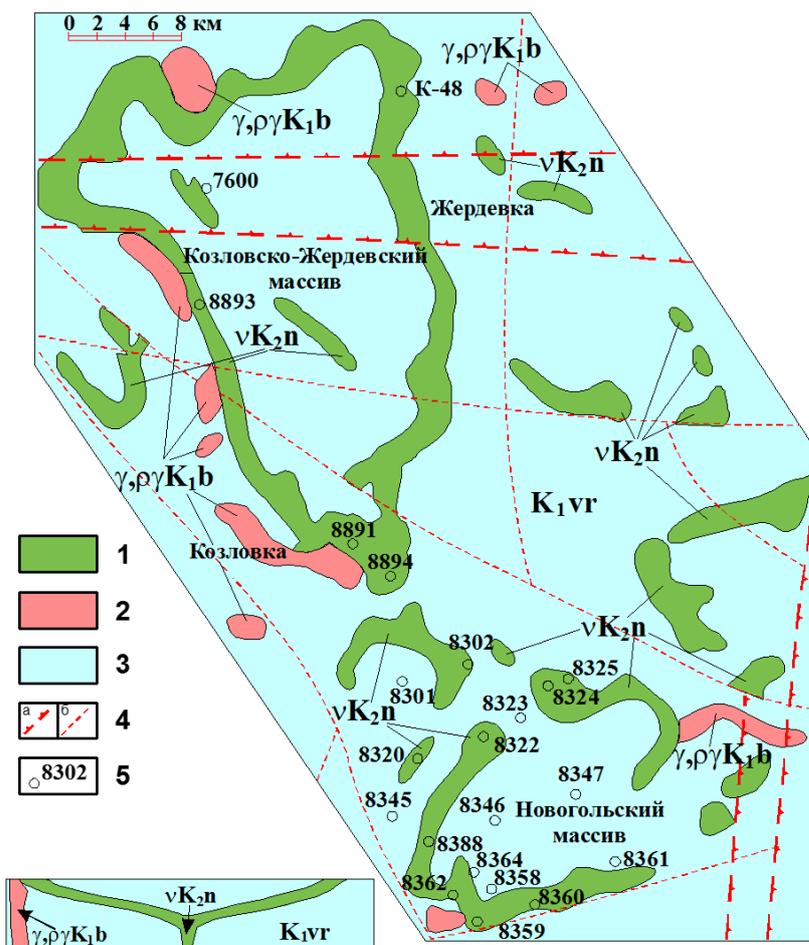


Рис. 3. Схема расположения Новогольского и Козловско-Жердевского массивов (по С. П. Молоткову, Н. М. Чернышову, 1990) [28]. Условные обозначения: 1 – интрузии новогольского габбродолеритового комплекса, 2 – интрузии бобровского гранит-плагиогранитного комплекса, 3 – вмещающие породы воронцовской серии, 4 – тектонические разломы (а – первого порядка, б – другие), 5 – скважины и их номера. На врезке условная схема строения габбродолеритового кольцевого массива новогольского комплекса.

[Fig. 3. Scheme of the location of the Novogolsky and Kozlovsky-Zherdevsky massifs (according to S. P. Molotkov, N. M. Chernyshov, 1990) [28]. Legend: (1) – intrusions of the Novogolsky gabbrodolerite complex, (2) – intrusions of the Bobrovsky granite-plagiogranite complex, (3) – host rocks of the Vorontsov series, (4) – tectonic faults (a – first order, b – others), (5) – boreholes and their numbers. The inset shows a schematic diagram of the structure of the gabbrodoleritic ring massif of the Novogolsky complex.]

Литологический фактор пород докембрия и фанерозоя. Среди пород осадочных и слабометаморфизованных наиболее перспективными с точки зрения экранов являются сланцы, глины, известняки, доломиты, эвапориты [1, 30].

Разнообразные сланцевые породы характерны для воронцовской серии юго-востока ВКМ. Для нее свойственны литологическое разнообразие исходных пород, а также широкие вариации условий проявления метаморфизма [21]. Среди них встречаются филлиты, метаалевролиты, полимиктовые и олигомиктовые метапелиты, высокоуглеродистые, часто карбонатсодержащие, двуслюдяные, андалузитовые и ставролитовые сланцы, графитовые, амфиболитовые, гранаткордиеритовые гнейсы и амфиболиты. Образования воронцовской серии слагают несколько сопряженных син- и антиформ с субширотной ориентировкой осей.

Ядра синформ сложены более молодыми, как правило, менее метаморфизованными породами.

Глины, известняки, доломиты, эвапориты широко развиты в осадочном чехле. Доломиты и эвапориты характерны для фаменских отложений северовосточного склона ВА. Их наличие в разрезе создаёт эффект фокусирования для диффузного проникновения водорода вдоль поверхности раздела фундамента и чехла к осевой части ВА.

Природные газотранспортные системы

Глобальными газотранспортными системами являются рифтовые долины СОХ, зоны рассеянного спрединга (задуговые бассейны и межконтинентального рифтогенеза), а также области внутриплитной активизации, наложенные как на океаническую, так и на континентальную кору. Что касается океанической коры, то это могут быть разнообразные симаунты,

трансформы, прежде всего транстензионного типа, а также структуры пул-апарт. Для континентальных структур это рифты, зоны повышенной проницаемости сдвигово-раздвигового типа и чистого сдвига, а также внутриплитные вулканические постройки центрального типа.

Рассмотрим с этих позиций территорию ВА и ее основание – ВКМ. Главными структурами ВКМ являются два ее блока (КМА и Хоперский), относящиеся соответственно к Сарматии и Волго-Уралии, разделённые «сегментами» Лосевской шовной зоны (ЛШЗ). В пределах последней распознаются СВК палеопротерозойского субдущирующего океана, с сопутствующими явлениями (островные дуги, активная окраина андского типа и т.д.). Зона палеосубдукции, проявлявшаяся более 2 млрд лет назад, до сих пор «угадывается» не только по существующим СВК, но и по хорошо выраженной гравитационной ступени, разделяющей «легкий» (Сарматия) и «тяжелый» (Волго-Уралия) блоки ВКМ [21]. ЛШЗ неоднократно активизировалась, особенно в конце палеопротерозоя, когда шовную зону «запечатал» вулканоплутонический комплекс, включающий Ольховский интрузивный комплекс и воронежско-байгоровскую вулканогенную серию.

Если ЛШЗ рассматривается как газотранспортная система палеопротерозоя первого порядка, то Белгород-Михайловская и Тим-Ястребовская палеорифтовые структуры – это системы второго порядка. Все они «работали» на протяжении длительного отрезка времени в интервале от позднего архея до середины раннего протерозоя (2.0–2.5 млрд лет). Следующий мощный импульс водородной дегазации в регионе следует связывать с заложением авлакогенов рифейского возраста в окружении блока ВКМ (Пачелмский, Оршанский, Днепровско-Донецкий, в меньшей степени Саратовско-Волгоградский). Третий импульс связан с девонским этапом рифтогенеза, приобретшего характер унаследованного процесса и часто наложенного на рифейские структуры. Помимо реактивизированных структур на территории ВА проявляются и новые, главным образом верхнедевонские субмеридионального направления разрывные структуры третьего порядка, вдоль которых проявлялся внутриплитный магматизм бимодальной серии, базальтоиды которой образуют покровы площадью в несколько десятков км². Примером может служить Новохоперский разлом, рассекающий Хоперский блок от ДДВ до Пачелмского прогиба.

Газотранспортной системой является и граница раздела между кристаллическим основанием и осадочным чехлом ВА, характеризующаяся повышенной проницаемостью. Куполообразная в целом, сундукоподобная гигантских размеров (900x600 кв. км) структура весьма благоприятна не только как транспортная система, но и для накопления природного водорода. Основной массоперенос реализуется по поверхности раздела в субвертикальном направлении в структурах-авлакогенах обрамления и в центростремительном направлении по всей территории по-

гребенного фундамента. Предполагаемая аккумуляция происходила и происходит в результате суммарного эффекта вдоль разрывных структур глубинного заложения. Следует отметить, что газотранспортные системы функционировали переменнно, а их вклад в ресурсный потенциал по водороду еще следует оценить отдельно исходя из пространственно-временного соотношения максимальных импульсов дегазации и «подготовленности» структурных ловушек.

Структурные ловушки и зоны дренирования

Основной мегаловушкой является поверхность несогласия докембрийского основания и перекрывающего осадочного чехла. В составе осадочных пород повсеместно и широко развиты глинистые породы, переслаивающиеся с карбонатными отложениями и эвапоритами. Все это позволяет предполагать надежное экранирование водородных залежей. В то же время очевидно, что сплошность осадочного экрана нарушалась тектоническими разломами на протяжении всего фанерозоя, включая неотектонический этап. Именно эта нарушенность позволяет осуществляться «дренированию» водорода к поверхности, на которой формируются продуктивные циркументы. Роль последних двояка: с одной стороны их наличие указывает на процесс дегазации, а с другой, чем выше продуктивность циркумента, тем сильнее «истощение» залежи. В этой связи на первый план по своей значимости выходят положительные структуры второго и третьего порядков, осложняющие моноклинали, одновременно представляющие крылья антеклизы.

Структурные ловушки другого рода – это подошвы силлов докембрия и девона, и лополитов основных пород, относящихся к трапповой формации (новогольский комплекс). При внедрении согласных тел их подошва часто повторяет структуру вмещающих пород, образуя сопряженные положительные и отрицательные формы. Подводящие каналы при внедрении могли выполнять функцию газотранспортных систем первичного характера, следовательно, уже на стадии становления согласных тел должны накапливаться промышленно значимые объемы водорода.

Менее значимые и менее продуктивные структурные ловушки, связанные с базит-гипербазитовыми телами мамонского и еланского комплексов, которые подвержены существенным тектоническим деформациям. Многие тела упомянутых комплексов выведены из своего первоначального субгоризонтального положения вплоть до субвертикального или крутосклонного состояния, что значительно снижает их экранирующую роль.

Разнообразные по своему составу и степени метаморфизма сланцы воронцовского комплекса, образуют три синформы и две сопряженные антиформы. Последние могут рассматриваться как структуры фокусировки диффузного проникновения водорода. Одна из таких структур пространственно совмещена с полями развития новогольского комплекса, а вторая перекрывается воронежско-байгоровской вулканиче-

ской постройкой, отвечающей позднеколлиззионному этапу развития ВКМ. В разрезе постройки присутствуют туфопесчаники, алевролиты и сланцы, способные создавать экранирующий эффект (рис. 4).

Таким образом, в секторе шириной около 100 км, примыкающему к линии Воронеж – Борисоглебск достаточно четко обозначается телескопированная система структурных ловушек, совмещенная с зонами дренирования водорода. Ловушки нижнего структур-

ного этажа – это подошвенные части силлов и лополитов, а так же основания тектонических границ тел мамонского и еланского комплексов. Ловушки верхнего этажа связаны со структурными осложнениями в подошве перекрывающего осадочного чехла, а так же с подошвами покровов базальтоидов девона (рис. 5). В процессе заполнения ловушек водородом его излишки дренируют вверх, вплоть до выхода на поверхность, формируя циркументы (рис. 6).

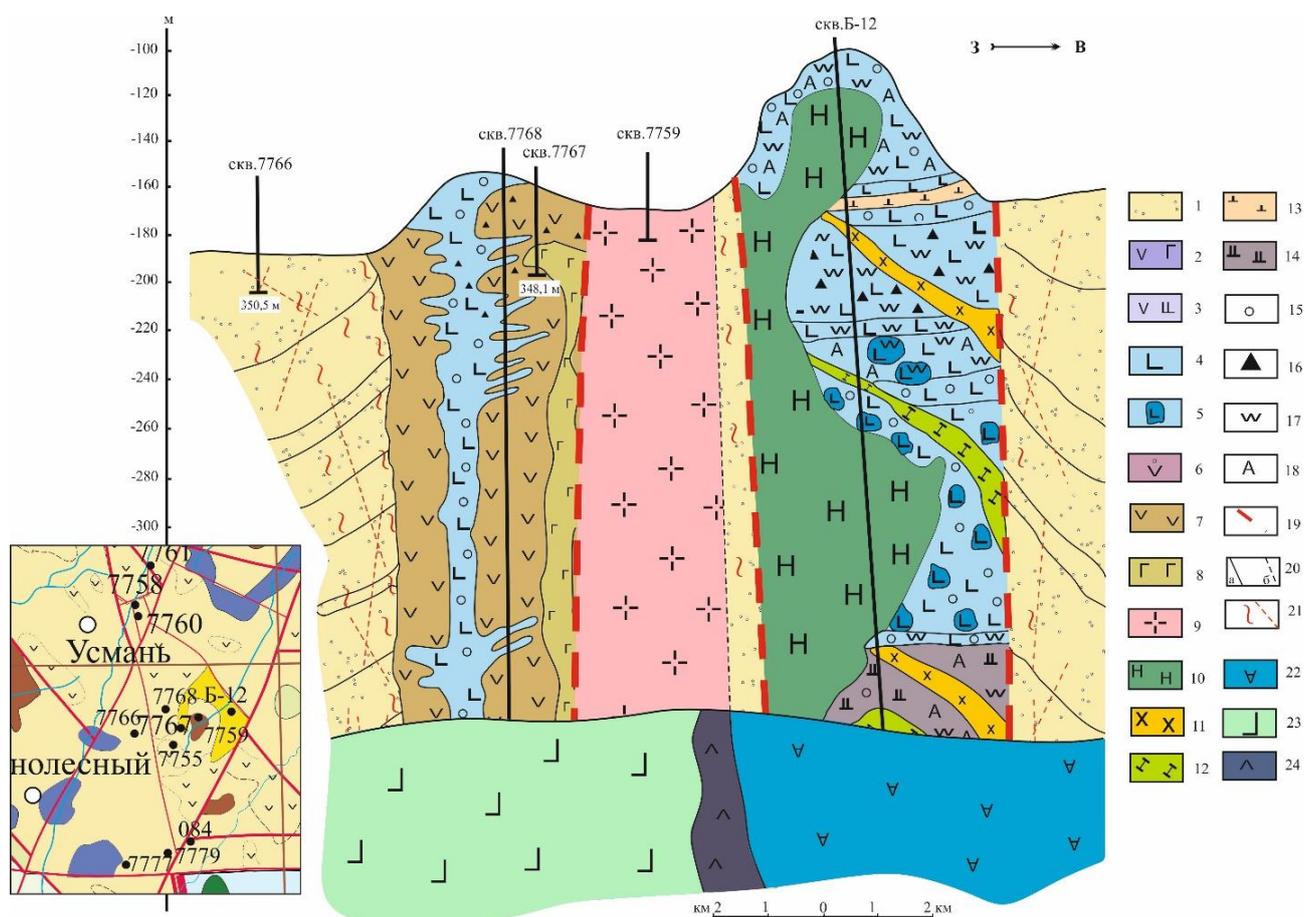


Рис. 4. Схематический геологический разрез Байгоровской вулканоплутонической структуры (по С. М. Богданову с дополнением). Условные обозначения: 1 – воронежская свита; 2 – милонитизированные базальты и андезиты; 3 – андезитобазальты; 4 – авгит-плаггиофировые базальты; 5 – кристаллолавы авгит-плаггиофировых базальтов; 6 – андезитодациты; 7 – андезиты; 8 – базальты авгитофировые; 9 – граниты; 10 – габбро; 11 – спессартиты; 12 – авгитофировые долериты; 13 – авгитофировые базальты; 14 – оливин-авгит-плаггиофировые бронзит содержащие базальты; 15 – миндалекаменная текстура; 16 – туфы; 17 – окварцевание; 18 – амфиболитизация; 19 – разрывные нарушения; 20 – геологические границы; 21 – зона тектонизации; 22 – воронцовская серия; 23 – лосевская серия; 24 – шукавский комплекс.

[Fig. 4. Schematic geological section of the Baigorov volcano plutonic structure (according to S. M. Bogdanov with an addition). Legend: (1) – Voronezh formation; (2) – mylonitized basalts and andesites; (3) – andesite basalts; (4) – augite-plagiophyre basalts; (5) – crystallolaves of augite-plagiophyre basalts; (6) – andesite dacites; (7) – andesites; (8) – augitophyre basalts; (9) – granites; (10) – gabbro; (11) – spessartites; (12) – augitophyric dolerites; (13) – augitophyric basalts; (14) – olivine-augite-plagiophyric bronzite containing basalts; (15) – almond-stone texture; (16) – tufts; (17) – calcification; (18) – amphibolization; (19) – discontinuous disturbances; (20) – geological boundaries; (21) – tectonization zone; (22) – Vorontsovskaya series; (23) – Losevskaya series; (24) – Shukavsky complex.]

Циркументы, их морфологические особенности и сопровождающие явления

На спутниковых картах территории Центрально-Чернозёмных областей наблюдаются овальные образования, диаметр которых колеблется от 20.0 м до 2.0 км. Иногда это отдельные объекты, не-

редки их скопления количественно в несколько десятков, неравномерно распределённые на площади в сотни км². Их расположение не связано с рельефом или с другими геолого-географическими факторами. Они встречаются как в поймах и долинах рек, так и на водоразделах.

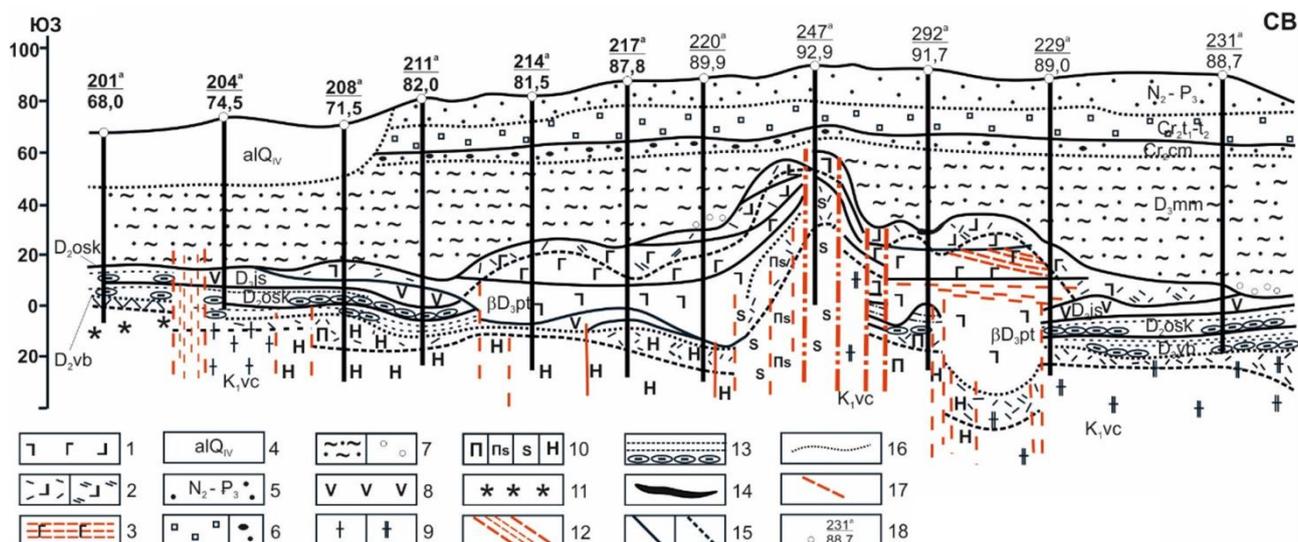


Рис. 5. Схематический геологический разрез лавового поля Подколдовского вулкана по [29]. Условные обозначения: 1 – покровы базальтов петинского возраста (D_{3pt}); 2 – кора выветривания базальтов; 3 – плитчатые базальты верхних зон покровов; 4 – песчано-глинистые породы четвертичного возраста (Q); 5 – пески неогенового и палеогенового возраста; 6 – верхнемеловые отложения; 7 – образования мамонской песчано-каолиновой толщи; 8 – вулканокластические и вулканогенно-осадочные образования ястребовского горизонта (D_{3js}); 9 – образования воронцовской метаморфической серии раннего карелия (K_{1vc}); 10 – магматические породы мамонского интрузивного комплекса; 11 – гранодиорито-гнейсы, гранитогнейсы павловского комплекса; 12 – Лосевско-Мамонская зона разломов; 13 – песчаники и аргиллиты старооскольского подгоризонта (D_{2osk}); 14 – медистые песчаники; 15 – контакты пород: а – установленные, б – предполагаемые; 16 – крупные стратиграфические несогласия; 17 – разрывные нарушения; 18 – номер скважины и абсолютная отметка устья.

[Fig. 5. Schematic geological section of the lava field of the Podkolodnovsky volcano according to [29]. Legend: (1) – covers of Petin age basalts (D_{3pt}); (2) – basalt weathering crust; (3) – slab basalts of the upper zones of the covers; (4) – sandy-clay rocks of Quaternary age (Q); (5) – Neogene and Paleogene age sands; (6) – Upper Cretaceous sediments; (7) – formations of the Mammoth sand-kaolin strata; (8) – volcanoclastic and volcanogenic-sedimentary formations of the Yastrebovsky horizon (D_{3js}); (9) – formations of the Vorontsov metamorphic series of early Karelia (K_{1vc}); (10) – igneous rocks of the Mammon intrusive complex; (11) – granodiorite-gneisses, granitogneisses of the Pavlovsky complex; (12) – Losev-Mamon fault zone; (13) – sandstones and mudstones of the Starooskolsky subhorizon (D_{2osk}); (14) – copper sandstones; (15) – rock contacts: a – established, b – assumed; (16) – large stratigraphic inconsistencies; (17) – discontinuous disturbances; (18) – well number and absolute mark of the mouth.]

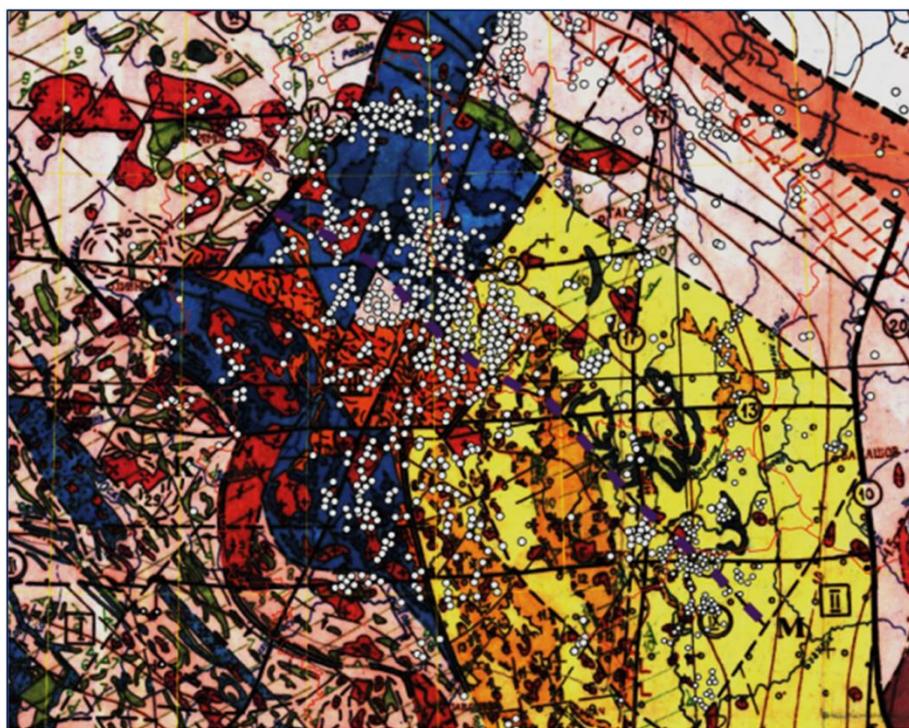


Рис. 6. Плотность развития циркументов (белые точки) [32].

[Fig. 6. Density of the development of circumments (white dots) [32].]

На местности они представляют собой округлые впадины, в различной степени заболоченные, часто поросшие кустарниковой растительностью. Для таких образований был предложен термин «циркумменты», подчеркивающий их округлый характер [32]. Циркумменты часто образуют композиции в виде цепочек, круговых и эллипсоидальных ансамблей до первых десятков километров в поперечнике. Если цепочки могут свидетельствовать о линейном характере газотранспортных систем (зона разломов), то концентрические ансамбли указывают на наличие на глубине структур – ловушек, переполненных водородом и сопутствующими газами. Наибольшая насыщенность циркумментами отмечается для сектора, совпадающего с ЛШЗ, хотя они распространены практически повсеместно. С одной стороны высокая насыщенность является отрицательным фактором, так как снижается ресурсный потенциал промежуточных коллекторов, с другой стороны циркумменты – прямой поисковый признак, что водородные эманации проявляются. В этом плане необходим полный анализ сочетания разнообразных минерагенических факторов, применительно к конкретным локальным площадям.

Происхождение циркумментов дискуссионно, но все исследователи склонны придерживаться одной из трёх гипотез. Первая – наиболее старая, предполагает карстово-суффозионный способ [32, 33], вторая – обязана взрывным процессам за счёт столкновения небесных объектов с земной поверхностью [34, 35]. Третья – связывается со взрывами и эманациями водорода, выделяющихся из земных недр [1, 2, 18, 36, 38].

Надо полагать, что заметная на местности просадка пород при карсте возможна лишь при залегании карбонатных пород на глубине до первых десятков метров и при значительных проявлениях этого процесса. Так в западных направлениях от г. Липецк девонские известняки залегают на глубине до 10–15 м [20]. Мело-мергельные породы залегают примерно на таких же глубинах к югу от линии Брянск – Орёл – Малоархангельск – Воронеж – Бобров – Калач [37]. Поэтому, без учёта других факторов, появление впадин-воронки на земной поверхности связывалось с просадкой пород, залегающих над карстовыми образованиями. Суффозия, или размыв песчаных пород подземными водами, возможна, пожалуй, только вблизи бортов депрессий, пересекающих эти отложения. При размыве любой породы должен осуществляться вынос вымываемого материала.

В то же время, значительное количество воронок встречаются на территориях, где карбонатные породы залегают на глубинах в сотни метров. Например, в двадцати километрах к юго-западу от города Борисоглебск выявляется воронка диаметром 2 км. Мощность неогеновых песков здесь более 100 м.

У многих воронок наблюдается одна морфологическая особенность. Они окружены валом. Его ширина зависит от диаметра воронок. Во всяком случае, их соотношение примерно один к двадцати. О первичной

высоте вала и глубине воронок судить сложно, из-за их нивелирования процессами эрозии и хозяйственной деятельности человека [34].

Наличие вала указывает на взрывной фактор, проявленный при образовании воронок. Только взрыв может сформировать вал из пород, выброшенных из внутренней части этих впадин. При любых других способах появится провал (воронка, впадина), во внутренней части которого будет находиться порода, залегающая выше впадины. На спутниковых картах вал обычно выражается светлым кольцом, окаймляющим воронку с внешней стороны.

Вне зависимости от происхождения циркумментов, все они должны быть более тщательно изучены на предмет продуктивности для их разбраковки по перспективности.

Одним из интересных факторов, связанным с подобными структурами, является повышенное содержание благородных металлов в зоне их влияния. Прежде всего, это касается элементов платиновой группы, особенно иридия и осмия и, в меньшей степени золота. Повышения концентраций достигают порядковых значений вплоть до промышленных. Высказывалась мысль об импактном происхождении этого явления [34], но в свете новых взглядов причиной могут быть газовые эманации с участием водорода. Повышенный фон благородных металлов характерен и для участков опустынивания (например, Донская Сахара), что предполагает влияние водорода на этот процесс. Участки опустынивания, представляется, могут формироваться как отражение эволюции циркумментов, точнее площадей их сгущений.

Другим интересным процессом является отбеливание почв. Некоторые исследователи [1, 18] светлое кольцо, окружающее воронки на спутниковых картах, объясняют отбеливанием водородом чернозёмных почв. Не отрицая такой возможности, здесь, как нам представляется, следует учесть еще некоторые факторы. Во-первых, светлые кольца проявлены у воронок не только на чернозёмах, но и на любых других почвах, в том числе на без гумусовых песках. Во-вторых, на местности этому кольцу часто соответствует вал, который может быть представлен более светлой породой, подстилающей почвенный покров. В-третьих, светлое обрамление присутствует и у древних воронок, которые в современное время, за счёт эрозионных процессов и хозяйственной деятельности людей, полностью нивелированы с окружающей поверхностью. В-четвёртых, не понятно избирательное воздействие водорода только на внешнее обрамление воронки, хотя основное количество газа должно выделяться в её внутренней части. В-пятых, для многих почвоведов представляется весьма сомнительным утверждение об отбеливающем влиянии водорода на гумус [34].

На территории Центрально-Чернозёмных областей, кроме собственно чернозёмных почв, на достаточно обширных площадях развиты и другие их типы. Если распространение подзолистых и серых лесных

почв на некоторых участках можно объяснить их образованием на бывших лесных угодьях, то появление песчаных типов, к тому же связанных с пустынными ландшафтами, не поддаётся логическому пониманию. Правда, многие исследователи связывают их образование с отложениями пойм и надпойменных террас. Но эти почвы распространены и на водоразделах. В то же время, как в самих воронках, так и на непосредственно прилегающих к ним территориях почвы по своему составу ближе к песчаным типам. Одновременно с этим отмечается определённая связь [34] между этими песчаными отложениями и высокими содержаниями в них благородных металлов. Можно предположить, что это не случайные факты, никак не связанные между собой, а некоторая закономерность, обязанная своему проявлению необычным факторам. Одним из последних может быть импактное событие.

Ещё одним фактором, влияющим на накопление гумуса в песчаных почвах, могут служить эманации водорода, повышающие кислотность, в результате чего резко уменьшается видовой состав растительности, вплоть до появления монокультуры – хвоща лугового.

Заключение

Анализ минерагенических факторов, контролирующих транспортировку и накопление природного водорода в пределах ВА, в целом показывает весьма высокие перспективы рассмотренной структуры. Если учитывать циркументы как прямой признак эманаций водорода, то их максимальное количество приурочено к осевой части антеклизы, а также к сектору над зоной сшивания древних кратонов (ЛШЗ), где отмечается минимальная мощность экранирующих пород чехла. Это подтверждает представление о поверхности раздела между кристаллическим основанием и чехлом как о важном газотранспортном и газо-локализирующем факторе.

С прикладной точки зрения наибольшие перспективы на обнаружение продуктивных на водород структурных ловушек следует связывать:

1) с обрамлением ВКМ на участках максимальных градиентов погружения осадочного чехла, осложненных складчатостью второго и третьего порядка, происхождение которых в значительной степени обязано литрическим сбросам, сопровождающим авлакогенез;

2) с участками локализации субпластовых тел долеритов новогольского комплекса и его аналогов в блоке КМА (смородинский комплекс) относящихся к проявлениям траппового типа;

3) с полями распространения вулканических построек раннего докембрия, запечатывающих ЛШЗ (Воронежско-Байгоровская) и верхнего девона, распространённых в зоне влияния Новохоперского разлома.

Учитывая важные поисковые значения циркументов, следует детально разработать их генетическую классификацию и определить признаки продук-

тивности структурных ловушек, с которыми они связаны. По совокупности изученности, многообразию геологических комплексов, структур, формаций разных возрастов и типов территория Воронежской антеклизы представляет собой идеальный полигон для отработки методики поисков «золотого» водорода.

Конфликт интересов: Автор декларирует отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

ЛИТЕРАТУРА

1. Глазьев С. Ю., Полеванов В. П., Поиски месторождений природного водорода в России, как основа встраивания в новый технологический уклад // *Недропользование XXI век*. №4. 2020. С. 12–23.
2. Ларин Н. В., Ларин В. Н., Горбатилов А. В. Кольцевые структуры, обусловленные глубинными потоками водорода. *Дегазация Земли: геотектоника, геодинамика, геофлюиды; нефть и газ; углеводороды и жизнь*. Матер. Всерос. конф. с междунар. участием, посвящён. Столетию со дня рожд. акад. П.Н. Кропоткина. М.: ГЕОС. 2010. С. 284–287.
3. Сывороткин В. А. Глубинная дегазация Земли и глобальные катастрофы. М.: Изд-во ООО «Геоинформцентр». 2002. 250 с.
4. Angino E. E., Coveney R. M. J., Goebel E. D., Zeller E. J., Dreschhoff G. A. M. Hydrogen and nitrogen-origin, distribution, and abundance, a followup // *Oil & Gas Journal*. 1984. No. 82. P. 142–146.
5. Apps J.A., Van De Kamp P.C. Energy gases of abiogenic origin in the Earth's crust. *Future Energy Gases. United States Geological Survey Professional Paper*. 1993. P. 81–130.
6. Hosgo rmez H., Etiopie G., Yalc in M. N. New evidence for a mixed inorganic and organic origin of the Olympic Chimaera fire (Turkey): A large onshore seepage of abiogenic gas // *Geofluids*. 2008. No. 4. P. 263–273.
7. Neal C., Stanger G. Hydrogen generation from mantle source rocks in Oman // *Earth and Planetary Science Letters*. 1983. No. 66. P. 315–320.
9. Newell K. D., Doveton J. H., Merriam D. F., Lollar B. S., Waggoner W. M., & Magnuson L. M. H₂-rich and hydrocarbon gas recovered in a deep precambrian well in Northeastern Kansas // *Natural Resources Research*, 2007. No. 16. P. 277–292.
10. Syvorotkin V. L. Hydrogen degassing of the Earth: Natural disasters and the biosphere. Ed Florinsky I.V. *Man and the Geosphere*. New York: Nova Science Publishers; 2010. P. 307–347
11. Шестопалов В. М., Макаренко А. Н. О некоторых результатах исследований, развивающих идею В. И. Вернадского о «газовом дыхании Земли». Статья 1. Поверхностные и приповерхностные проявления аномальной дегазации // *Геологический журнал*. 2013. Вып. 3. С. 7–25.
12. Шестопалов В. М., Макаренко А. Н. О некоторых результатах исследований, развивающих идею В. И. Вернадского о «газовом дыхании Земли». Статья 2. Глубинные процессы дегазации недр // *Геологический журнал*. 2014. Вып. 3(348). С. 7–28.
13. Larin V.N. Hydridic Earth: the New Geology of Our Primordially Hydrogen-rich Planet. Ed. C. W. Hunt. Polar publishing, Alberta. 1993. P.247
14. Ларин В. Н. Наша Земля (происхождение, состав, строение и развитие изначально гидридной Земли). М.: «Агар», 2005. 248 с.
15. Ohtani E., Shibasaki Y., Terasaki H. G. Distribution of Hydrogen in the Deep Earth and its Role in Earth's dynamics

- (invited). American Geophysical Union, Fall Meeting, abstract V14C-01. 2009.
16. Лукин А. Е. Система «суперплюм – глубокозалегающие сегменты нефтегазоносных бассейнов» – неисчерпаемый источник углеводородов // *Геологический журнал*. 2015. №2. С. 7–20.
17. Старостенко В. И., Лукин А. Е., Цветкова Т. А., Шумлянская А. А. Геофлюиды и современное проявление активизации Ингульского мегаблока Украинского щита // *Геологический журнал*. 2014. Т. 36. №5. С. 3–25. DOI: <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v36i5.2014.111567>.
18. Ларин Н. В., Ларин В. Н., Горбатов А. В. Кольцевые структуры, обусловленные глубинными потоками водорода. Дегазация Земли: геотектоника, геодинамика, геофлюиды; нефть и газ; углеводороды и жизнь. *Материалы Всероссийской конференции с международным участием, посвященной 100-летию со дня рождения академика П.Н. Кротова*, 18–22 октября 2010 г. М.: ГЕОС, 2010. С.284–288
19. Charlou J.-L., Fouquet Y., Bougault H., Donval J. P., Etoubleau J., Jean-Baptiste P., Dapigny A., Appriou P., Rona P.A. Intense CH₄ plumes generated by serpentinization of ultramafic rocks at the intersection of the 1520°N fracture zone and the Mid-Atlantic Ridge // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 1998. No. 62. P. 2323–2333.
20. Савко А.Д., Мануковский С.В., Мизин А.И. Литология и фации донеогеновых отложений Воронежской антеклизы. Труды научно-исследовательского института геологии: Воронеж, Изд-во Воронеж. гос. ун-та. Вып.3. 2001. 201 с.
21. Ненахов В. М., Стрик Ю. Н., Трегуб А. И., Холин В. М., Шабалин М. И. Минерагенические исследования территорий с двухъярусным строением (на примере Воронежского кристаллического массива). М.: ГЕОКАРТ. ГЕОС. 2007. 284 с.
22. Трегуб А. И. Неотектоника территории Воронежского кристаллического массива. Труды научно-исследовательского института геологии: Воронеж, Изд-во Воронеж. гос. ун-та. Вып.9. 2002. 220 с.
23. Трегуб А. И., Ненахов В. М., Сиротин В. И. Модель геодинамического развития Русской платформы в палеозое // *Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология*. 1998. №5. С. 7–13.
24. Трегуб А. И., Ненахов В. М., Сиротин В. И. Геодинамическая модель формирования осадочного чехла Восточно-Европейской платформы. В кн.: *Тектоника и геодинамика: общие и региональные аспекты*. Матер. XXXI тектон. совещ. М.: 1998. №5. С. 19–26.
25. Coveney R. M. J., Goebel E. D., Zeller E. J., Dreschhoff, G. A. M., Angino E. E. Serpentinization and origin of hydrogen gas in Kansas // *AAPG Bulletin*. 1987. No. 71. P. 39–48.
26. Charlou J.-L. Geochemistry of high H₂ and CH₄ vent fluids issuing from ultramafic rocks at the Rainbow hydrothermal field (3614°N, MAR) // *Chemical Geology*. 2002. No. 191. P. 345–359.
27. Гуфельд И. Л. Геологические следствия аморфизации структуры литосферы и верхней мантии, вызванные водородной дегазацией // *Геодинамика и тектонофизика*. 2012. Т.3. №4. С. 417–435. DOI: <https://doi.org/10.5800/GT-2012-3-4-008>
28. Альбеков А. Ю. Геология, петрология и минерагеническая оценка перспектив рудоносности габбродолеритовых массивов трапповой формации Воронежского кристаллического массива : дис. ... канд. геол.-мин.наук. Воронеж, 2002. 238 с.
29. Быков И.Н. Верхнедевонские базальты юго-восточной части Воронежской антеклизы. Воронеж, 1975. 134 с.
30. Freund F., Dickinson J. T., Cash M. Hydrogen in rocks: an energy source for deep microbial communities // *Astrobiology*. 2002. No. 2(1). P. 83–92.
31. Rogozhin E. A., Gorbatiyov A. V., Larin N. V., Stepanova M. Y. Deep structure of the Moscow Aulacogene in the western part of Moscow // *Izvestiya, Atmospheric and Ocean. Physics*. 2010. No.46. P. 973–981.
32. Косинова И. И., Ильяш В. В., Ильяш Д. В. Литологический фактор, как одна из причин неравномерности развития циркументов на территории Воронежской антеклизы // *Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология*. 2013. №1. С. 214–218.
33. Холмовой Г. В. Кольцевое озеро в центре Тамбовской равнины // *Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология*. 2014. №3. С. 119.
34. Жабин А.В., Дубков А.А., Золотарёва Г.С., Кузнецов Ю.А. Импациты в четвертичных отложениях Воронежской антеклизы // *Недра Поволжья и Прикаспия*. 2020. Вып. 102. С. 18–31.
35. Жабин А.В., Игнатенко И.М., Донецкий С.В. О происхождении отложений вулканического пепла на территории Воронежской области // *Региональные геосистемы*. 2021. Т.45. №3. С. 441–454.
36. Жабин А.В., Дмитриев Д.А. Металлы и их соединения в отложениях верхнего мела юго-восточной части Воронежской антеклизы // *Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология*. 2019. №3. С. 5–9.
37. Барковский Е. В. Заключение о природе так называемого «взрыва» в городе Сасово Рязанской области 12 апреля 1991 года // *Русская мысль*. 2004. №1–12. С. 10–35.
38. Zgonnik V., Beaumont V., Deville E., Larin N., Pillot D., Farrell K. Evidence for natural molecular hydrogen seepage associated with Carolina bays (surficial, ovoid depressions on the Atlantic Coastal Plain, Province of the USA) // *Progress in Earth and Planetary Science*. 2015. P.1–15. DOI 10.1186/s40645-015-0062-5

Prospects for the discovery of natural hydrogen in the Voronezh antecline

©2022 V. M. Nenakhov¹✉, V.P. Polevanov²,
A. V. Zhabin¹, S. V. Bondarenko¹, G. S. Zolotareva¹

¹*Voronezh State University,*

1 Universitetskaya pl., Voronezh, 394018, Russian Federation

²*FGKU "Rosgeolexpertiza", 34, st. Malaya Ordynka, 115184, Moscow, Russian Federation*

Abstract

Introduction: The study considers important issues relating to the prospects for the discovery of deposits of natural hydrogen in the Voronezh antecline. A brief review of the history of research and fundamental and applied problems related to the manifestations of "golden" hydrogen, as well as its role as an ideal energy carrier is presented. General information is provided about the structure of the Voronezh antecline (VA), which is the largest segment of the East European Platform and, at the same time, a structure with very important prospects for hydrogen. Based on global experience, the relevant sections provide a comprehensive analysis of mineragenic factors for the control and localization of natural hydrogen for such structures.

Natural hydrogen localisation factors: The most important factor is the surface of the Precambrian basement, which has been studied based on geophysical data, drilling, and exploited quarries. The surface is a giant arch, gently sloping in the central part and deepening towards the periphery, and is emphasized by the presence of weathering crusts of varying degrees of preservation. The arches are surrounded by a system of depressions and aulacogens, which is generally favourable for the formation of gas emanations. The presence of ultramafic and basic rocks distributed at different structural and age levels is an additional factor in the localization of natural hydrogen. The role of ultrabasic and basic rocks is ambivalent. First, they are products of mantle origin, and their transport to the surface facilitates degassing. Secondly, they compose covers and subtabular bodies, which can reliably block the paths of gas transportation. From this point of view, bodies of the trap formation of the Novogolsk complex and Upper Devonian basalt covers are the most promising. The lithological factor it is especially expressed for the Phanerozoic cover, in which rocks favourable for the conservation of natural hydrogen are ubiquitous - clays, limestones and dolomites, as well as evaporites.

Natural gas transportation systems: Four orders of such systems of different ages are distinguished. The first order includes the Losevo suture zone of the Sarmatia and Volga-Ural paleocontinents, which was formed due to the closure of the Paleoproterozoic ocean (the maximum number of circumments was noted above this zone). The Tim-Yastrebovka and Belgorod-Mikhailovka Paleoproterozoic rift structures are assigned to the second order, within which deposits of ferruginous quartzites are recorded. Systems of the first and second orders "worked" for a long time over the interval of 2.5–2.0 billion years. Third-order systems (depressions and aulacogens surrounding the VCM) were formed in the Upper Proterozoic, and their activity continued until the Upper Paleozoic. The structures laid down in the Upper Devonian are assigned to the fourth order. The interface between the Precambrian and the Phanerozoic cover plays a special role as a gas transport system.

Structural traps and drainage zones: The nonconformity surface of the Precambrian and Phanerozoic is a transport system and the main megatrap, however it is "leaky" due to the many circumments through



The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

✉ Viktor M. Nenakhov, e-mail: viktor.nenahov@mail.ru

which a significant part of hydrogen is lost. In this regard, the most promising are the positive structures of the second and third orders associated with depressions, which complicate the periphery of the anteklise arch. In addition, the bottom parts of the bodies of the Novogorsk complex and covers of Devonian dolerites and basaltoids are of primary interest.

Circumments, their morphological features and accompanying phenomena: The general characteristics of surface ring and oval subsiding structures, their possible genetic nature and role in hydrogen degassing are provided. The phenomena accompanying circumments include: "whitening" of chernozems, desertification and increasing concentrations of noble metals, primarily platinum group elements (PGE).

Conclusions: An analysis of the mineragenic factors that control the transport and accumulation of natural hydrogen within the EA shows a very high potential for the considered structure.

Keywords: natural "golden" hydrogen, localization factors, surface of the Precambrian basement, natural gas transport systems, traps, circulations

For citation: Nenakhov V. M., Polevanov V.P., Zhabin A. V., Bondarenko S. V., Zolotareva G. S. Prospects for the discovery of natural hydrogen in the Voronezh anteklise. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Geologiya – Proceedings of Voronezh State University. Series: Geology*, 2022, no. 2, pp. 4–18. DOI: <https://doi.org/10.17308/geology.2022.2/9275>

Conflict of interests: The authors declare the absence of obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.

REFERENCES

1. Glazyev S. Yu., Polevanov V. P. Poiski mestorozhdenii prirodnogo vodoroda v Rossii, kak osnova vstraivaniya v novyi tekhnologicheskii uklad [The search for deposits of natural hydrogen in Russia, as a basis for embedding in a new technological way]. *Nedropol'zovanie XXI vek – Subsoil use XXI century*. 2020, no. 4, pp. 12–23. (In Russ.)
2. Larin N. V., Larin V. N., Gorbatikov A.V. Kol'tsevye struktury, obuslovlennye glubinnymi potokami vodoroda [Ring structures caused by deep hydrogen flows]. *Degazatsiya Zemli: geotektonika, geodinamika, geoflyuidy; nef't' i gaz; uglevodorody i zhizn'*. Mater. Vseros. konf. s mezhdunar. uchastiem, posvyashchen. Stoletiyu so dnya rozhd. akad. P.N. Kropotkina [Degassing of the Earth: geotectonics, geodynamics, geofluids; oil and gas; hydrocarbons and life. Mater. All-Russian conf. with internat. participation, dedicated. The centenary of the birth. akad. P.N. Kropotkin]. Moscow, GEOS publ., 2010, pp. 284–287. (In Russ.)
3. Serumkin V. A. *Glubinnaya degazatsiya Zemli i global'nye katastrofy* [Deep degassing of the Earth and global catastrophes]. Moscow, Publishing house of LLC Geoinformcenter, 2002. 250 p. (In Russ.)
4. Angino E. E., Coveney R. M. J., Goebel E. D., Zeller E. J., Dreschhoff G. A. M. Hydrogen and nitrogen-origin, distribution, and abundance, a followup. *Oil & Gas Journal*, 1984, no. 82, pp. 142–146.
5. Apps J.A., Van De Kamp P.C. Energy gases of abiogenic origin in the Earth's crust. *Future Energy Gases. United States Geological Survey Professional Paper*, 1993. P. 81–130.
6. Hosgor'mez H., Etiopie G., Yalcin M. N. New evidence for a mixed inorganic and organic origin of the Olympic Chimaera fire (Turkey): A large onshore seepage of abiogenic gas. *Geofluids*, 2008, no. 4, pp. 263–273.
7. Neal C., Stanger G. Hydrogen generation from mantle source rocks in Oman. *Earth and Planetary Science Letters*, 1983, no. 66, pp. 315–320.
9. Newell K. D., Doveton J. H., Merriam D. F., Lollar B. S., Waggoner W. M., Magnuson L. M. H₂-rich and hydrocarbon gas recovered in a deep precambrian well in Northeastern Kansas. *Natural Resources Research*, 2007, no. 16, pp. 277–292.
10. Syvorotkin V. L. Hydrogen degassing of the Earth: Natural disasters and the biosphere. Ed Florinsky I.V. *Man and the Geosphere*. New York: Nova Science Publishers; 2010, pp. 307–347
11. Shestopalov V. M., Makarenko A. N. O nekotorykh rezul'tatakh issledovaniy, razvivayushchikh ideyu V. I. Vernadskogo o «gazovom dykhanii Zemli». Stat'ya 1. Poverkhnostnye i pri-poverkhnostnye proyavleniya anomal'noi degazatsii [On some research results developing V. I. Vernadsky's idea of "gas breathing of the Earth". Article 1. Surface and near-surface manifestations of abnormal degassing]. *Geologicheskii zhurnal – Geological journal*, 2013, Issue 3, pp. 7–25. (In Russ.)
12. Shestopalov V. M., Makarenko A. N. O nekotorykh rezul'tatakh issledovaniy, razvivayushchikh ideyu V. I. Vernadskogo o «gazovom dykhanii Zemli». Stat'ya 2. Glubinnye protsessy degazatsii nedr [On some research results developing V. I. Vernadsky's idea of "gas breathing of the Earth". Article 2. Deep processes of subsoil degassing]. *Geologicheskii zhurnal – Geological Journal*, 2014, Issue 3(348), pp. 7–28. (In Russ.)
13. Larin V. N. Hydridic Earth: the New Geology of Our Primordially Hydrogen-rich Planet. Ed. C. W. Hunt. Polar publishing, Alberta. 1993. 247 p.
14. Larin V. N. *Nasha Zemlya (proiskhozhdenie, sostav, stroenie i razvitie iznachal'no gidridnoi Zemli)* [Our Earth (origin, composition, structure and development of the initially hydride Earth)]. Moscow, "Agar" publ., 2005. 248 p. (In Russ.)
15. Ohtani E., Shibasaki Y., Terasaki H. G. Distribution of Hydrogen in the Deep Earth and its Role in Earth's dynamics (invited). American Geophysical Union, Fall Meeting, abstract V14C-01. 2009.
16. Lukin A. E. Sistema «superplyum – glubokozalegayushchie segmenty neftegazonosnykh basseinov» – neisчерpaemyi istochnik uglevodorodov [The system "superplume – deep-lying segments of oil and gas basins" - an inexhaustible source of hydrocarbons]. *Geologicheskii zhurnal – Geological Journal*, 2015, no.2, pp. 7–20. (In Russ.)
17. Starostenko V. I., Lukin A. E., Tsvetkova T. A., Shumlyanskaya A. A. Geoflyuidy i sovremennoe proyavlenie aktivizatsii Ingul'skogo megabloka Ukrainskogo shchita [Geofluids and modern manifestation of activation of the Ingul megablock of the Ukrainian shield]. *Geofizicheskii zhurnal – Geophysical Journal*, 2014, vol. 36, no.5, pp. 3–25. DOI: <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v36i5.2014.111567>. (In Russ.)
18. Larin N.V., Larin V.N., Gorbatikov A.V. Kol'tsevye struktury, obuslovlennye glubinnymi potokami vodoroda [Ring structures caused by deep hydrogen flows]. *Degazatsiya Zemli: geotektonika, geodinamika, geoflyuidy; nef't' i gaz; uglevodorody i zhizn'*. Materialy Vserossiiskoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem, posvyashchennoi 100-letiyu so dnya rozhdeniya akademika P.N. Kropotkina. [Degassing of the Earth: geotectonics, geodynamics, geofluids; oil and gas; hydrocarbons and life. Materials of the All-Russian conference with international participation dedicated to the 100th anniversary of the birth of Academician P.N. Kropotkin]. October 18-22, GEOS publ., 2010, pp. 284–288. (In Russ.)
19. Charlou J.-L., Fouquet Y., Bougault H., Donval J. P., Etoubleau J., Jean-Baptiste P., Dapigny A., Appriou P., Rona P.A. Intense CH₄ plumes generated by serpentinization of ultramafic rocks at the intersection of the 1520°N fracture zone and the Mid-Atlantic Ridge. *Geo-*

chimica et Cosmochimica Acta, 1998, no. 62, pp. 2323–2333.

20. Savko A. D., Manukovsky S. V., Mizin A. I. Litologiya i fatsii doneogenovykh otlozhenii Voronezhskoi anteklizy [Lithology and facies of the Pre-Neogene deposits of the Voronezh antecline]. *Trudy Nauchno-issledovatel'skogo Instituta Geologii* [The work of the Research Institute of Geology], Voronezh, VSU Publ., vol. 3, 2001. 201 p. (In Russ.)
21. Nenakhov V. M., Strick Yu. N., Tregub A. I., Kholin V. M., Shabalin M. I. *Mineragenicheskie issledovaniya territorii s dvukh"yarusnym stroeniem (na primere Voronezhskogo kristallicheskogo massiva)* [Mineragenic studies of territories with a two-tiered structure (on the example of the Voronezh crystal massif)]. Moscow, GEOCART. GEOS publ., 2007. 284 p. (In Russ.)
22. Tregub A. I. Neotektonika territorii Voronezhskogo kristallicheskogo massiva [Neotectonics of the territory of the Voronezh crystal massif.] *Trudy Nauchno-issledovatel'skogo Instituta Geologii* [The work of the Research Institute of Geology], Voronezh, VSU Publ., vol. 9, 2002, 220 p. (In Russ.)
23. Tregub A. I., Nenakhov V. M., Sirotin V. I. Model' geodinamicheskogo razvitiya Russkoi platformy v paleozoe [Model of geodynamic development of the Russian platform in the Paleozoic]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Geologiya – Proceedings of Voronezh State University. Series: Geology*, 1998, no.5, pp. 7–13. (In Russ.)
24. Tregub A. I., Nenakhov V. M., Sirotin V. I. Geodinamicheskaya model formirovaniya osadochnogo chekhla Vostochno-Evropейskoi platformy [Geodynamic model of the formation of the sedimentary cover of the East European Platform]. V kn.: *Tektonika i geodinamika: obshchie i regional'nye aspekty*. Mater. XXXI tekton. Sovesch. [In: Tectonics and Geodynamics: General and regional aspects. Mater. XXXI quake]. Moscow, 1998, no.5, pp. 19–26. (In Russ.)
25. Coveney R. M. J., Goebel E. D., Zeller E. J., Dreschhoff, G. A. M., Angino E. E. Serpentinization and origin of hydrogen gas in Kansas. *AAPG Bulletin*, 1987, no. 71, pp. 39–48.
26. Charlou J.-L. Geochemistry of high H₂ and CH₄ vent fluids issuing from ultramafic rocks at the Rainbow hydrothermal field (3614N, MAR). *Chemical Geology*, 2002, no. 191, pp. 345–359.
27. Gufeld I. L. Geological consequences of amorphization of the lithosphere and upper mantle structure caused by hydrogen degassing. *Geodynamics and tectonophysics*, 2012, vol.3, no. 4, pp. 417–435. DOI: <https://doi.org/10.5800/GT-2012-3-4-008>
28. Albekov A. Yu. *Geologiya, petrologiya i mineragenicheskaya otsenka perspektiv rudonositeli gabbrodoleritovykh massivov trap-povoi formatsii Voronezhskogo kristallicheskogo massiva* : dis. ... kand. geol.-min.nauk. [Geology, petrology and mineragenic assessment of ore-bearing prospects of gabbrodolerite massifs of the trap formation of the Voronezh crystal massif : dissertation... Candidate of Geological and Mineralogical Sciences]. Voronezh, 2002. 238 p. (In Russ.)
29. Bykov I. N. *Verkhnedevonskie bazal'ty yugo-vostochnoi chasti Voronezhskoi anteklizy* [Upper Devonian basalts of the southeastern part of the Voronezh antecline]. Voronezh, 1975. 134 p. (In Russ.)
30. Freund F., Dickinson J. T., Cash M. Hydrogen in rocks: an energy source for deep-sea microbial communities. *Astrobiology*, 2002, no. 2(1), pp. 83–92.
31. Rogozhin E. A., Gorbatikov A.V., Larin N.V., Stepanova M. Yu. The deep structure of the Moscow avlucogen in the western part of Moscow. *Izvestia, Atmospheric and Oceanic. Physics*, 2010, no. 46, pp. 973–981.
32. Kosinova I. I., Ilyash V. V., Ilyash D. V. Litologicheskii faktor, kak odna iz prichin neravnomernosti razvitiya tsirkulatsionnykh razvitiya na territorii Voronezhskoi anteklizy [The lithological factor as one of the reasons for the uneven development of circulates on the territory of the Voronezh antecline]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Geologiya – Proceedings of Voronezh State University. Series: Geology*, 2013, no. 1, pp. 214–218. (In Russ.)
33. Kholmovoy G. V. Kol'tsevoe ozero v tsentre Tambovskoi ravniny [Ring lake in the center of the Tambov plain]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Geologiya – Proceedings of Voronezh State University. Series: Geology*, 2014, no.3, p. 119. (In Russ.)
34. Zhabin A.V., Dubkov A.A., Zolotareva G.S., Kuznetsov Yu.A. Impaktity v chetvertichnykh otlozheniyakh Voronezhskoi anteklizy [Impactites in quaternary deposits of the Voronezh antecline]. *Nedra Povolzh'ya i Prikaspiya – Subsoil of the Volga region and the Caspian Sea*, 2020, Issue 102, pp. 18–31. (In Russ.)
35. Zhabin A.V., Ignatenko I.M., Donetskiy S.V. O proiskhozhdenii otlozhenii vulkanicheskogo pepla na territorii Voronezhskoi oblasti [On the origin of volcanic ash deposits in the Voronezh region]. *Regional'nye geosistemy – Regional geosystems*, 2021, vol.45, no.3, pp. 441–454. (In Russ.)
36. Zhabin A.V., Dmitriev D.A. Metally i ikh soedineniya v otlozheniyakh verkhnego mela yugo-vostochnoi chasti Voronezhskoi anteklizy [Metals and their compounds in Upper Cretaceous deposits of the southeastern part of the Voronezh antecline]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Geologiya – Proceedings of Voronezh State University. Series: Geology*, 2019, no. 3, pp. 5–9. (In Russ.)
37. Barkovsky E. V. Zaklyuchenie o prirode tak nazyvaemogo «vzryva» v gorode Sasovo Ryazanskoj oblasti 12 aprelya 1991 goda [Conclusion on the nature of the so-called "explosion" in the city of Sasovo, Ryazan region, April 12, 1991]. *Russkaya mysl' – Russian Thought*, 2004, no. 1-12, pp. 10–35. (In Russ.)
38. Zgonnik V., Beaumont V., Deville E., Larin N., Pillot D., Farrell K. Evidence of natural leakage of molecular hydrogen associated with Carolina bays (coastal, egg-shaped depressions on the Atlantic coastal plain, province of the USA). *Progress in Earth and planetary science*, 2015, pp.1–15. DOI 10.1186/s40645-015-0062-5

Ненахов Виктор Миронович – д. г.-м. н., профессор, Воронежский государственный университет, Воронеж, Российская Федерация; E-mail: viktor.nenahov@mail.ru, ORCID <http://orcid.org/0000-0003-1439-0970>

Полеванов Владимир Павлович – д. г.-м. н., ФГКУ «Росгеолэкспертиза», Москва, РФ; E-mail: pvp1949@mail.ru

Жабин Александр Васильевич – к. г.-м. н., доцент, Воронежский государственный университет, Воронеж, Российская Федерация; E-mail: zhabin@geol.vsu.ru, ORCID <http://orcid.org/0000-0002-4690-676X>

Бондаренко Светлана Владимировна – к. г.-м. н., доцент, Воронежский государственный университет, Воронеж, Российская Федерация; E-mail: kwarcz@yandex.ru

Золотарева Галина Сергеевна – к. г.-м. н., доцент, Воронежский государственный университет, Воронеж, РФ; E-mail: akcessoriy@mail.ru, ORCID <http://orcid.org/0000-0003-2542-4558>
Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Viktor M. Nenakhov – Dr. habil. in Geol.-Min., professor, Voronezh State University, Voronezh, Russian Federation; E-mail: viktor.nenahov@mail.ru, ORCID <http://orcid.org/0000-0003-1439-0970>

Vladimir P. Polevanov – PhD, Dr. habil. in Geol.-Min., FGKU "Rosgeolexpertiza", Moscow, Russian Federation; E-mail: pvp1949@mail.ru

Alexandr V. Zhabin – PhD in Geol.-Min., associate professor, Voronezh State University, Voronezh, Russian Federation; E-mail: zhabin@geol.vsu.ru, ORCID <http://orcid.org/0000-0002-4690-676X>
Svetlana V. Bondarenko – PhD in Geol.-Min., associate professor, Voronezh State University, Voronezh, Russian Federation; E-mail: kwarcz@yandex.ru

Galina S. Zolotareva – PhD in Geol.-Min., associate professor, Voronezh State University, Voronezh, Russian Federation; E-mail: akcessoriy@mail.ru, ORCID <http://orcid.org/0000-0003-2542-4558>
All authors have read and approved the final manuscript.