

Разработка методики поисков природного водорода на территории Воронежской области: Статья 1. Теоретические основы поисков природного водорода

©2026 А. В. Крайнов¹✉, В. М. Ненахов¹, А. А. Третьяк²,
Н. А. Корабельников¹, С. В. Мануковский¹, А. А. Валяльщиков¹,
О. В. Жаворонкин¹, Ю. А. Устименко¹, Е. В. Сидорова², А. А. Чумаков²

¹*Воронежский государственный университет,
Университетская пл. 1, 394018 Воронеж, Российская Федерация*
²*Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ)
им. М. И. Платова, ул. Просвещения, 132, 346428, Новочеркасск, Российская Федерация*

Аннотация

Введение: растущий интерес к природному («золотому») водороду как перспективному источнику энергии подкрепляется его институциональным признанием: в 2021 году Австралия первой включила его в перечень полезных ископаемых, а с 2023 года он добавлен в Общероссийский классификатор полезных ископаемых. Ключевое подтверждение потенциала ресурса – коммерческая добыча водорода в Мали. Учёные выделяют несколько гипотез происхождения водорода в земной коре: глубинную дегазацию, серпентинизацию, радиолиз воды, биогенное разложение органики и др. Его скопления связаны с офиолитовыми поясами, разломными зонами и докембрийскими слоями богатыми железом, а сохранность залежей зависит от герметичности покрышек, препятствующих его дегазации. Перспективным поисковым признаком считаются кольцевые структуры – циркумменты, хорошо заметные на космических снимках. Они могут указывать на газотранспортные системы или глубинные ловушки и маркируют участки дегазации водорода. Однако их прямая связь с водородной дегазацией требует изучения.

Разработка методики: авторами впервые на территории России предложена методика проведения поисковых работ на водород. Был применён комплекс камеральных, полевых и лабораторных методов исследования, обеспечивающих многоступенчатую оценку перспектив водородной дегазации на изучаемой территории. Камеральные исследования служили основой для регионального прогноза и локализации перспективных участков. В их рамках выполнено составление специализированных карт потенциальных источников водорода в докембрийских образованиях, базирующееся на анализе геологических карт, данных глубинного строения, минералого-петрографических характеристик пород и существующих геодинамических моделей генерации водорода (серпентинизация, глубинная дегазация, радиолиз и др.). Картирование потенциальных структур-ловушек водорода в осадочном чехле – выявление литологических экранов, способных аккумулировать водородные флюиды. Выделение перспективных и первоочередных участков для газового опробования позволило провести ранжирование территорий по степени перспективности на основе комплексного анализа геологических, геофизических и геохимических данных. Дешифрирование данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) в пределах выделенных участков позволило оконтурить кольцевые структуры (циркумменты), которые могут маркировать зоны глубинной дегазации водорода.



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.

✉ Крайнов Алексей Владимирович, e-mail: aleksey_vsuo_geo@mail.ru

Полевые исследования обеспечивали прямую проверку прогнозных моделей и получение фактических данных о наличии водородных эманаций. Лабораторные исследования позволили определить концентрации гелия, растворённого в воде, который выступает надёжным индикатором глубинной дегазации, а его аномальные концентрации коррелируют с зонами водородной эмиссии.

Выводы: комплексное применение перечисленных методов позволило сформировать обоснованную прогнозно-поисковую модель, локализовать перспективные участки для дальнейшего изучения.

Ключевые слова: водород, циркуммент, кристаллический фундамент, гелий, метан.

Для цитирования: Крайнов А. В., Ненахов В. М., Третьяк А. А., Корабельников Н. А., Мануковский С. В., Валяльщикова А. А., Жаворонкин О. В., Устименко Ю. А., Сидорова Е. В., Чумаков А. А. Разработка методики поисков природного водорода на территории Воронежской области: Статья 1. Теоретические основы поисков природного водорода // *Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология*. 2026. № 1. С. 4–17. DOI: <https://doi.org/10.17308/geology/1609-0691/2026/1/4-17>.

Введение

В последние годы резко вырос научный и практический интерес к водороду как перспективному источнику энергии будущего, что подтверждается увеличением числа исследований (в том числе в Китае, Германии, США и Австралии). Если ранее водород рассматривался преимущественно как продукт техногенных процессов (электролиз воды, паровой риформинг метана и др.) и классифицировался как «зелёный», «голубой» или «серый», то накопление эмпирических данных о глубинных эмиссиях водорода в тектонических структурах привело к выделению природного («золотого») водорода [1, 2].

В 2021 году Австралия первой признала его полезным ископаемым и начала активное лицензирование водородных месторождений. С 1 августа 2023 года природный водород включён в Общероссийский классификатор полезных ископаемых и подземных вод в России как самостоятельное полезное ископаемое. Таким образом, перспективы перехода на водородную экономику значительны, однако, требуют масштабных научных исследований: необходимо понять механизмы генерации и миграции природного водорода, разработать методы его поиска (в т. ч. по кольцевым структурам – циркумментам) и оценки запасов, а также решить проблемы, связанные с высокой мобильностью и утечкой водорода из залежей.

Важным доказательством потенциала природного водорода стало открытие в 2012 г. в малийской деревне Буракебугу скважины с содержанием водорода, достигающим 98 %; сегодня Мали – единственная страна, коммерчески производящая природный водород. Это стимулировало поиски аналогичных месторождений и разработку методик обнаружения водорода в разных странах.

На сегодняшний день выделяют несколько гипотез происхождения водорода в земной коре: глубинная дегазация из ядра и мантии, серпентинизация (реакция воды с ультраосновными породами), взаимодействие воды с другими породами и минералами, радиолиз воды под действием радиации и биогенное разложение органических веществ [3–12].

Основными геологическими структурами, с которыми связывают скопления водорода, являются офи-

олитовые пояса (например, в Турции, Филиппинах, Омане), разломные зоны и докембрийские слои богатые железом. Для формирования крупных скоплений водорода необходимы следующие условия: источники водорода, каналы миграции (разломы, вулканическая активность) и герметичные покрывки (аргиллиты, соли, глинистые водоупоры, диабазовые тела). Выходы водорода на поверхность земли предположительно происходят через кольцевые структуры – циркумменты.

По мнению ряда авторов, важным поисковым признаком являются кольцевые структуры, которые получили название циркумменты (рис. 1). Структуры визуально хорошо дешифрируются на космоснимке, сделанном в летнее время, контрастно выделяясь на фоне полей, и представляют собой абсолютно правильную круглую форму и характерные следы, а также им не свойственны изменения формы рельефа [13–15]. Кольцевые структуры хорошо видны на снимках и в зимнее время, отчётливо проявляясь кругами на снежном покрове. Кольцевые структуры часто образуют композиции в виде цепочек, круговых и эллипсоидальных структур до первых десятков километров в поперечнике. Если цепочки могут свидетельствовать о линейном характере газотранспортных систем (зона разломов), то концентрические ансамбли могут указывать на наличие на глубине структур – ловушек, переполненных водородом и сопутствующими газами. Данные структуры являются предполагаемыми местами дегазации водорода, отмечая наиболее слабые участки, через которые природный газ попадает на поверхность [14, 15].

Изучению циркумментов, как структур, связанных с водородом, стали придавать значение только в последнее время. В работе Ильиша Д.В., которая проводилась на территории Липецкой области, циркумменты рассматриваются как объекты эколого-геологического районирования. В ней доказана связь циркумментов с глубинными разломами, но вопрос их связи с водородом не рассматривался [17, 18].

В работе [14] показано, что структурами, представляющими собой первоочередной прикладной интерес, являются древние платформы. Одной из них является Восточно-Европейская платформа, в том числе терри-

тория Воронежской антеклизы. 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. Минимальная (50–100 м) мощность осадочного чехла отмечается 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 [19]. Большая часть Воронежской антеклизы расположена в

пределах Воронежской области.

На примере Воронежской антеклизы можно рассмотреть основные минерагенические 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, карбонатных пород); 4) присутствие потенциальных газотранспортных систем; 5) наличие структурных ловушек и зон дренирования на земную поверхность.



Рис. 1. Циркументы, связанные с выделениями водорода, на космическом снимке [16].
[Fig. 1. Circumferences associated with hydrogen emissions in a space image [16].]

Методика

После выявления вероятных продуцирующих водород структур в фундаменте Воронежской антеклизы, к которым относятся глубинные разломы, а также широко распространенные мафит-ультрамафитовые структурно-вещественные комплексы, среди которых наиболее представительными являются *мамонский* ($v\delta KR_1m$) и *еланский* (vKR_1e), а менее распространенными *шукавский* ($\delta KR_2\delta$) и *новогольский* (vKR_2n) (рис. 2) был проведен комплекс работ, включающий в себя камеральные, полевые и лабораторные методы.

К камеральным методам отнесено: составление

карт потенциальных источников водорода в докембрийских образованиях, а также выявление потенциальных структур-ловушек водорода в осадочном чехле, перспективных и первоочередных участков газового опробования при обязательном использовании материалов дистанционного зондирования Земли. К полевым методам отнесено шпуровое опробование в пределах выделенных циркументов; опробование гидрогеологических скважин, включающее в себя измерение концентрации сопутствующих водороду газов (гелий и метан). Лабораторные методы включали определение гелия, растворенного в воде.

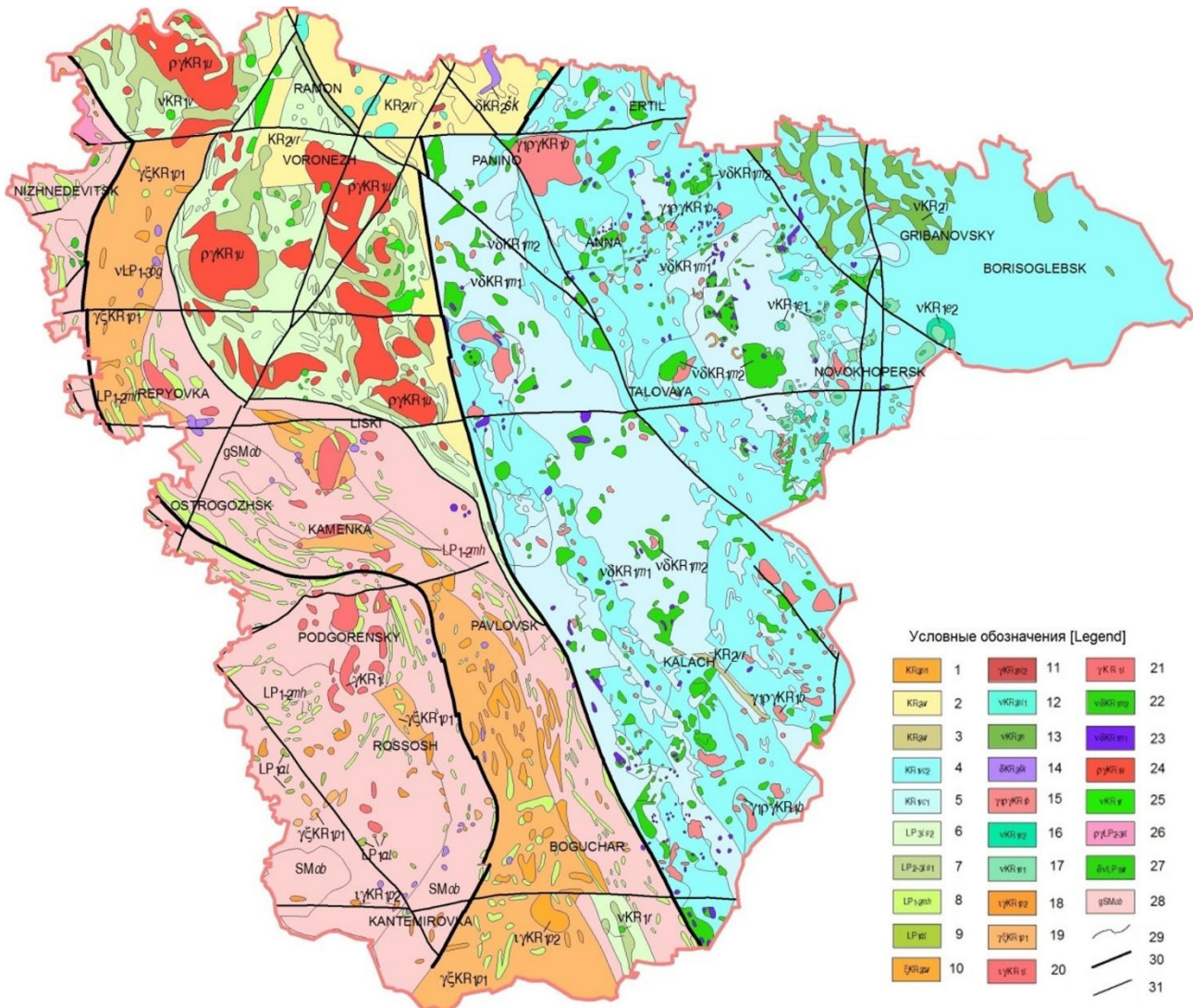


Рис. 2. Схематическая геологическая карта докембрийских образований Воронежской области (по Чернышов Н. М., Молотков С. П. и др.). Масштаб 1: 1 500 000. Условные обозначения: 1 – Хоперский мегаблок, Калачско-Эртильский макроблок. Панинская толща. Трахибазальты, трахиандезиты; 2 – Лосевская шовная зона. Воронежская свита. Метаэффузивы основного и среднего состава: метабаазальты, метаандезитобазальты, метаандезиты, метариодациты; 3 – Хоперский мегаблок, Калачско-Эртильский макроблок. Воронежская свита. Метаандезиты, метаандезито-базальты, метатифы, эруптивные метабрекчи; 4 – Хоперский мегаблок, Калачско-Эртильский макроблок. Воронцовская серия. Верхняя толща. Флишоидное переслаивание двуслюдяных, биотит-гранатовых андалузитовых углеродсодержащих сланцев; 5 – Хоперский мегаблок, Калачско-Эртильский макроблок. Воронцовская серия. Нижняя толща. Терригенно-туфогенная толща (мегаалевролиты, метапесчаники, метатифы); 6 – Лосевская шовная зона. Лосевская серия. Верхняя толща. Метадациты, метариодациты, метариолиты, метаандезиты и метабаазальты, метатифы и метатиффиты; 7 – Лосевская шовная зона. Лосевская серия. Нижняя толща. Метабаазальты, метаандезиты, метадациты, амфиболиты, ортосланцы основного, реже среднего состава; 8 – Мегаблок КМА. Михайловская серия. Эффузивы основного-среднего состава, сланцы, песчаники, кварциты, ортоамфиболиты и ортосланцы, коматиниты, железистые кварциты, гнейсы; 9 – Мегаблок КМА. Михайловская серия. Александровская свита. Ортоамфиболиты, ортосланцы основного и ультраосновного состава, метакоматиниты; 10 – Хоперский мегаблок, Калачско-Эртильский макроблок. Артюшковский комплекс. Сиениты пироксен-рибекитовые, сиенит-порфиры с ксенолитами субщелочных пироксенов; 11 – Лосевская шовная зона. Ольховский комплекс. Вторая фаза. Граниты биотит-амфиболовые; 12 – Лосевская шовная зона. Ольховский комплекс. Первая фаза. Габбро, габбронориты, монцодиориты, кварцевые монцониты; 13 – Хоперский мегаблок, Калачско-Эртильский макроблок. Новогольский комплекс. Габбродолериты оливинные и безоливинные, долерит-пегматиты, в т.ч. шумилинские; 14 – Лосевская шовная зона. Шукавский комплекс. Оливиниты, перидотиты, преимущественно верлиты, серпентиниты, пироксениты, габбро; 15 – Хоперский мегаблок, Калачско-Эртильский макроблок. Бобровский комплекс. Граниты двуполевошпатовые биотитовые, плагиограниты, пегматиты, гранит-аплиты; 16 – Хоперский мегаблок, Калачско-Эртильский макроблок. Еланский комплекс. Вторая фаза. Диориты, кварцевые диориты, габбродиориты (иногда с ксенолитами норитов); 17 – Хоперский мегаблок, Калачско-Эртильский макроблок. Еланский комплекс. Первая фаза. Нориты с ксенолитами ультрамафитов; габбронориты, габбро роговообманковые, ортопироксениты; 18 – Мегаблок КМА. Павловский комплекс. Вторая фаза. Граниты лейкократовые, биотитовые, гранит-аплиты, пегматиты; 19 – Мегаблок КМА. Павловский комплекс. Первая фаза. Граносиениты порфиробластические известково-щелочные, биотитовые, биотит-роговообманковые; 20 – Лосевская шовная зона. Лискинский комплекс. Граниты субщелочные лейкократовые, часто порфировидные, двуполевошпатовые, биотитовые калиевонатриевые; дайки гранит-аплитов; 21 – Мегаблок КМА. Лискинский комплекс. Граниты умеренно щелочные, биотитовые; 22 – Хоперский

мегаблок, Калачско-Эртильский макроблок. Мамонский комплекс. Вторая фаза. Мафитовые (каменский тип) и ультрамафит-мафитовые (ширяевский, песковатский и еланско-вязовский типы); 23 – Лосевская шовная зона. Мамонский комплекс. Первая фаза. Перидотиты, серпентиниты; 24 – Лосевская шовная зона. Усманский комплекс. Плагииграниты биотитовые, роговообманково-биотитовые; граниты биотитовые; 25 – Лосевская шовная зона. Рождественский комплекс. Габбро роговообманковые, габбронориты, габбро-амфиболиты, пироксениты оливиновые, вебстериты; 26 – Мегаблок КМА. Салтыковский комплекс. Плагииграниты, тоналиты; гранодиориты; дайки плагиигранитов; 27 – Мегаблок КМА. Сергиевский комплекс. Дуниты, перидотиты, пироксениты, серпентиниты, габбро; 28 – Мегаблок КМА. Обоянский комплекс нерасчлененный (тысячи метров). Плагииграниты биотитовые, гранат-биотитовые, иногда с кордиеритом и силлиманитом, биотит-амфиболовые, амфиболовые, прослои и линзы амфиболитов; 29 – Геологические границы; 30 – Трансрегиональные разломы I порядка; 31 – Региональные разломы II порядка.

[Fig 2. Schematic geological map of Precambrian formations in the Voronezh region. Scale 1:1 500 000. Legend: (1) – Kхoper megablock, Kalach-Ertil macroblock. Panino Formation. Trachybasalts, trachyandesites; (2) – Losevo Suture Zone. Voronezh Formation. Metaeffusive rocks of mafic and intermediate composition: metabasalts, meta-andesite basalts, meta-andesites, metarhyodacites; (3) – Kхoper megablock, Kalach-Ertil macroblock. Voronezh Formation. Meta-andesites, meta-andesite-basalts, metatuffs, eruptive metabreccias; (4) – Kхoper megablock, Kalach-Ertil macroblock. Vorontsovka Series. Upper unit. Fylschoid interbedding of two-mica, biotite-garnet andalusite carbonaceous schists; (5) – Kхoper megablock, Kalach-Ertil macroblock. Vorontsovka Series. Lower unit. Terrigenous-tuffaceous unit (metasiltstones, metasandstones, metatuffs); (6) – Losevo Suture Zone. Losevo Series. Upper unit. Metadacites, metarhyodacites, metarhyolites, meta-andesites and metabasalts, metatuffs and metatuffites; (7) – Losevo Suture Zone. Losevo Series. Lower unit. Metabasalts, meta-andesites, metadacites, amphibolites, orthoschists of mafic, less commonly intermediate composition; (8) – KMA megablock. Mikhaylovka Series. Effusive rocks of mafic-intermediate composition, schists, sandstones, quartzites, orthoamphibolites and orthoschists, komatiites, ferruginous quartzites, gneisses; (9) – KMA megablock. Mikhaylovka Series. Alexandrovka Formation. Orthoamphibolites, orthoschists of mafic and ultramafic composition, metakomatiites; (10) – Kхoper megablock, Kalach-Ertil macroblock. Artyushkovo Complex. Pyroxene-riebeckite syenites, syenite-porphyrries with xenoliths of subalkaline pyroxene; (11) – Losevo Suture Zone. Olkhovka Complex. Second phase. Biotite-amphibole granites; (12) – Losevo Suture Zone. Olkhovka Complex. First phase. Gabbro, gabbronorites, monzodiorites, quartz monzonites; (13) – Kхoper megablock, Kalach-Ertil macroblock. Novogolsky Complex. Olivine and olivine-free gabbrodolerites, dolerite-pegmatites, including the Shumilino type; (14) – Losevo Suture Zone. Shukavka Complex. Olivinites, peridotites, predominantly wehrlites, serpentinites, pyroxenites, gabbro; (15) – Kхoper megablock, Kalach-Ertil macroblock. Bobrov Complex. Two-feldspar biotite granites, plagiogranites, pegmatites, granite-aplites; (16) – Kхoper megablock, Kalach-Ertil macroblock. Elan Complex. Second phase. Diorites, quartz diorites, gabbrodiorites (sometimes with norite xenoliths); (17) – Kхoper megablock, Kalach-Ertil macroblock. Elan Complex. First phase. Norites with ultramafic xenoliths; gabbronorites, hornblende gabbro, orthopyroxenites; (18) – KMA megablock. Pavlovsk Complex. Second phase. Leucocratic, biotite granites, granite-aplites, pegmatites; (19) – KMA megablock. Pavlovsk Complex. First phase. Porphyroblastic calc-alkaline granosyenites, biotite, biotite-hornblende; (20) – Losevo Suture Zone. Liski Complex. Subalkaline leucocratic granites, often porphyritic, two-feldspar, biotite, potassium-sodium; granite-aplite dikes; (21) – KMA megablock. Liski Complex. Moderately alkaline, biotite granites; (22) – Kхoper megablock, Kalach-Ertil macroblock. Mamon Complex. Second phase. Mafic (Kamenka type) and ultramafic-mafic (Shiryayev, Peskovatka, and Elan-Vyazovka types); (23) – Losevo Suture Zone. Mamon Complex. First phase. Peridotites, serpentinites; (24) – Losevo Suture Zone. Usman Complex. Biotite, hornblende-biotite plagiogranites; biotite granites; (25) – Losevo Suture Zone. Rozhdestvenskoye Complex. Hornblende gabbro, gabbronorites, gabbro-amphibolites, olivine pyroxenites, websterites; (26) – KMA megablock. Saltykov Complex. Plagiogranites, tonalites; granodiorites; plagiogranite dikes; (27) – KMA megablock. Sergievka Complex. Dуниты, peridotites, pyroxenites, serpentinites, gabbro; (28) – KMA megablock. Oboyan Complex undifferentiated (thickness in thousands of meters). Biotite plagiogneisses, garnet-biotite, sometimes with cordierite and sillimanite, biotite-amphibole, amphibole, interlayers and lenses of amphibolites; (29) – Geological boundaries; (30) – First-order transregional faults; (31) – Second-order regional faults.]

Фациальный анализ и методика составления фациальных карт

Построение фациальных карт проводилось для определения ловушек водорода в осадочном чехле Воронежской антеклизы. Ловушками водорода могут служить глинистые и карбонатные образования, которые также являются региональными водоупорами.

Построение фациальных карт базируется на основе значительного и разнообразного фактического материала для установления не только палеогеографических, структурно-тектонических вещественных и литолого-фациальных особенностей формирования исследуемых отложений, но и выявления среди них перспективных площадей, в качестве структурных ловушек на водород.

В основу настоящей работы положены материалы по составлению литолого-фациальной и других карт с элементами прогноза. Для этого было изучено большое количество производственных и тематических отчетов, проведены полевые исследования с целью исследования вещественного состава. Основной фактической базой для составления разрезов и карт были отчеты по геологосъемочным работам масштаба 1:200 000. Кроме того, привлекались материалы геологосъемочных работ масштаба 1:50 000, ГК-500 и

ГДП-200. В целом, с различной степенью детальности, проанализированы геологические разрезы более 1000 буровых скважин.

Картографические построения явились основной и наиболее трудоемкой частью всей работы. Они позволили в виде пространственных моделей отразить состав и строение наиболее перспективных участков. Этим целям наиболее отвечают литолого-фациальные карты. На всю площадь Воронежской области построены литолого-фациальные карты по возрастным срезам. Составлению предшествует построение сопоставительных колонок, корреляционных разрезов. К комплексу карт построены литолого-фациальные профили.

На площади распространения составлены карты фактического материала, карты изопакит.

Литолого-фациальные карты различных масштабов строились с учетом методических указаний по составлению Атласа литолого-палеогеографических карт Русской платформы, на основании опыта литологической школы Воронежского госуниверситета [20, 21], а также собственных разработок. Установлению фациальных обстановок предшествовало выделение литологических типов пород в разрезе с учетом стратиграфических, минералого-петрографических, структурно-

текстурных признаков, характера фауны, флоры и включений. Затем определялась принадлежность литотипов пород к группам фаций: I–III – морские; IV – переходные; V – континентальные. В составе каждой из групп выделены фациальные обстановки по характеру гидродинамического режима в бассейне седиментации (для морских образований) и по генетическим признакам (для переходных и континентальных отложений).

Литолого-фациальные карты построены на основании расчленения разрезов как по латерали, так и по батиасти для морских отложений, а также с учетом взаимоотношения различных генетических литотипов как по площади их распространения, так и по положению их в разрезе всей толщи для континентальных образований. Полные разрезы, с установленными кровлей и подошвой стратиграфического подразделения, принимались за 100 %. Затем производился подсчет баланса пород, процентное соотношение мощностей различных литотипов, слагающих толщу. При этом породы, слагающие менее 10 % всего разреза, на картах не показаны, за исключением рудных или важных маркирующих горизонтов. Типы пород, мощности которых составляют 10–25 % от суммарной мощности толщи, представлены на карте одной полосой (шириной 5 мм); породы, составляющие 25–50 % – двумя полосами; 50–75 % – тремя; более 75 % – четырьмя. Подошва и кровля разреза на карте отмечаются толстыми линиями, между которыми располагается четырех- (и более) полосные пачки, отражающие элементарный разрез, многократно повторяющийся в пределах фациальной зоны или подзоны.

Границы резких изменений различных пород в плане и разрезе, соответствуют границам фациальных зон; изменение процентного соотношения между литотипами пород, участвующими в строении разреза и отражающееся на карте в изменении количества полос (при том же качественном наборе их) отвечает границам фациальных подзон. Литологический состав пород показан соответствующим знаком, фациальная обстановка – римской цифрой и цветом. На карты наносятся изопакеты закартированных отложений.

Последовательность полос на карте в одном элементарном разрезе – снизу вверх отвечает хронологической последовательности наложения пород в исследуемом стратиграфическом подразделении. В соответствии с этим осуществляется порядок в записи названия зоны: первые цифровые и буквенные индексы обозначают фациальную обстановку при накоплении отложений, залегающих в подошве стратиграфического подразделения, последние – в кровле.

При чередовании нескольких литотипов в разрезе, между цифровыми индексами, обозначающими фациальную обстановку при их формировании, ставится тире. Например, зона IVB–IIA обозначает, что нижняя пачка всей толщи накапливалась в условиях слабо засоленной лагуны, верхняя же пачка – в условиях мелководно-морского бассейна со слабой активностью гидродинамического режима. В случае, когда стратиграфическая толща или какая-то ее часть представлена тонким

переслаиванием пород разных литотипов, между индексами, соответствующими им, ставится запятая. Например, зона IVB, IIIA–IVB свидетельствует о том, что нижняя пачка разреза представлена тонким переслаиванием доломитов (IVB) и известняков (IIIA), а верхняя часть толщи – отложениями мелководной опресненной лагуны (IVB) или известковистыми глинами.

В случае невозможности установления однозначного генезиса для континентальных образований или в случае смешанной активности гидродинамического режима при формировании морских отложений, ставится двойной буквенный индекс. Например, зона VAB обозначает озерно-болотные нерасчлененные образования; ПБВ – литофацию разнозернистых (от мелко-, до грубозернистых) песчаников с примесью гравийного и галечного материала, сформированную в прибрежно-морских условиях при средней и высокой активности гидродинамики бассейна осадконакопления.

Изучение мирового опыта показывает, что происхождение природного водорода (согласно «тектонической» гипотезе, гипотезам «серпентинизации» и «окисления сульфидов») связано с особенностями строения докембрийского фундамента, но локализуется он чаще всего в ловушках верхнего структурного этажа, поэтому важно выявить потенциальные ловушки водорода в перекрывающем его осадочном чехле. Наиболее подходящими «экранами», препятствующими выходу водородных эманаций в атмосферу, служат мощные региональные водоупорные горизонты – поскольку водород практически не растворяется в воде, они могут выступать в роли литологических ловушек.

На территории Воронежской области выделяются три ключевых таких горизонта (рис. 3). Первый – муллинский (живетский ярус среднего девона), самый нижний и ближайший к докембрию водоупор, сложенный преимущественно глинами. Его мощность варьируется от первых метров до 20–25 м, а площадь распространения охватывает около 70 % территории области (центральную, северо-западную, северную и юго-восточную части), отсутствуя на своде антеклизы (линия Острогжск–Павловск–Богучар) и на юго-западе. Второй – чаплыгинский (франский ярус верхнего девона), залегает над муллинским, представлен глинами, алевроитовыми и песчаными породами (мощностью до 100 м). Занимает около 55–60% площади области (центральную, западную, северную и юго-восточную части), но отсутствует к юго-западу от оси свода антеклизы, на крайнем юге, юго-западе, северо-западе и востоке. Третий – радаевский (визейский ярус нижнего карбона), водоупор распространен на юго-западном склоне Воронежской антеклизы, сложен глинами с прослоями песков и алевроитов (мощностью от первых метров до 30 м). Занимает на 8–10 % территории (юго-западная и крайняя южная части).

В сумме муллинский, чаплыгинский и радаевский горизонты покрывают около 90 % площади Воронежской области и могут служить потенциальными структурными и литологическими ловушками водорода в осадочном чехле над докембрием.

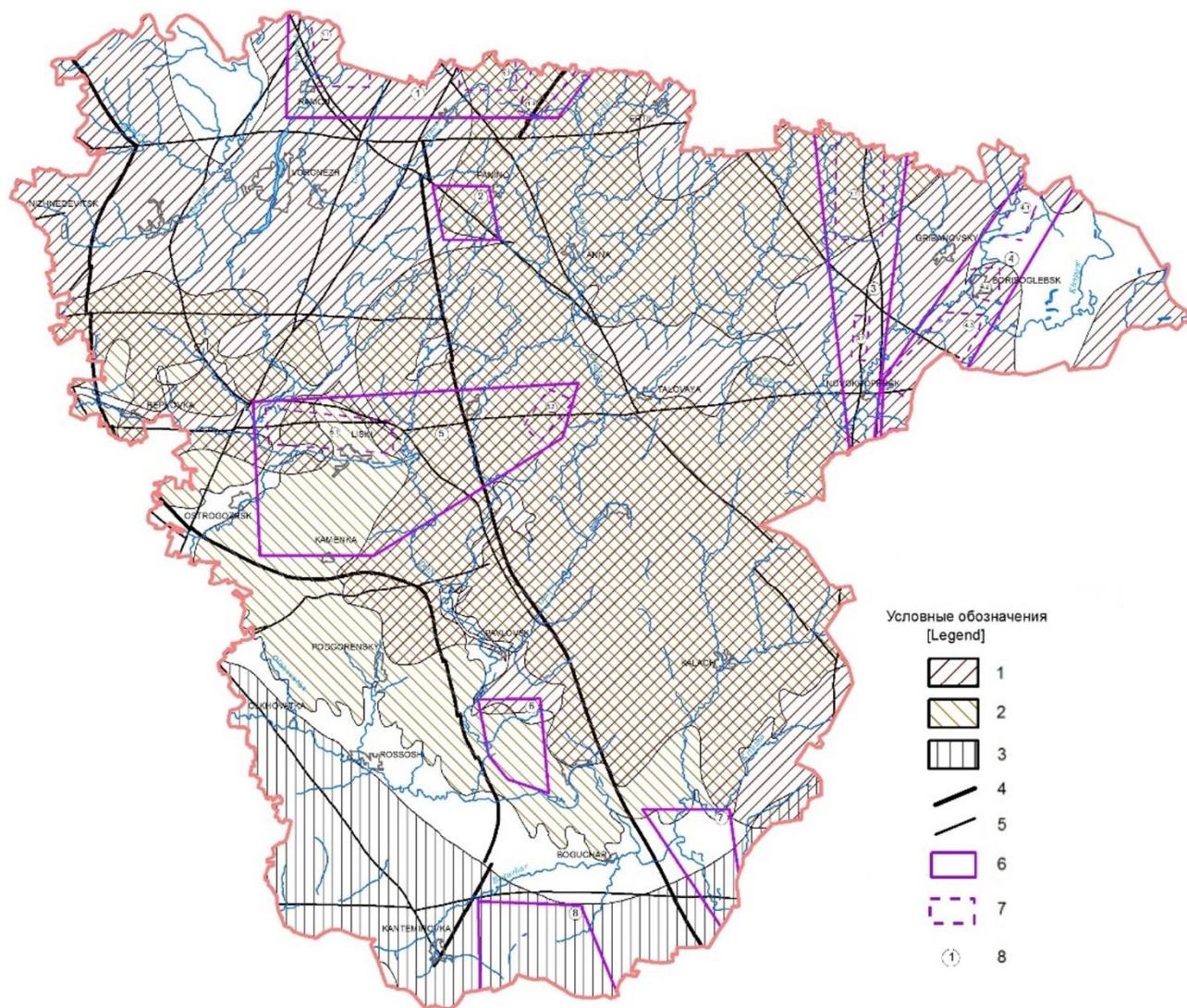


Рис. 3. Карта-схема потенциальных структур-ловушек водорода в осадочном чехле Воронежской области. Масштаб 1: 1 500 000. Потенциальные структуры-ловушки водорода: 1 – Муллинский горизонт, 2 – Чаплыгинский горизонт, 3 – Радаевский горизонт, 4 – трансрегиональные разломы I порядка, 5 – региональные разломы II порядка, 6 – выделенные участки, перспективные для постановки работ по геологическому изучению природного водорода в промышленных объемах, 7 – участки детализации, перспективные для постановки работ по геологическому изучению природного водорода в промышленных объемах, 8 – участки детализации.

[Fig. 3. Schematic map of potential hydrogen trapping structures in the sedimentary cover of the Voronezh region. Scale 1:1 500 000. Potential hydrogen trapping structures: 1 – Mullinsky horizon, 2 – Chaplygin horizon, 3 – Radaevsky horizon, 4 – Transregional faults of the first order, 5 – Second-order regional faults, 6 – Identified areas that are promising for setting up work on geological exploration of natural hydrogen in industrial quantities, 7 - Detailed areas promising for the implementation of geological exploration of natural hydrogen in industrial quantities, 8 – Detailing areas.]

Методика дешифрирования материалов дистанционного зондирования Земли

В результате работы созданы карты-схемы дешифрирования материалов ДЗЗ для перспективных участков и таблица дешифровочных признаков. Таблица сформирована путём обобщения и анализа признаков на космических снимках с их сопоставлением с данными о геолого-структурных и геоморфологических особенностях территории, а также о характере экзогенных геодинамических процессов.

Выделенные циркумменты (замкнутые изометричные депрессии) по характерным наборам признаков

разделены на три группы:

- циркумменты в пределах слабоденированных водоразделов;
- циркумменты диаметром до 300–500 м в пределах надпойменных террас;
- циркумменты диаметром от 300–500 м до 2–3 км в пределах надпойменных террас.

Первая группа представлена циркумментами, ассоциирующиеся с просадочными формами (степные блюдца), приурочена к территории распространения плащеобразно залегающих покровных суглинков, прослеживаются вдоль линии водораздела (рис. 4).

Встречаются на различных гипсометрических уровнях; отсутствуют на участках с хорошо развитой овражно-балочной сетью, на молодых склонах с активными современными экзогеодинамическими процессами. Для циркумментов данной группы характерна высокотравная, влаголюбивая растительность,

а также древесно-кустарниковая густая поросль, проявляющаяся в оптическом диапазоне насыщенным темно-зеленым фототон. Для циркумментов данной группы характерна заболоченность, что проявляется на снимках в ближнем ИК-диапазоне наличием темно-синих пятен.

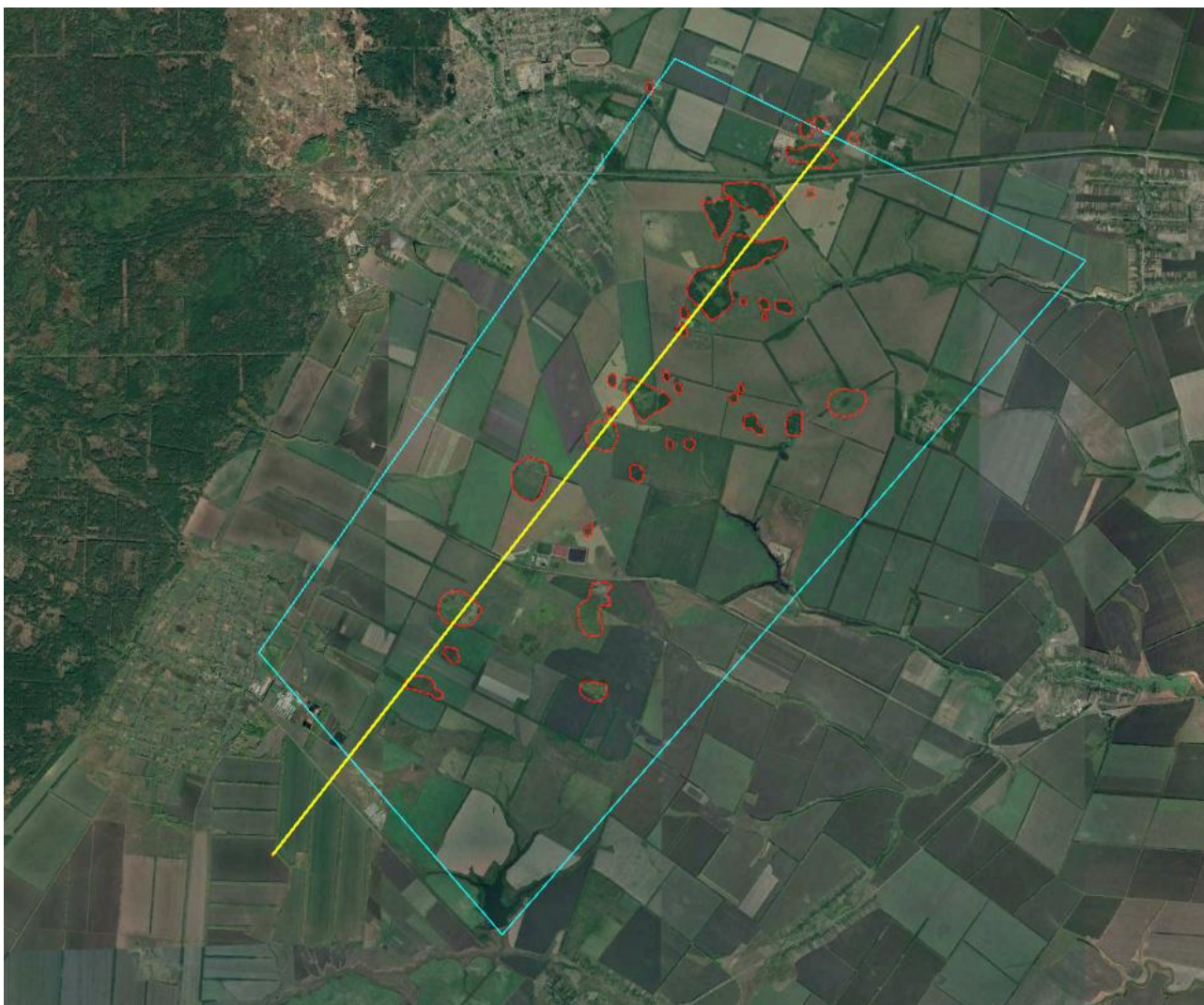


Рис. 4. Участок Бобровский. Расположение циркумментов вдоль линии водораздела р. Битюг и р. Чигла.
[**Fig. 4.** Bobrovsky site. Location of circumments along the watershed line of the Bitug and Chigla rivers.]

Вторая группа представлена циркумментами диаметром до 300–500 м, выделенными в пределах надпойменных террас различной ширины, прилегающих к пойме или к другой террасе (рис. 5). Границы распространения проводятся вдоль тыловых швов, отчетливо дешифрируются по резким перегибам поверхности склона. Встречаются на различных гипсометрических уровнях. Рельеф местности представляет собой плоскую, пологоволнистую равнину со слабым вертикальным и горизонтальным расчленением, с характерными для террас старицами и старичными понижениями, прирусловыми валами и заболачиванием у тыловых швов.

Для рассматриваемых циркумментов также характерна влаголюбивая травянистая растительность,

древесно-кустарниковая густая поросль. В засушливые годы понижения, лишенные древесной растительности, могут быть распаханы и использоваться под посевы сельскохозяйственных культур. На космоснимках в видимом диапазоне контуры имеют светлый внешний контур, темно-зеленый внутренний, реже темно-зеленый фототон по всей площади циркуммента. В ближнем ИК-диапазоне – желтый или ярко-желтый внешний контур.

Часто в пределах террас встречаются сосновые леса, на территории которых дешифрируются «островки», лишенные древесной растительности (полностью или частично) или с произрастанием лиственных деревьев – березняка, осины. Как правило, подоб-

ные участки характеризуются близким положением уровня грунтовых вод. Наличие в плане у «островков» округлой формы позволяет отнести эти участки к циркумментам.

Плотная растительность не позволяет дистанционными методами выявить наличие или отсутствие оконтуривающего вала. На мелкомасштабных снимках

такие участки соснового леса характеризуются пятнистой структурой фототона с четкими или размытыми краями. В видимом диапазоне контуры определяются по переходу от темно-зеленого фототона соснового леса к другим цветовым тонам (от светло-зеленого до серо-коричневого) в зависимости от сезона и видового состава растительности.

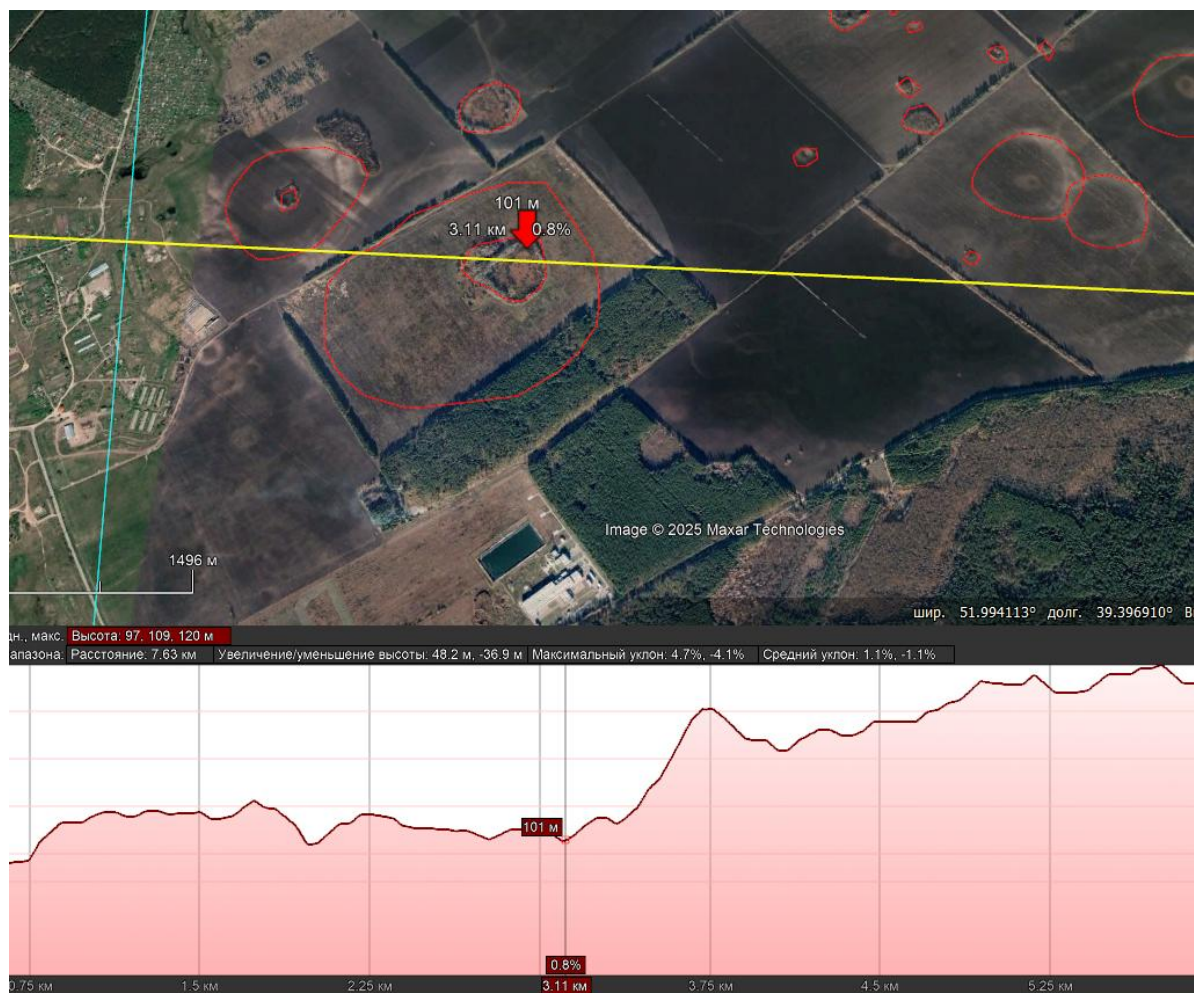


Рис. 5. Участок Рамонский. Расположение циркумментов вдоль линии тылового шва надпойменной террасы.
[Fig. 5. Ramonsky site. Location of circumments along the back suture line of the above-floodplain terrace.]

Третья группа кольцевых структур выделена также в пределах надпойменных террас, но отличительной особенностью являются размеры в плане (рис. 6, 7). Наиболее крупные циркумменты достигают в диаметре 2–3 км. Границы их распространения локализованы в пределах центральной части поверхности террасы. Как правило, участки заняты под посевы сельскохозяйственных культур, иногда захватывая лесные массивы.

В поперечном профиле по внешнему контуру выделяется вал высотой до 3–4 м при ширине от 100–200 м до 400–500 м. В видимом диапазоне на снимках четко проявлен светло-серый (реже светло-коричневый) внешний контур (оконтуривающий вал), темно-зеленый внутренний контур, реже темно-зеленый фототон по всей площади. В ближнем ИК-диапазоне – желтый

или ярко-желтый внешний контур. Структура фототона пятнистая с нечеткими размытыми краями.

На следующем этапе, используя выявленные дешифровочные признаки, в пределах 14 перспективных участков были выделено 207 циркумментов, относящихся к первой группе, 498 – ко второй, 113 – к третьей.

Целью дешифрирования являлось выявление в ландшафте кольцевых структур (циркумментов). В ходе выполнения исследовательских работ осуществлялось дешифрирование данных дистанционного зондирования Земли. Для реализации поставленных задач были задействованы мультиспектральные космические снимки, полученные с помощью спутниковых систем Landsat 5, Landsat 7, Landsat 8, ASTER, Maxar и Sentinel. Для построения трёхмерной модели земной поверхности использовались данные радарной интер-

ферометрии SRTM (Shuttle Radar Topography Mission). Методический аппарат исследования включал следующие приёмы: визуальное дешифрирование одиночных космических снимков в видимом диапазоне электро-

магнитного излучения и ближней инфракрасной зоне; визуальный анализ цифровой модели рельефа; построение профильных разрезов рельефа с последующим их анализом.



Рис. 6. Участок Павловский. Крупный циркуммент с выраженным светло-коричневым внешним контуром.
[Fig. 6. Pavlovsky site. A large circument with a distinct light brown outer contour.]



Рис. 7. Участок Рамонский. Наличие в поперечном профиле по внешнему контуру вала высотой до 3–4 м при ширине 200–250 м.
[Fig. 7. Ramonsky site. Presence of a rampart in the transverse profile along the outer contour, up to 3–4 m high and 200–250 m wide.]

Заключение

Воронежская антеклиза обладает комплексом структурных, литологических и тектонических предпосылок для миграции и аккумуляции природного водорода. Значительная часть этой структуры расположена в пределах Воронежской области, что делает её приоритетным объектом для дальнейших исследований и потенциальной разведки. К таким предпосылкам относится: сводообразная структура раздела докембрийского фундамента и осадочного чехла (способствует миграции и накоплению водорода); наличие мафит-ультрамафитовых комплексов (показатель мантийной активности и потенциальные экранирующие структуры); литологические факторы (глины, сланцы, карбонатные породы, эвапориты – возможные экраны для газа).

Перспективными на природный водород в Воронежской области являются образования кристаллического фундамента: мамонский и сланский комплексы в пределах Хоперского блока; поля новогольского комплекса (лополитоподобные тела, возможны структурные ловушки); Лосевская шовная зона.

Для оценки газотранспортных системы региона построена Карта-схема потенциальных структур-ловушек водорода в осадочном чехле масштаба (1:500 000). Таковыми системами являются: граница раздела кристаллического основания и осадочного чехла; разрывные структуры глубинного заложения; авлакогены рифейского и девонского возраста.

В ходе исследования осуществлён комплексный анализ космических снимков (данных дистанционного зондирования Земли), с последующим сопоставлением полученных результатов с геолого-структурными и геоморфологическими данными в пределах выделенных участков. На основе проведённого анализа сформированы карты-схемы дешифрирования и составлена таблица дешифровочных признаков для перспективных участков. В процессе работы выявлены и систематизированы кольцевые структуры (циркумменты) – всего зафиксировано 818 объектов, которые были классифицированы и разделены на три группы. Для каждой из выделенных групп определены следующие характеристики: типовые морфологические признаки, включающие размеры, пространственное расположение и особенности рельефа; специфика растительного покрова; характерные фототоны на космических снимках в видимом и ближнем инфракрасном (ИК) диапазоне.

Полученные результаты визуализированы посредством карт-схем (и таблицы распределения циркумментов по исследуемым участкам). Представленные материалы обеспечивают возможность оперативной оценки пространственного размещения выявленных структур, а также анализа их типовых характеристик.

Приведенные исследования позволили, используя космические снимки, выполнить маркировку участков дегазации природного водорода на территории Воронежской области. Выделение перспективных участков для газового опробования позволило провести ранжирование территории по степени перспективности на

основе анализа геологических, геофизических и геохимических данных, а также используя построенные литолого-фациальные карты.

Конфликт интересов: Авторы декларируют 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*. 2020. № 4. С. 12–23.
2. Бессель В. В., Карасевич В. А., Жуков В. А. Перспективы добычи и применения природного водорода в России. Оценка мирового опыта // *«Neftegaz.RU»* № 7. 2025. С. 21–23.
3. 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. № 3. С. 7–25.
4. 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. № 3 (348). С. 7–28.
5. Шестопалов В. М. О геологическом водороде // *Геофизический журнал*. 2020. Т. 42. № 6. С. 3–32. DOI: <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v42i6.2020.222278>.
6. Ларин В. Н. Наша Земля (происхождение, состав, строение и развитие изначально гидридной Земли). М.: Агар, 2005. 248 с.
7. Coveney R. M. J., Goebel E. D., Zeller E. J., Dreschhoff G. A. M., Angino E. E. Serpentinization and the origin of hydrogen gas in Kansas // *AAPG Bulletin*. 1987. Vol. 71. No. 1. P. 39–48.
8. Freund F., Dickinson J. T., Cash M. Hydrogen in rocks: an energy source for deep microbial communities // *Astrobiology*. 2002. Vol. 2. No. 1. P. 83–92.
9. Huang, R. F., Sun W. D., Ding X., Liu J. Q., Zhan W. H. Formation of hydrogen gas and alkane during peridotite serpentinization // *Acta Petrologica Sinica*. 2015. Vol. 31. No. 7. P. 1901–1907.
10. Klein F., Grozeva N. G., Seewald J. S. Abiotic methane synthesis and serpentinization in olivine-hosted fluid inclusions // *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 2019. Vol. 116. P. 17666–17672. DOI: 10.1073/pnas.1907871116.
11. McCollom T. M., Seewald J. S. A reassessment of the potential for reduction of dissolved CO₂ to hydrocarbons during serpentinization of olivine // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 2001. Vol. 65. No. 21. P. 3769–3778.
12. McCollom T. M., Bach W. Thermodynamic constraints on hydrogen generation during serpentinization of ultramafic rocks // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 2009. Vol. 73. P. 856–875.
13. 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.
14. 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.
15. Руденко А. В. Кольцевые структуры водородной дегазации как проблема сельского хозяйства Европейской части России // *Геополитика и экогеодинамика регионов*. 2022. Т.

8. № 1. С. 176–186.

16. 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. Vol. 2. Art. No. 42. P. 1–15. DOI: 10.1186/s40645-015-0062-5.

17. Ильяш Д. В., Ильяш В. В. Циркументы как особый вид эколого-геологических систем // *Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология*. 2015. № 1. С. 132–139.

18. 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.

19. Савко А. Д., Мануковский С. В., Мизин А. И. Литология и фации донеогеновых отложений Воронежской антеклизы. Труды научно-исследовательского института геологии: Воронеж: Изд-во ВГУ. Вып. 3. 2001. 201 с.

20. Атлас литолого-палеогеографических карт Русской платформы и ее геосинклинального обрамления. Гл. ред. А. П. Виноградов. М., 1961. 1 атл.

21. Савко А. Д. Геология Воронежской антеклизы. Труды научно-исследовательского института геологии Воронежского государственного университета. Воронеж: Изд-во ВГУ. Вып. 12. 2002. 165 с.

GENERAL AND REGIONAL GEOLOGY

UDC: 552.51:551.763.12(470.324)

ISSN 1609-0691

DOI: <https://doi.org/10.17308/geology/1609-0691/2026/1/4-17>

Received: 09.02.2026

Accepted: 19.02.2026

Published online: 31.03.2026

Developing a Prospecting Methodology for Natural Hydrogen in the Voronezh Region. Part 1: Theoretical Foundations

©2026 A. V. Krainov¹✉, V. M. Nenakhov¹, A. Ya. Tret'yak²,
N. A. Korabelnikov¹, S. V. Manukovsky¹, A. A. Valyalshchikov¹,
O. V. Zhavoronkin¹, Yu. A. Ustimenko¹, Ye. V. Sidorova², A. A. Chumakov²

¹*Voronezh State University, Universitetskaya pl., 1, 394018, Voronezh, Russian Federation*

²*South-Russian State Polytechnical University (NPI) named after M.I. Platov, Prosveshcheniya St., 132, 346428, Novochoerkassk, Russian Federation*

Abstract

Introduction: the growing interest in natural ("gold") hydrogen as a promising energy source is supported by its institutional recognition: in 2021, Australia became the first country to include it in its list of minerals, and since 2023, it has been added to the Russian Classification of Minerals. A key confirmation of the resource's potential is the commercial extraction of hydrogen in Mali. Scientists identify several hypotheses for the origin of hydrogen in the Earth's crust: deep-seated degassing, serpentinization, water radiolysis, biogenic decomposition of organic matter, and others. Its accumulations are associated with ophiolite belts, fault zones, and iron-rich Precambrian strata, while the preservation of deposits depends on the integrity of cap rocks that prevent its degassing. Ring structures – circumvents, clearly visible in satellite images – are considered a promising exploration indicator. They may indicate gas transport systems or deep traps and mark areas of hydrogen degassing. However, their direct link to hydrogen degassing requires further study.

Methodology Development: for the first time in Russia, the authors have proposed a methodology for conducting hydrogen exploration works. During the exploration for natural hydrogen, a combination of desk-based, field, and laboratory research methods was applied, ensuring a multi-stage assessment of the hydrogen degassing potential in the study area. Desk-based studies served as the basis for regional



The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

✉ Aleksey V. Krainov, e-mail: aleksey_vsu_geo@mail.ru

forecasting and localization of promising areas. This phase included the compilation of specialized maps of potential hydrogen sources in Precambrian formations, based on the analysis of geological maps, deep structure data, mineralogical-petrographic characteristics of rocks, and existing geodynamic models of hydrogen generation (serpentinization, deep degassing, radiolysis, etc.). Mapping of potential hydrogen trap structures in the sedimentary cover involved identifying lithological seals capable of accumulating hydrogen fluids. The identification of promising and priority areas for gas sampling allowed for the ranking of territories by prospectivity based on a comprehensive analysis of geological, geophysical, and geochemical data. Interpretation of Earth remote sensing (ERS) data within the identified areas made it possible to delineate ring structures (circumvents), which may mark zones of deep hydrogen degassing. Field studies provided direct verification of predictive models and the acquisition of factual data on the presence of hydrogen emanations. Laboratory studies enabled the determination of concentrations of helium dissolved in water, which serves as a reliable indicator of deep degassing, and its anomalous concentrations correlate with zones of hydrogen emission.

Conclusions: the integrated application of the listed methods has made it possible to form a substantiated predictive exploration model and to localize promising areas for further study.

Keywords: hydrogen, circumvent, crystalline basement, helium, methane.

For citation: Krainov A. V., Nenakhov V. M., Tret'yak A. Ya., Korabelnikov N. A., Manukovsky S. V., Valyalshchikov A. A., Zhavoronkin O. V., Ustimenko Yu. A., Sidorova Ye. V., Chumakov A. A. Developing a Prospecting Methodology for Natural Hydrogen in the Voronezh Region. Part I: Theoretical Foundations // *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Geologiya – Proceedings of Voronezh State University. Series: Geology*, 2026, no. 1, pp. 4–17. DOI: <https://doi.org/10.17308/geology/1609-0691/2026/1/4-17>.

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

REFERENCES

1. Glazev S. Yu., Polevanov V. P. Poiski mestorozhdeniy prirodnoy vodoroda v Rossii, kak osnova vstraivaniya v novyy tekhnologicheskyy uklad [Exploration for natural hydrogen deposits in Russia as a basis for integrating into the new technological paradigm]. *Nedropolzovanie XXI vek – Subsurface Management XXI Century*, 2020, no. 4, pp. 12–23 (In Russ.)
2. Bessel V. V., Karasevich V. A., Zhukov V. A. Perspektivy dobychi i primeneniya prirodnoy vodoroda v Rossii. Otsenka mirovogo opyta [Prospects for the extraction and use of natural hydrogen in Russia. Assessment of world experience]. *Neftegaz.RU*, 2025, no. 7, pp. 21–23 (In Russ.)
3. Shestopalov V. M., Makarenko A. N. O nekotorykh rezultatakh issledovaniy, razvivayushchikh ideyu V. I. Vernadskogo o "gazovom dykhanii Zemli". Statya 1. Poverkhnostnye i pripoverkhnostnye proyavleniya anomalnoy degazatsii [On some research results developing V. I. Vernadsky's idea of the "gas breath of the Earth". Article 1. Surface and near-surface manifestations of anomalous degassing]. *Geologicheskyy zhurnal – Geological Journal*, 2013, no. 3, pp. 7–25 (In Russ.)
4. Shestopalov V. M., Makarenko A. N. O nekotorykh rezultatakh issledovaniy, razvivayushchikh ideyu V. I. Vernadskogo o "gazovom dykhanii Zemli". Statya 2. Glubinnye protsessy degazatsii nedr [On some research results developing V. I. Vernadsky's idea of the "gas breath of the Earth". Article 2. Deep processes of degassing of the Earth's interior]. *Geologicheskyy zhurnal – Geological Journal*, 2014, no. 3 (348), pp. 7–28 (In Russ.)
5. Shestopalov V. M. O geologicheskoy vodorode [On geological hydrogen]. *Geofizicheskyy zhurnal – Geophysical Journal*, 2020, vol. 42, no. 6, pp. 3–32 (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v42i6.2020.222278>.
6. Larin V. N. *Nasha Zemlya (proiskhozhdenie, sostav, stroenie i razvitiye iznachalno gidridnoy Zemli)* [Our Earth (origin, composition, structure and development of the initially hydride Earth)]. Moscow, Agar publ., 2005. 248 p. (In Russ.)
7. Coveney R. M. J., Goebel E. D., Zeller E. J., Dreschhoff G. A. M., Angino E. E. Serpentinization and the origin of hydrogen gas in Kansas. *AAPG Bulletin*, 1987, vol. 71, no. 1, pp. 39–48.
8. Freund F., Dickinson J. T., Cash M. Hydrogen in rocks: an energy source for deep microbial communities. *Astrobiology*, 2002, vol. 2, no. 1, pp. 83–92.
9. Huang, R. F., Sun W. D., Ding X., Liu J. Q., Zhan W. H. Formation of hydrogen gas and alkane during peridotite serpentinization. *Acta Petrologica Sinica*, 2015, vol. 31, no. 7, pp. 1901–1907.
10. Klein F., Grozeva N. G., Seewald J. S. Abiotic methane synthesis and serpentinization in olivine-hosted fluid inclusions. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2019, vol. 116, pp. 17666–17672. DOI: 10.1073/pnas.1907871116.
11. McCollom T. M., Seewald J. S. A reassessment of the potential for reduction of dissolved CO₂ to hydrocarbons during serpentinization of olivine. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2001, vol. 65, no. 21, pp. 3769–3778.
12. McCollom T. M., Bach W. Thermodynamic constraints on hydrogen generation during serpentinization of ultramafic rocks. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2009, vol. 73, pp. 856–875.
13. Nenakhov V. M., Strik Yu. N., Tregub A. I., Kholin V. M., Shabalin M. I. *Mineralogicheskie issledovaniya territoriy s dvukhyarusnym stroeniem (na primere Voronezhskogo kristallicheskogo massiva)* [Mineralogical studies of territories with twofold structure (on the example of the Voronezh Crystalline Massif)]. Moscow, GEOKART–GEOS publ., 2007. 284 p. (In Russ.)
14. Nenakhov V. M., Polevanov V. P., Zhabin A. V., Bondarenko S. V., Zolotareva G. S. Perspektivy Voronezhskoy anteklizy na obnaruzhenie prirodnoy vodoroda [Prospects of the Voronezh Antecline for the discovery of natural hydrogen]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Geologiya – Proceedings of Voronezh State University. Series: Geology*, 2022, no. 2, pp. 4–18 (In Russ.)
15. Rudenko A. V. Koltsevye struktury vodorodnoy degazatsii kak problema selskogo khozyaystva Evropeyskoy chasti Rossii

[Ring structures of hydrogen degassing as a problem of agriculture in the European part of Russia]. *Geopolitika i ekogeodinamika regionov – Geopolitics and Ecogeodynamics of Regions*, 2022, vol. 8, no. 1, pp. 176–186 (In Russ.)

16. 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, vol. 2, art. no. 42, pp. 1–15. DOI: 10.1186/s40645-015-0062-5.

17. Ilyash D. V., Ilyash V. V. Tsirkumyenty kak osobyy vid ekologo-geologicheskikh sistem [Circumments as a special type of ecological-geological systems]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Ser. Geologiya – Proceedings of Voronezh State University. Series: Geology*, 2015, no. 1, pp. 132–139 (In Russ.)

18. Kosinova I. I., Ilyash V.V., Ilyash D.V. Litologicheskii faktor, kak odna iz prichin neravnomernosti razvitiya tsirkummentov na territorii Voronezhskoy anteklizy [Lithological factor as one of the reasons for the uneven development of

circumments 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.)

19. Savko A. D., Manukovskiy S. V., Mizin A. I. Litologiya i fatsii donegenovykh otlozheniy Voronezhskoy anteklizy [Lithology and facies of pre-Neogene deposits of the Voronezh Antecline]. *Trudy nauchno-issledovatel'skogo instituta geologii Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta* [Proceedings of the Research Institute of Geology of Voronezh State University]. Voronezh, VSU publ., i. 3, 2001, 201 p. (In Russ.)

20. *Atlas litologo-paleogeograficheskikh kart Russkoy platformy i ee geosinklinalnogo obramleniya* [Atlas of lithological-paleogeographic maps of the Russian Platform and its geosynclinal framing]. Ed. A. P. Vinogradov. Moscow publ., 1961, 1 atlas. (In Russ.)

21. Savko A. D. Geologiya Voronezhskoy anteklizy [Geology of the Voronezh Antecline]. *Trudy nauchno-issledovatel'skogo instituta geologii Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta* [Proceedings of the Research Institute of Geology of Voronezh State University]. Voronezh, VSU publ., i. 12, 2002, 165 p. (In Russ.)

Крайнов Алексей Владимирович, д.г.-м.н., профессор, Воронежский государственный университет, Воронеж, Российская Федерация; e-mail: aleksey_vsu_geo@mail.ru; ORCID: <https://doi.org/0000-0003-0038-0990>.

Ненахов Виктор Миронович, д.г.-м.н., профессор, декан геологического факультета Воронежского государственного университета, Российская Федерация; e-mail: viktor.nenahov@mail.ru; ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-1439-0970>.

Третьяк Александр Александрович, д.т.н., профессор, Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова, Новочеркасск, Российская Федерация; e-mail: aleksandrbrngs@mail.ru; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7510-1979>.

Коробельников Николай Анатольевич, директор ООО «Акма-Универсал»; ст. преподаватель, Воронежский государственный университет, Российская Федерация, Воронеж; e-mail: korabel_na@mail.ru; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2289-0230>.

Валяльщикова Алексей Александрович, к.т.н., доцент, Воронежский государственный университет, Российская Федерация, Воронеж; e-mail: 770vaa@mail.ru; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3787-4655>

Жаворонкин Олег Валерьевич, к.г.-м.н., доцент, Воронежский государственный университет, Российская Федерация, Воронеж; e-mail: zhavoronkinov@mail.ru; ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-2556-0194>

Устименко Юрий Алексеевич, зам. директора НИИ Геологии ВГУ, ст. преподаватель; Воронежский государственный университет, Российская Федерация, Воронеж; e-mail: ustimenko_y@mail.ru; ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-5790-7311>

Сидорова Елена Владимировна, к.т.н., доцент, Южно-Российский государственный политехнический университет имени М. И. Платова, Новочеркасск, Российская Федерация; e-mail: sidorova_ev@npi-tu.ru; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8898-0909>

Чумаков Андрей Алексеевич, к.т.н., доцент, Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова, Новочеркасск, Российская Федерация; e-mail: a-chumakov@mail.ru; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6855-0223>

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Aleksey V. Kraynov, Dr. habil. in Geol.-Min., Professor, Voronezh State University, Voronezh, Russian Federation; e-mail: aleksey_vsu_geo@mail.ru; ORCID: <https://doi.org/0000-0003-0038-0990>.

Viktor M. Nenahov, Dr. habil. in Geol.-Min., Professor, Dean of the Geological Faculty of Voronezh State University, Russian Federation; e-mail: viktor.nenahov@mail.ru; ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-1439-0970>.

Alexander A. Tretyak, Dr. of Technical Sciences, Professor, South-Russian State Polytechnical University (NPI) named after M.I. Platov, Novocherkassk, Russian Federation; e-mail: aleksandrbrngs@mail.ru; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7510-1979>.

Nikolay A. Korabelnikov, Director of Akma-Universal LLC; Senior Lecturer, Voronezh State University, Russian Federation, Voronezh, e-mail: korabel_na@mail.ru; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2289-0230>.

Aleksey A. Valyalshchikov, PhD in Geographical Sciences, Associate Professor, Voronezh State University, Russian Federation, Voronezh, e-mail: 770vaa@mail.ru; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3787-4655>

Oleg V. Zhavoronkin, PhD in in Geol.-Min., Associate Professor, Voronezh State University, Russian Federation, Voronezh; e-mail: zhavoronkinov@mail.ru; ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-2556-0194>

Yuri A. Ustimenko, Deputy Director of the Voronezh State University Research Institute of Geology, Senior Lecturer, Voronezh State University, Russian Federation, Voronezh; e-mail: ustimenko_y@mail.ru; ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-5790-7311>

Elena V. Sidorova, PhD, Associate Professor, South-Russian State Polytechnical University named after M.I. Platov, Novocherkassk, Russian Federation; e-mail: sidorova_ev@npi-tu.ru; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8898-0909>

Andrey A. Chumakov, PhD, Associate Professor, South-Russian State Polytechnical University (NPI) named after M.I. Platov, Novocherkassk, Russian Federation; e-mail: a-chumakov@mail.ru; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6855-0223>

All authors have read and approved the final manuscript.