

А. Я. Гаев, Ю. А. Килин, И. И. Минькевич

О ГИДРОГЕОЛОГИИ КАРСТОСФЕРЫ НА ПРИМЕРЕ УРАЛА И ПРИУРАЛЬЯ

Рассмотрены гидрогеологические параметры карстосферы; отмечается ее нестабильный режим в зонах транзита. Глубокие зоны карстовых вод с их областями питания более стабильны, и в областях разгрузки они проявляются как слабо термальные. При сульфатном карсте формируются воды сульфатно-кальциевого состава с минерализацией $\geq 3,5$ г/л. В местах развития более молодых осадков формируются воды сульфатно-натриевого подтипа и содового типа с минерализацией $0,3 \div 0,5$ г/л. При изучении карста гидрохимический метод оказался весьма эффективным.



This article considers the hydrogeological parameters of the karstosphere and emphasises its unstable regime in the transit areas. Deep karst water zones and their catchment areas are more stable, in discharge areas they are characterised as weakly thermal. The sulphate karst is the site of formation of sulphate-calcium water with mineralisation of ≥ 3.5 g/l. Sulphate-sodium and soda subtype water with mineralisation of $0.3\div 0.5$ g/l forms in the areas of development of younger sediments. The hydrochemical method proved to be very efficient when studying karst.

Ключевые слова: трещинно-карстовые воды; карстовые явления и процессы; карстосфера.

Key words: fissure karst water; karst phenomena and processes; karstosphere.

67

Введение

Исследуемые регионы на схемах гидрогеологического районирования страны относятся к Уральской гидрогеологической складчатой области и Восточно-Русскому артезианскому бассейну — соответственно с трещинно-жильным и пластовым типами карстовых вод [8]. Растворимые породы представлены известняками, доломитами, мергелями, гипсами, ангидритами и солями, которые занимают сегодня на исследуемой территории ≥ 40 % площади. В них формируются поверхностные, подземные и глубинные карстовые формы, имеющие большое практическое значение. Учитывая это, Л.И. Маруашвили было предложено выделить карстосферу как оболочку планеты, состоящую из карстующихся пород [10]. Среди них карбонаты составляют по массе 1,7 % от веса земной коры.

Карст активизируется там, где растворимые породы выходят на поверхность и нарушены тектоническими разломами, что сопровождается формированием зон сосредоточения подземных вод с крупными родниками [2]. В зависимости от состава растворимых пород различают карбонатный, сульфатный и галоидный типы карста. Питательные воды связаны с карбонатными породами, а в сульфатных и галоидных породах формируются некондиционные по химическому составу воды. Для выделения зон с такими водами выполняется гидрогеологическое районирование территории. По Г.А. Максимовичу, здесь выделены Уральская и Восточно-Европейская карстовые страны с карстовыми провинциями и областями [9]. В Башкортостане выделено 5 карстовых провинций, 12 областей и 17 карстовых районов [1]. В Урало-Бельской провинции закарстована галоидно-сульфатная толща кунгурского яруса. Карст в регионе развит также в отложениях известняков и пясчистого мела, в Прикаспийской карстовой провинции — в соляных куполах, а в Южно-Уральской — в сульфатных породах кунгурского яруса. Гипсы совместно с терригенными породами обнажаются на земной поверхности в крыльях антиклинальных и синклинальных складок. В складках Урала карст развит и в органогенных известняках карбона и сакмарского яруса нижней перми в краевых зонах Центрально-Уральского поднятия.



О гидрогеологии Уральской складчатой области

Породы карбонатного состава имеют возраст от докембрийского до пермского. Толща докембрийско-ордовикских пород метаморфизована и образует единый водоносный комплекс с пресными, гидрокарбонатно-кальциевыми водами. Примерами служат источник Меленки у д. Усть-Улс по Вишере с дебитом 953 л/с и родник с дебитом 118 л/с по р. М. Бердяуш. Силурийские и девонские карбонаты образуют водоносный комплекс как на Западном, так и на Восточном склонах Урала с дебитами родников до 200 л/с. Они исключительно осложняют разработку североуральских бокситов. По составу эти источники — пресные гидрокарбонатно-кальциевые, но встречаются и хлоридно-натриевые минеральные (Нижние Серьги).

68

Известняки каменноугольного возраста вместе с песчаниками, глинистыми сланцами, эффузивами и туфами образуют водоносный комплекс в ряде бассейнов карстовых вод. Модуль стока из визейских известняков на Западном склоне Урала составляет 10 л/с · км² [2; 3], а в Североуральском районе — 3,5÷4 л/с км², уменьшаясь до 0,3 в Восточно-Уральском прогибе. Пермские известняки в ядрах синклиналий складок западного склона Урала закарстованы и обводнены. В *Восточно-Уральской карстовой провинции* выделена и охарактеризована Алапаевско-Каменская карстовая область с четырьмя районами [4]. В *Тагил-Магнитогорской карстовой провинции* выделяется карстовая область Тагильского синклинория с карстовыми районами.

Карстовые проявления в Уральской складчатой области впервые описаны в работах И.П. Фалька, Б. Германа, Г. Розе, Р.И. Мурчисона, Ф.Ю. Гебауэра. Палеокарст охарактеризован Л.М. Миропольским (1934), а поверхностные и подземные формы — М.О. Клером, Б.М. Федоровым, В.А. Вахрамеевым, Н.И. Архангельским, Б.П. Кротовым, М.А. Карасиком, А.С. Белицким [5; 6; 9]. Г.А. Максимович описал на восточном склоне Урала межгорные бассейны пресных трещинно-карстовых вод, приуроченные к синклинальным структурам. В области развития известняков от силура до карбона исследованы современные и древние формы карста, выявлены карстовые лога и исчезающие речки, карстовые формы в горных выработках по добыче полезных ископаемых. Известняки нередко залегают здесь среди вулканогенно-осадочных пород, но гидродинамическая связь с ними ослаблена, и интенсивные откачки карстовых вод почти не влияют на уровеньный режим вод в вулканогенно-осадочной толще. Реки Тагил и Нейва имеют каньонообразные долины, вскрывающие карстующиеся породы со стоком к Западно-Сибирской низменности [3; 4]. Вдоль тектонических структур сформировались крупные карстовые депрессии с многочисленными карстовыми формами и водопроявлениями. Среди пород преобладают известняки визейского яруса мощностью 400÷1500 м, смятые в меридиональные изоклинальные складки [3].

С протерозойского до среднепалеозойского времени в геосинклинальном морском бассейне шло осадконакопление, кратковременно



прерывавшееся на локальных поднятиях, где имели место процессы выветривания и карст. На герцинском этапе орогенеза сформировались дислокации складчатых сооружений. После регрессии моря с конца среднего карбона до настоящего времени протекают экзогенные геодинамические процессы, включая карст. Особенно активно они происходили в нижнеюрскую, ниже- и верхнемеловую эпохи на поднятиях, где были уничтожены коры выветривания. Отложения триаса сохранились в депрессиях. В средне- и верхнеюрскую эпохи, в верхнемеловое и палеогеновое время сформировалась мощная латеритная кора выветривания, частично перекрытая морскими осадками [12]. С конца палеогена дно водоема стало сушей, и здесь начали унаследованно протекать карстово-суффозионные процессы [4; 8] и процессы корообразования [12].

Вертикальная гидродинамическая зональность карстовых массивов на Восточном склоне Урала сохраняет свои общие черты, и зона поверхностного движения вод сменяется по разрезу зонами: вертикальной циркуляции, переходной зоной, зоной постоянного горизонтального стока, сифонной, глубинной и поддолинной циркуляции [9]. Карстовым процессам благоприятствует выровненный рельеф местности. При таянии снега и в периоды дождей карстовые процессы интенсифицируются, особенно в гумидной зоне. Зоны сосредоточения подземных вод в карстующихся породах распространяются по трещинам и карстовым пустотам в местах разрывных дислокаций, вдоль контактов с некарстующимися породами, в долинах рек, в оврагах и балках.

При неотектонических поднятиях территории породы выходят на поверхность земли, и в них интенсивно проявляется так называемый голый тип карста. При тектоническом прогибании территории карстовые процессы затухают. Повторные поднятия территории вновь оживляют карстово-суффозионные процессы, и сохранившиеся коры выветривания вновь начинают размываться. На исследуемой территории в раннем палеозое, среднем мезозое и в неогене существовал влажный тропический и субтропический климат, который благоприятствовал развитию карстово-суффозионных процессов. В пермский период и нижнетриасовую эпоху климат сменился на сухой, что затормозило эти процессы. Во время интенсивного развития карстово-суффозионных процессов на исследуемой территории мощность покровных отложений была небольшой, и карст активно протекал на влажных пониженных территориях, захватывая весьма различные глубины. Так, родник у д. Кодинка в районе г. Каменск-Уральский имеет температуру воды 18 °С, а родник Кургазак вблизи Башкирского Кара-Тау – 22 °С при дебите в 120 л/с.

Классические формы карста характерны для районов Уфимского плато. Оно расположено в краевой зоне платформы, где карстующиеся породы приурочены к областям питания артезианских бассейнов. Эти области делятся на внешние и внутренние. Например, западный склон Урала является внешней областью питания Волго-Камского артезиан-



ского бассейна, возвышенности Уфимского плато – внутренними областями питания водоносных комплексов карстующихся пород. Там, где карстующимися породами сложены возвышенные участки, происходит инфильтрация и инфлюация вод и атмосферных осадков, а также перелив подземных вод из контактирующих с карстующимися породами отложений. Эти участки относят к областям поглощения или перелива и делят на внешние и внутренние. Так, к внутренним зонам принадлежат участки развития сульфатного карста Уфимского плато у с. Усть-Кишерть и оз. Дикое. Их сульфатные воды разгружаются в карбонатные коллекторы.

70

Противокарстовые мероприятия разрабатываются и внедряются с целью защиты существующих и строящихся сооружений и коммуникаций. Известняки, доломиты, мергели, гипсы, ангидриты и соли занимают в регионе более 200 тыс. км², и их карстовые формы (поверхностные и подземные) на огромных площадях создают большие трудности при строительстве и эксплуатации сооружений и коммуникаций. При этом на 2÷3 порядка возрастает интенсивность суффозионно-карстовых процессов, вызывая аварии на железных и шоссейных дорогах, нефте- и продуктопроводах, мостовых переходах, шахтах, карьерах и разнообразных сооружениях. Исключительно большой ущерб несут продуктопроводы, железные дороги и другие коммуникации. Так, в Пермском крае трансконтинентальные газопроводы имеют протяженность порядка 12 тыс. км, и на них периодически происходят аварии, обусловленные суффозионно-карстовыми процессами в районах, сложенных сульфатными породами, особенно часто в Кунгурском, Кишертском, Ординском и Октябрьском районах. Поэтому без карстологических исследований этих районов невозможно перейти на модель устойчивого развития и обеспечить безопасность существующих и строящихся сооружений и коммуникаций [7; 11].

В этих районах нами систематически более четверти века выполняются полевые гидрогеологические и карстологические исследования с применением наземных и дистанционных методов. В частности, на шести участках осуществлены режимные карстологические наблюдения и совместно со специализированной фирмой Газпрома организована система технического мониторинга с применением тензометрии и дефektоскопии труб трансконтинентальных газопроводов. Установлено, что гидрогеологические методы в комплексе с геолого-геофизическими, дистанционными и тензометрией обеспечивают оперативное выявление зон интенсивного современного карста [7; 11]. По интенсивности проявления суффозионно-карстовые процессы существенно отличаются в разных вертикальных гидродинамических зонах [3; 7; 11]. Расчеты показали, что интенсивность подземной химической денудации в зоне сезонных и многолетних колебаний (переходной зоне, по Г.А. Максимовичу) в 3÷3,5 раза выше, чем в соседних гидродинамических зонах. Это означает, что и объемы карстовых пустот в этой зоне во столько же раз больше. Именно в данной гидродинамической зоне формируется основной объем гротов карстовых пещер. В связи с



неотектоническими движениями земной коры пещеры развиваются унаследованно по этажам, а поскольку ниже по разрезу от переходной зоны воды насыщаются сульфатами кальция, то агрессивность их по отношению к вмещающим породам снижается [14]. Техногенная денудация гипсов и ангидритов оценена здесь в 582,5 мк в год [9]. Это почти на порядок выше, чем в среднем для региона и находится в прямой зависимости от знака и интенсивности неотектонических движений. Неотектоническое опускание территории стимулирует аккумуляцию материала типа террасоса и заполнение им полостей. При неотектонических поднятиях карстовые полости растут вверх по разрезу в соответствии со скоростью перемещения вверх переходной гидродинамической зоны и нередко соединяются через поноры и провальные воронки с поверхностью земли. При этом в массиве карстующихся пород одновременно протекают два противоположных процесса – формирование и старение карстовых полостей с заполнением их материалом типа террасоса.

Характерная модель формирования карстовых процессов показана на рисунке.

Наиболее значительные карстовые формы (депрессии, котловины, суходолы, речные долины) сформировались вдоль тектонически ослабленных зон. При длительном унаследованном их развитии образуются мульды оседания, представляющие опасность для пересекающих их трансконтинентальных газопроводов. В бортах долин рек выявлены трещины бортового отпора шириной до 2 м и глубиной ≥ 3 м. Карстовые воронки образуют сначала цепочки вдоль тектонических нарушений, а затем формируют слепые эрозионно-карстовые лога с глубокими карстовыми провалами, например на трассе трансконтинентального газопровода «Ямбург – Тула 1» в Добрянском районе Пермской области на 1629-м км. Глубина провала составила 23,0 м, а первоначальный диаметр – 8,0 м с вертикальными стенками. По форме провал похож на бутылку. За первый месяц с момента образования диаметр провала на поверхности увеличился с 8 до 25,0 м, но глубина уменьшилась с 23 до 15,0 м. На примере трансконтинентальных газопроводов, пересекающих массивы карстующихся пород, установлено, что для них и других коммуникаций основную опасность представляют оседания и растяжения земной коры на участках крупных карстовых депрессий. При техногенезе скорость суффозионно-карстовых процессов растет за счет увеличения скорости движения вод в зонах их сосредоточения.

Технический мониторинг впервые начал функционировать на отдельных участках трансконтинентального газопровода Ужгородского коридора вблизи с. Красный Ясыл в 1995 г. Предварительно авторами в районе были проведены карстологические исследования с применением наземных и дистанционных методов. В результате под газопроводом была выявлена карстовая полость длиной до 35 м и глубиной до 19 м. Транспорт газа по газопроводу был остановлен, и над карстовой полостью в трубе обнаружены зоны с растрескивания, через которые были установлены и своевременно предотвращены утечки газа.

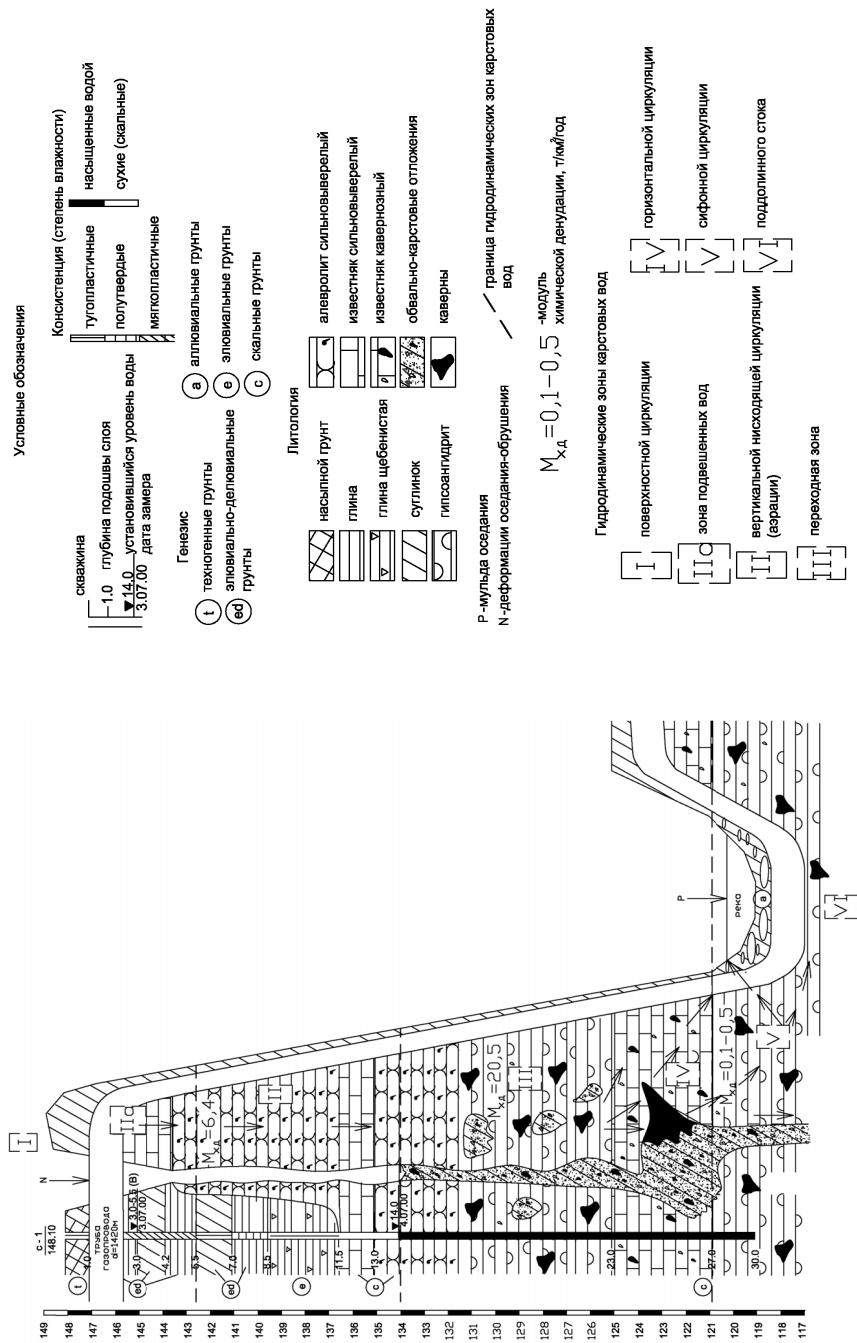


Рис. Модель формирования карстовых процессов в зонах сосредоточения поверхностного и подземного стока



Гидрогеологические и карстологические исследования «Пермгипропроводхоза» и Института карстоведения и спелеологии оказались весьма эффективными и позволили разработать методику системы карстолитомониторинга, обеспечившую предотвращение ряда крупных аварий начиная с 1995 г. С 1996 г. в соответствии с нашей методикой НПП «Диарес» совместно с МВТУ им. Н. Баумана (Москва) начали систематически выполнять замеры напряженного состояния труб на участках, где специалистами «Пермгипропроводхоза» и Института карстоведения и спелеологии были выявлены карстоопасные участки.

В системе «Астрон» использован спектрально-акустический метод. Измерения напряжения на трубах трансконтинентальных газопроводов проведены на шести участках. Необходимо отметить, что анализируемый период времени (с 1996 г.) был в многолетнем плане относительно маловодным, что определило невысокий уровень интенсивности карстовых процессов по сравнению с многоводными периодами. Поэтому сделаны следующие выводы.

1. Результаты наблюдений в системе технического мониторинга по напряжениям труб трансконтинентальных газопроводов в период с 1996 г. следует рассматривать в качестве предварительных, отражающих только основные тенденции, которые проявятся в полной мере в многоводные периоды. Результаты применения дистанционных методов однозначно свидетельствуют о том, что после снеготаяния и обильных паводков карстовые формы формируются более интенсивно, формируя глубокие провальные воронки и котловины.

2. Изменения напряженного состояния труб носят сезонный характер и совпадают с периодичностью гидролого-гидрогеологического режима в околотрубном пространстве. Периодические изменения режима параметров в массиве вмещающих трубу горных пород ведут к соответствующим изменениям напряженности газовой трубы. То есть для системы труба — массив горных пород большое значение приобретают сезонные процессы промерзания и оттаивания грунтов, их набухание и разжижение вокруг трубы, эффект термолифта и процессы конденсации влаги в связи с повышенной температурой газа (от +20 до +70 °С).

3. Напряжения в трубах нарастают ранней весной на 2,5—5,7 кгс/мм² с последующей стабилизацией. Это происходит в связи с активизацией инфильтрации и суффозионно-карстовых процессов в гидродинамической зоне сезонных и многолетних колебаний уровня трещинно-карстовых вод.

4. Установлен рост напряжений на трансконтинентальных газопроводах на участках пересечения ими крупных подземных карстовых полостей. Рост в среднем составил 2÷4 кгс/мм² в год, что свидетельствует о колебательном и поступательном развитии процесса. Напряжения на трубах возрастают неодинаково в разных плоскостях, что отражает отличия характера напряжений во вмещающих породах. На участках суходолов зафиксированы мульды оседания и оседания-обрушения. С ними связаны растягивающие напряжения, проявляю-



щиеся по верху трубы. Значения напряжений растяжения составляют в среднем 14 кгс/мм², варьируя от 1 кгс/мм² до критического уровня в 45 кгс/мм², когда металл начинает течь. В нижней части трубы проявляются сжимающие напряжения, составляющие в среднем 11 кгс/мм² и варьирующие от 1 до 32 кгс/мм². Предельный уровень напряжений на трубе составляет 42,7 кгс/мм² [13]. При максимальном рабочем значении напряжений металла труб меньше 50 % указанных допустимых значений напряжений состояние газопроводов следует считать работоспособным.

Заключение

74

1. Широкое распространение карстующихся пород, приподнятый, расчлененный рельеф и гумидный климат благоприятствуют развитию классических форм карста в исследуемых регионах. Карст интенсивно развивается в зонах сосредоточения трещинно-карстовых вод, приуроченных к тектоническим нарушениям и к зонам сочленения тектонических структур.

2. Обоснована высокая эффективность гидрогеологических методов при исследовании карста и создании системы карстолитомониторинга. Карстовые депрессии формируются в зонах сосредоточения трещинно-карстовых вод. Карст проявляется интенсивнее в 3÷5 раз в переходной гидродинамической зоне, а при техногенезе его интенсивность растет еще на 2÷3 порядка. Примером влияния этих факторов служит территория г. Кунгура и его окрестностей, где за последние годы выявлено более 550 провалов.

3. Разработаны рекомендации и проекты по переводу трансконтинентальных газопроводов на модель устойчивой безаварийной работы.

Список литературы

1. Абдрахманов Р.Ф., Мартин В.И., Попов В.Г. и др. Карст Башкортостана. Уфа, 2002.
2. Буданов Н.Д. Гидрогеология Урала. М., 1964.
3. Гаев А.Я. Гидрогеохимия Урала и вопросы охраны подземных вод. Свердловск, 1989.
4. Гевирц М.И. Карст восточного склона Урала : автореф. дис. ... канд. геол.-минерал. наук. Пермь, 1961.
5. Горбунова К.А., Андрейчук В.Н., Костарев В.П. и др. Карст и пещеры Пермской области. Пермь, 1992.
6. Катаев В.Н. Теория и методология структурно-тектонического анализа в карстоведении : автореф. дис. ... д-ра геол.-минерал. наук. Пермь, 1999.
7. Килин Ю.А. Оценка гидрогеологических условий при освоении закарстованных территорий на примере северной части Уфимского плато : автореф. дис. ... канд. геол.-минерал. наук. Пермь, 2003.
8. Кирюхин В.А., Толстихин Н.И. Региональная гидрогеология : учебник для вузов. М., 1987.
9. Максимович Г.А. Основы карстоведения. Пермь, 1963. Т. 1; 1969. Т. 2.
10. Маруашвили Л.И. Карстосфера, ее размеры и отношения к другим геосферам // Сообщ. АН Грузинской ССР. 1970. Т. 57, № 2.



11. Минькевич И.И. Гидрогеологические особенности районов развития сульфатных карстующихся пород Пермского Прикамья : автореф. дис. ... канд. геол.-минерал. наук. Пермь, 2003.
12. Сигов В.А. Кайнозойский тектогенез Урала : автореф. дис. ... канд. геол.-минерал. наук. Свердловск, 1975.
13. СНиП 2.05.06.85 «Магистральные трубопроводы». М., 1985.
14. Шимановский Л.А., Шимановская И.А., Сычкина Г.А. Восточная окраина Восточно-Русского артезианского бассейна // Гидрогеология СССР. М., 1972. Т. 14: Урал. С. 77 – 109.

Об авторах

Аркадий Яковлевич Гаев – д-р геол.-минерал. наук, проф., Институт карстования и спелеологии РГО, Пермский государственный национальный исследовательский университет.

E-mail: gayev@mail.ru

Юрий Афанасьевич Килин – ст. преп., Институт карстования и спелеологии РГО, Пермский государственный национальный исследовательский университет.

E-mail: gayev@mail.ru

Ирина Игоревна Минькевич – канд. геол.-минерал. наук, доц., Институт карстования и спелеологии РГО, Пермский государственный национальный исследовательский университет.

E-mail: gayev@mail.ru

About authors

Prof. Arkady Gaev, Institute of Karst Studies and Speleology, Perm State National Research University.

E-mail: gayev@mail.ru

Yuri Kilin, Assistant Professor, Institute of Karst Studies and Speleology, Perm State National Research University.

E-mail: gayev@mail.ru

Dr Irina Minkevich, Associate Professor, Institute of Karst Studies and Speleology, Perm State National Research University.

E-mail: gayev@mail.ru