УДК 551.4.042: 551.435.84

К вопросу об эволюции зон деформации в условиях платформы на примере Кунгурской Ледяной пещеры (Предуралье)

Н.В.ЛАВРОВА

Горный институт Уральского отделения РАН, Пермь, Россия

Наблюдения в горных выработках и пещерах позволяют выявлять особенности строения и развития разрывных структур в приповерхностных условиях на различных этапах геологической истории территорий. На основе существующей модели формирования карстовой системы Кунгурской Ледяной пещеры рассмотрены преобразования зон деформаций, возникших в толще переслаивающихся сульфатных и карбонатных пород в условиях платформы. Морфологические особенности вертикальных структур – органичных труб, развитых в пределах одной из пачек, сложенной гипсами и ангидритами, определяются этапами эволюции дизъюнктивных нарушений, пронизывающих всю толщу пород, слагающих массив Ледяной горы. Сосредоточенная инфильтрация поверхностных вод, формирование единого канала, в сводах которого со временем происходят разуплотнение пород и обвалы из перекрывающих отложений, в настоящее время считаются инициаторами формирования труб. В дальнейшем на поверхности образуется провал, увеличивающий количество поступающей воды в карстующийся массив. Однако размеры обломков в осыпях, несоизмеримые с устьями труб, округлые своды отдельных труб, фрагменты фидерных каналов, характерных для артезианских условий циркуляции подземных вод, отпрепарированные обломки пород из перекрывающих отложений, особенности строения стенок определяют первичность формирования труб по отношению к гротам и галереям пещеры. Пластические свойства гипсовых отложений и процессы их гидратации определяют вторичные изменения стенок труб вплоть до полного заполнения пустотного пространства с образованием вторичных целиков с последующим возобновлением формирования вертикальных каналов, значительно меньших в диаметре и образующихся уже под действием коррозии инфильтрационными водами.

Ключевые слова: карстовая система; органичные трубы; Кунгурская Ледяная пещера; подземный ландшафт; эволюция деформационных зон; пликативные и дизъюнктивные дислокации

Как цитировать эту статью: Лаврова Н.В. К вопросу об эволюции зон деформации в условиях платформы на примере Кунгурской Ледяной пещеры (Предуралье) // Записки Горного института. 2020. Т. 243. С. 279-284. DOI: 10.31897/PMI.2020.3.279

Введение. Разрывные нарушения на платформенных территориях являются местом локализации опасных геологических процессов, в том числе карстовых, которые развиваются в зонах повышенной трещиноватости с особым гидрогеологическим режимом. Особенности строения приповерхностных зон тектонических структур можно наблюдать в пещерах и горных выработках. Здесь, помимо геометрических элементов тектонических разрывов, геоморфологических характеристик, амплитуд смещения, можно наблюдать их временные преобразования.

В настоящее время для решения инженерно-геологических задач разработана методика выявления разрывных структур различной глубины заложения. Трассирование линеаментов с помощью геолого-геоморфологических методов без привлечения глубинных геофизических исследований позволяет проследивать приповерхностные зоны разрывных нарушений. Разрывные зоны можно рассматривать как объемное тело, различное по строению в разных своих частях. Ширина трещинных зон может достигать от нескольких десятков до 100 м, разрывных – до нескольких сотен метров [2, 17]. В растворимых горных породах в случае развития дизъюнктивных и пликативных нарушений при наличии движущейся воды, обладающей растворяющей способностью, формируются карстовые системы [6]. Доступные для человека пещеры, как и горные выработки, позволяют исследовать приповерхностные зоны трещиноватости внутри массивов.

Органичные трубы как элемент подземного ландшафта пещер, образовавшихся в карбонатных породах, описаны в работах многих исследователей карста. Гораздо меньше упоминаний о них при изучении полостей в сульфатных и карбонатно-сульфатных отложениях. Во второй половине прошлого столетия появляются описания вертикальных каналов для карстовых систем, образованных в гипогенных условиях [10, 21-25]. Их морфологические особенности и механизм образования позволили развить представление об эволюции деформационных зон на примере органичных труб в пределах Кунгурской Ледяной пещеры на различных этапах развития карстовой системы Ледяной горы в целом.

Геолого-структурные условия объекта изучения. Город Кунгур расположен на восточной окраине Восточно-Европейской платформы в северной части Уфимского вала Пермско-Башкирского свода в пределах Нижнесыльвинского района гипсового и карбонатно-гипсового карста. В восточной части его описан разрез классического кунгура мощностью 100-250 м, представленный чередующимися пачками гипсов или ангидритов и доломитов иренского горизонта кунгурского яруса, которые выдерживаются на значительных площадях. Мощность сульфатных пачек больше карбонатных в 4-5 раз. Гроты и галереи Кунгурской Ледяной пещеры сформированы в гипсо-ангидритах ледяно-пещерской пачки в подошве иренского горизонта мощностью 20-25 м, перекрытых доломитами неволинской пачки мощностью 5-15 м, и далее рыхлыми неоген-четвертичными породами мощностью до 15-20 м. Под легкорастворимыми сульфатными породами залегают доломиты филипповского горизонта (рис.1) [5, 12].

Среди морфометрических показателей гипсовых пещер Предуралья 60 % площади (половина общей длины и объема) приходится на Кунгурскую Ледяную пещеру [12]. Данное обстоятельство свидетельствует об особых условиях ее заложения. Многочисленные исследования позволяют отнести территорию города к напряженной тектонической зоне. Город Кунгур находится в узле пересечения трех вихревых тектонических структур [20]. Кунгурский речной узел, образованный рекой Сылвой и тремя ее основными притоками – Иренью, Шаквой и Бабкой, приурочен к точке пересечения разломов северо-западного и северо-восточного простирания, которые хорошо выделяются при дешифрировании космоснимков [8, 9, 14, 15]. Карта с вихревыми структурами представлена в монографии [12] и статье [20].

В целом для пещерного поля отмечается моноклиальное залегание пород с погружением на запад-северо-запад [16]. О приуроченности пещеры к локальному району интенсивных экзотектонических нарушений можно судить по наклонному (до 10°) залеганию карбонатно-сульфатных пород над входом в Кунгурскую пещеру, наличию складок (грот Руины) и деформированных слоев (грот Метеорный), а также по развитию дизъюнктивных дислокаций различных типов. В восточной части пещеры от грота Руины до грота Центрального прослеживается зона брекчирования, сложенная крупными глыбами гипса и доломита до 3-4 м в поперечнике, которые полностью заполняют пустотное пространство пещеры без рыхлого заполнителя [4].

Следует отметить захваченные при дислокациях и «запаянные» гипсом обломки из перекрывающих карбонатных пород 10-20 см в поперечнике. Отдельные обломки доломитов желтовато-коричневого цвета или их скопления, хорошо выделяются на фоне серого гипса. Края обломков ровные, к ним вплотную прилегает гипс без видимых изменений на контакте. В гроте Длинном (в центральной части Кунгурской пещеры) в нижней части осыпи у северной стены, в мегаблоке доломита длиной 6 м и шириной 1,5 м обнаружены остатки палеофауны, характерные

Рис.1. Схематический разрез Ледяной горы и Кунгурской пещеры [11]

- 1 – известняки и доломиты; 2 – гипсы и ангидриты; 3 – глинистые отложения; 4 – песчано-глинистые отложения;
5 – крупнообломочные отложения; 6 – уровень подземных вод; 7 – карстовые воронки; 8 – вертикальные каналы, трубы;
9 – подземные пустоты

для елкинской пачки. Последняя залегает над ледяно-пещерской пачкой после неволинской (мощность 5-15 м) и шалашинской (мощность 16-30 м) [18, 19]. В настоящее время елкинская пачка отсутствует в геологическом разрезе Ледяной горы в результате денудационных процессов. Общая длина перемещения блока составляет по вертикали минимум 80 м.

Общая длина лабиринта Кунгурской Ледяной пещеры 5,7 км, количество гротов – 44. Большинство из них высотой 3-10 м (максимальная – 17 м), длиной – 20-90 м (максимальная – 196 м), шириной – 10-30 м (максимальная – 36 м). Гроты соединяются невысокими (до 1,5-2 м), узкими (1-5 м) по ширине переходами, сформированными по двум взаимно пересекающимся системам трещин северо-восточного и северо-западного простирания [3]. Кроме видимых дизъюнктивных и пликтивных нарушений, в том числе карстовых, в пещере наблюдаются преобразования деформационных зон в условиях уже сформировавшейся карстовой системы.

Результаты наблюдений и обсуждение. Почти в каждом гроте у стен располагаются конические осыпи высотой от 0,5 до 2-5 м или вывалы пород, над которыми развиты органые трубы. В пещере насчитывается 146 органых труб (рис.2), представляющих собой вертикальные структуры, развитые в пределах ледяно-пещерской пачки высотой до 25 м, зияющие либо заполненные обломками. Форма труб, как правило, округлая, диаметр 3-10 м, встречаются сложные в плане образования, стенки их всегда вертикальные ровные, со следами капли. В большинстве

Рис.2. План расположения органых труб в Кунгурской Ледяной пещере [1, 13]

1 – органые трубы зияющие; 2 – органые трубы заполненные; 3 – экскурсионная тропа; 4 – озера

труб наблюдается капель с различными режимами поступления в зависимости от сезонности. В составе осей присутствуют крупные обломки или щебень гипса с глинистым заполнителем до 50-60 %. Иногда присутствуют обломки известняка и доломита. В устьях отдельных органических труб (грот Длинный) встречаются блоки карбонатных пород до 5 м в поперечнике, не соизмеримые с диаметром труб, это исключает их гравитационный генезис.

Иногда осыпи конической формы под трубами отсутствуют. В этом случае наблюдаются вывалы крупных глыб в основании стен высотой до 1-2 м (грот Вышка I, восточная часть). В отдельных случаях вывалы составляют в целом стену грота высотой до 5-8 м (гроты Грозный, Хлебниковых и другие). В этих случаях вывалы представляют собой часть крупноглыбовых конических осей, прослеживающихся в соседних гротах. Глинистый заполнитель в таких отложениях, как правило, отсутствует.

В настоящее время образование органических труб связывают с растворяющим действием инфильтрационных вод в местах пересечения трещин. При соединении нескольких узких каналов формируется единый отвесный канал. Со временем развитие труб приводит к обвалам из вышележащих отложений и, в конечном итоге, к провалам на поверхности. У большинства воронок на поверхности Ледяной горы, в недрах которой образована пещера, прослеживается связь с органическими трубами [1].

В представлении автора морфологические особенности отдельных труб, а также характер обломочного материала в их устьях позволяют по-новому интерпретировать их эволюцию. Залы и галереи пещеры заложены в пределах зон и участков повышенной линейной плотности тектонических трещин (300-600 м / 2500 м³). Целиковые участки соответствуют низким значениям линейной плотности тектонических трещин (менее 200 м / 2500 м³) [7]. Если рассматривать гроты как участки повышенной трещиноватости, то органические трубы должны располагаться в центре гротов. В действительности наблюдается обратная картина – приуроченность труб к краевым участкам открытых подземных пространств. В самых больших по протяженности и площади гротах: Длинный (длина 196 м, площадь 3533 м³), Грязный (длина 144 м, площадь 5134 м³) увеличение количества трещин и труб не наблюдается.

Автор считает, что инициирование труб происходит при деформации и разуплотнении пород обособленного по системе экзотектонических нарушений блока слоистых карбонатно-сульфатных пород иренского горизонта, вмещающих карстовую систему Ледяной горы. Погружение пород иренского и филипповского горизонтов в западном направлении привело к мелкоблоковому торошению, о чем свидетельствуют трещины различной ориентировки, а также складки и изгибы прослоев сульфатных пород.

Напорные воды филипповского горизонта, залегающего в подошве ледяно-пещерской пачки, в силу наклонного залегания горизонта и существовавших на то время артезианских условий циркуляции подземных вод, прорабатывали деформированные зоны в массиве на различную высоту. Об этом свидетельствуют округлые своды некоторых труб (грот Шапка Мономаха), а также фрагменты верхней части извилистых фидерных каналов на периферийных частях некоторых органических труб (гроты Длинный и Великан). Данные каналы – явные свидетели восходящего напорного движения подземных вод. Возвратное движение вод на границе с перекрывающими карбонатными породами усиливало растворение сульфатных обломков в зоне деформации, что приводило к перемещению остаточного материала и менее растворимых обломков. В результате в верхней части будущей органической трубы формируется свободное пространство. В дальнейшем инфильтрационные воды уже не стекают по стенкам, а падают с высоты, достаточной для формирования многочисленных ровных узких каналов 2-5 см в диаметре, пронизывающих сульфатную пачку до ее подошвы. Со временем несколько мелких каналов объединяются в единый цилиндр – органическую трубу диаметром от 0,5 м до 10 м (рис.3, а-в).

Если осыпь в устье органической трубы со временем попадает в зону растворяющего действия подземных вод горизонтальной циркуляции, происходит ее постоянное уменьшение по высоте вплоть до полного исчезновения. В юго-западной части грота Длинный под органической трубой проходит русло потока подземных вод. Устье извилистой органической трубы находится на высоте 2,5 м над руслом подземного потока, по которому каждую весну в паводок вглубь пещеры поступают речные воды со стороны грота Вышка I. Северо-западный склон глиняной осыпи высотой 1 м полностью «срезан» карстовыми водами.

При отсутствии заполнения можно наблюдать как органые трубы «упираются» в плоские плиты перекрывающих карбонатных пород неволинской пачки. Иногда на контакте образуются небольшие камеры, поперечник которых превышает диаметр трубы. Камеры образуются в результате вывалов доломитов. В середине прошлого столетия данные пустоты рассматривались как свидетельство развития карстовых процессов на более высоком гипсометрическом уровне.

Высоту органых труб в случае заполнения их обломочным материалом визуально определить невозможно. В центральной части пещерного поля в своде грота Космический, который представляет собой полость, развитую выше перекрывающих карбонатных пород, прослеживается узкая субвертикальная крупноглыбовая обвальная зона видимой протяженностью 10 м и шириной до 3 м. С учетом глубины воронки на поверхности, в данной точке происходит перфорация – выход обломочной зоны на поверхность.

Подход к гроту Космический представляет собой гигантскую осыпь высотой до 25 м, нижняя часть которой выходит в гроте Длинный на уровне современной горизонтальной циркуляции подземных вод. Пластическое течение отслоившихся по горизонтальным трещинам сульфатных пород в нижней части органной трубы – приводит к образованию вторичных целиков, иногда полностью маскирующих крупнообломочные отложения в основании (рис.3, з).

На этом процесс преобразования труб не заканчивается. В отдельных случаях гипс в результате последующих процессов гидратации и пластического течения заполняет пространство между обломками и глыбами карбонатных пород. В дальнейшем при поступлении инфильтрационных вод на данном участке вновь начинается формирование небольших округлых каналов с ровными вертикальными стенками, где фиксируются все те же обломки доломитов из перекрывающих отложений. Так, в центре грота Морское дно расположена осыпь диаметром 10 м и высотой 3 м, над которой нет соответствующего этим размерам вертикального цилиндра. Над осыпью в монолитном гипсе образовались несколько узких вертикальных каналов диаметром 0,3-0,5 м с видимыми отпрепарированными обломками карбонатных пород (рис.3, д).

Заключение. Локализация различных экзогенных процессов, в том числе карстовых, определяется особенностями геологического разреза, гидрогеологическими, геоморфологическими и другими условиями. Спелеологические исследования наряду с геологическими и геофизическими методами позволяют изучать внутреннее строение приповерхностных зон разрывных нарушений в осадочных толщах. Морфология существующих карстовых систем зависит от комплекса взаимосвязанных гидрогеологических, гидрохимических и микроклиматических процессов, изменяющихся на протяжении геологической истории спелеобъектов. Современные формы подземного ландшафта Кунгурской Ледяной пещеры – вертикальные органые трубы – результат преобразования дизъюнктивных нарушений в толще карстующихся карбонатно-сульфатных отложений в результате растворяющего действия артезианских вод на начальном этапе формирования карстовой системы массива. На последующих этапах инфильтрационные воды и процессы гидратации продолжают видоизменение структур.

Рис.3. Морфологические типы органых труб в Кунгурской Ледяной пещере

- 1 – щебень и глыбы сульфатных пород с глинистым заполнителем;
2 – щебень и глыбы карбонатных пород, «запаянные» в гипс;
3 – гипсы и ангидриты; 4 – известняки и доломиты

ЛИТЕРАТУРА

1. *Андрейчук В.Н.* Органные трубы в карбонатно-сульфатной кровле пещер / В.Н.Андрейчук, Е.П.Дорофеев, В.С.Лукин // Пещеры. Проблемы изучения: Межвузовский сборник научных трудов; Пермский государственный университет. Пермь, 1990. С. 16-23.
2. *Барыкина О.С.* Инженерно-геологический анализ разрывных тектонических структур // Сергеевские чтения: Материалы годичной сессии Научного совета РАН по проблемам геоэкологии, инженерной геологии и гидрогеологии (24-25 марта 2003 г.). Вып. 5. М.: ГЕОС, 2003. С. 448-452.
3. Геологические памятники Пермского края / Под общ. ред. И.И.Чайковского. Пермь: Книжная площадь, 2009. 616 с.
4. *Калинина Т.А.* Структурно-текстуальная и минералогическая характеристика пород Кунгурской Ледяной пещеры и их трансформация при карстообразовании // Проблемы минералогии, петрографии и металлогении. Научные чтения памяти П.Н.Чирвинского: Сборник научных статей. Пермь: Пермский государственный национальный исследовательский университет, 2013. № 16. С. 201-208.
5. Карст и пещеры Пермской области / К.А.Горбунова, В.Н.Андрейчук, В.П.Костарев, Н.Г.Максимович. Пермь: Изд-во Пермского университета, 1992. 200 с.
6. Карстовые процессы: закономерности развития, мониторинг, инженерно-геологические методы исследований: Материалы научно-практической конференции. Кунгур: Горный институт Уральского отделения РАН, Кунгурская лаборатория-стационар, 2010. 151 с.
7. *Катаев В.Н.* Структурно-тектонические условия формирования Кунгурской пещеры // Пещеры. Итоги исследований: Межвузовский сборник научных трудов. Вып. 23-24. Пермь: Пермский университет, 1993. С. 121-130.
8. *Катаев В.Н.* Линеаментный анализ территории г. Кунгура в целях карстологического прогноза / В.Н.Катаев, В.В.Аксарин // Геология и полезные ископаемые Западного Урала: Материалы региональной научно-практической конференции. Пермь: Пермский университет, 2007. С. 8-10.
9. *Катаев В.Н.* Геология и карст города Кунгура / В.Н.Катаев, О.И.Кадебская; Пермский государственный университет; Горный институт Уральского отделения РАН. Пермь, 2010. 231 с.
10. *Климчук А.Б.* Гипогенный спелеогенез, его гидрогеологическое значение и роль в эволюции карста. Симферополь: ДИАПИ, 2013. 180 с.
11. Кунгурская Ледяная пещера: Фотоальбом / Л.И.Вейсман, Е.П.Дорофеев, В.Н.Андрейчук, А.Б.Бобров. Пермь: Пермское книжное изд-во, 1990. 295 с.
12. Кунгурская Ледяная пещера: опыт режимных наблюдений / Под ред. В.Н.Дублянского; Российская академия наук, Уральское отделение, Горный институт. Екатеринбург: УрО РАН, 2005. 376 с.
13. *Лавров И.А.* Электронный план Кунгурской Ледяной пещеры / И.А.Лавров, А.А.Чугаева // Пещеры: Межвузовский сборник научных трудов; Пермский университет. Пермь, 2001. С. 73-75.
14. *Лаврова Н.В.* Формы проявления разрывных нарушений в условиях платформы на примере г.Кунгура (Пермское Предуралье) // Отечественная геоморфология: прошлое, настоящее, будущее: Материалы XXX Пленума Геоморфологической комиссии РАН; Санкт-Петербургский государственный университет, 15-20 сентября 2008 г. СПб, 2008. С. 64-65.
15. *Лукин В.С.* Кунгурский речной узел // Моделирование геологических систем и процессов: Материалы региональной конференции; Пермский университет. Пермь, 1996. С. 243-244.
16. *Лукин В.С.* Условия и этапы формирования Кунгурской пещеры // Карст Урала и Приуралья: Материалы Всеуральского совещания. Пермь: Институт карстоведения и спелеологии, 1968. С. 69-42.
17. *Несмеянов С.А.* Введение в инженерную геотектонику. М.: Научный мир, 2004. 214 с.
18. *Ожгибесов В.П.* Геология «Предуралья» // Вестник Пермского университета. Геология и геофизика. 2000. Вып. 3. С. 70-112.
19. *Ожгибесов В.П.* Район Кунгура. Пермская система Земного шара: Путеводитель геологических экскурсий. Ч. 3. Пермская геологическая система Пермского Приуралья / В.П.Ожгибесов, П.А.Софроницкий, Е.П.Дорофеев. Свердловск: Полиграфист, 1991. 151 с.
20. *Чайковский И.И.* Вихревые тектонические структуры Пермской области и мезокайнозойское минералообразование // Геология и полезные ископаемые Западного Урала: Материалы региональной научно-практической конференции. Пермь, 2002. С. 8-10.
21. *Covington M.* Calcite dissolution under turbulent flow condition: a remaining conundrum // Acta Carsologica. Vol. 43(1). P. 195-202. DOI: 10.3986/ac.v43i1.628
22. *Ford D.* Karst Hydrogeology and Geomorphology / D.Ford, P.Williams. Chichester: John Wiley & Son Ltd, 2007. 562 p.
23. *James E.W.* A global model for cave ventilation and seasonal bias in speleothem paleoclimate records / E.W.James, J.L.Banner, B.Hardt // Geochemistry, Geophysics, Geosystems. 2014. Vol. 16. P. 1044-1051. DOI: 10.1002/2014GC005658
24. Hypogene karst regions and Caves of the World / A.Klimchouk, A.N.Palmer, J.De Waele, A.S.Auler, P.Audra. Springer International Publishing AG, 2017. 911 p.
25. Sulphuric acid speleogenesis and landscape evolution: Montecchio cave, Albegna river valley (Southern Tuscany, Italy) / L.Piccini, J.De Waele, E.Galli, V.J.Polyak, S.M.Bernasconi, A.Yemano // Geomorphology. 2015. Vol. 229. P. 134-143. DOI: 10.1016/j.geomorph.2014.10.006

Автор Н.В.Лаврова, канд. геол.-минерал. наук, научный сотрудник, nlavrova08@mail.ru (Горный институт Уральского отделения РАН, Пермь, Россия).

Статья поступила в редакцию 12.06.2019.

Статья принята к публикации 25.03.2020.