Провалообразование как результат взаимодействия подземных вод с карстующимися сульфатными породами

Минькевич И.И., Килин Ю.А.

Пермский государственный национально-исследовательский университет, Пермь, Россия,
E-mail:iks-org@mail.ru

АННОТАЦИЯ: В Пермском крае с широким распространением карстующихся пород, в частности гипсоангидритов, большое значение приобретает исследование взаимодействия подземных вод с сульфатными породами и как результат этого взаимодействия образование карстовых и суффозионно-карстовых провалов. Исследования в Иренском карстовом районе показали различные виды взаимодействия подземных вод с карстующимися породами. В результате девятилетнего натурного эксперимента выявлено, что в начальный период скорость растворения ангидрита с доломитом выше, чем у гипса, по истечении срока скорость растворения выровнялась. В результате проведения буровых работ на трассах МГ было вскрыто 236 карстовых полостей (102 – открытые полости, 134 – заполненные), которые приурочены в основном к гипсам, намного реже к ангидритам. По наблюдаемым данным с 1995 по 2019гг (24 года) скорость обрушения в карстовую полость горных пород составила 1,2 м/год. Механизма растворения гипсоангидритовых пород и особенностей карстообразования позволяют прогнозировать возникновение и развитие новых провалов в районах распространения сульфатных отложений.

Failure formation as a result of groundwater interaction with karst sulphate rocks

Minkevich I.I., Kilin Yu.A.

Perm State National Research University, Perm, Russia, E-mail:iks-org@mail.ru

ABSTRACT: in the Perm region with a wide distribution of karst rocks, in particular hypso-anhydrites, it is of great importance to study the interaction of groundwater with sulphate rocks and as a result of this interaction, the formation of karst and suffusion-karst sinkholes. Research in the Irena karst area has shown various types of interaction between underground water and karst rocks. As a result of a nine-year field experiment, it was found that in the initial period, the rate of dissolution of anhydrite with dolomite is higher than that of gypsum, after the expiration of the period, the rate of dissolution leveled off. As a result of drilling operations on the MG routes, 236 karst cavities were opened (102-open cavities, 134 – filled), which are confined mainly to gypsum, much less often to anhydrites. According to the observed data from 1995 to 2019 (24 years), the rate of collapse into the karst cavity of rocks was 1.2 m/year. The mechanism of dissolution of gypsum-anhydrite rocks and features of karst formation will allow predicting the occurrence and development of new sinkholes in the areas of distribution of sulfate deposits.

ВВЕДЕНИЕ

В карстовых районах главным фактором провалообразования является растворяющая способность воды при взаимодействии ее с горными породами, в частности с сульфатами. Растворимость гипса при температуре 18°C составляет 2,55 г/дм³, ангидрита 2,01г/дм³. При понижении температуры воды с 10° до 0° вызывает осаждение гипса 0,2г/дм³, при похолодании на один градус его образуется около 20 мг/дм³.

Институтом карстоведения и спелеологии проводился натурный эксперимент по растворимости (ангидрита с гипсом, гипса, ангидрита с доломитом) в Кунгурской ледяной пещере в течение девяти лет [6]. Отмечалось, что скорость растворения ангидрита с доломитом в начальный период была больше чем у гипса. По истечении 9-летнего срока образцы приобрели состояние одинаковой водонасыщенности и скорости растворения выровнялись, на графике наблюдается инверсия кривых (рис.1). В дальнейшем вследствие изменения минераль-

ного состава образцов (относительное увеличение доломита и гипса) эта закономерность не прослеживается.

Переслаивание гипсоангидритов с доломитами создает особые условия растворения горных пород. Воды, предельно насыщенные сульфатом кальция, при фильтрации через доломиты взаимодействуют с ними:

$\text{CaSO}_4 + \text{CaMg}(\text{CO}_3)_2 = \text{MgSO}_4 + 2\text{CaCO}_3$ раствор раствор

Это приводит к раздоломчиванию, а также к росту агрессивности воды по отношению к гипсоангидритам. Такое обстоятельство предопределяет формирование карстовых полостей в зоне контакта подошвы слоя доломитов и кровли пласта гипсоангидритов. По данным В.Н. Андрейчука, 1999 внутри органических труб Кунгурской пещеры на контакте сульфатных пород с доломитами отмечаются расширения. Так, в гроте Дружбы народов, на контакте стенки труб прорезаны карами, а в самих доломитах образовалась обвальная камера высотой

около 5,0м с поперечником превышающем диаметр трубы. Аналогичные полости расширения наблюдаются и в гроте Эфирном. По данным Е.П.Дорофеева[6] было установлено соотношение карстовых воронок на Ледяной горе с гротами и галереями Кунгурской пещеры. При составлении совмещенного плана ходов пещеры и карстовых впадин надпещерного участка было установлено, что все средние и крупные карстовые воронки диаметром 5,0-60,0м образовались в результате провалов покровных отложений в горизонтальные полости на глубину 40,0-70,0м. Здесь наблюдались осыпи рыхлого материала, имеющие вид конусов. Часть покровных отложений заполнило вертикальные каналы (органные трубы) и впадины в кровле гипсоангидритового массива.

Рис. 1. Графики растворимости

Город Кунгур расположенный в зоне развития карста делится на два района: 1) район слабого развития карста в карбонатных породах и 2) района интенсивной закарстованности сульфатно-карбонатных пород. Распространение провалов неравномерно по площади, фактически все они произошли в сульфатных толщах. Наибольшее количество новых провалов образуется в весенний период при максимальных уровнях подземных и поверхностных вод. Большое влияние на интенсивность провалообразования оказывает техногенез; всего под влиянием техногенных факторов произошло более 150 провалов, большинство из которых носит суффозионно-карстовый характер [9].

Гидратация ангидрита и переход его в гипс происходит в верхних слоях геологического разреза на глубинах до 100 м, а в Ангаро - Ленском бассейне до 850м. При естественной гидратации ангидрита воздействию воды подвергается не дисперсный материал, а монолитная горная порода, состоящая из кристаллического ангидрита. Гидратация осуществляется путем растворения и путем диффузии молекул воды в кристаллическую решетку ангидрита. Гидратация через растворение заключается в выпадении из раствора гипса на стенках трещин. Такой процесс характерен для поверхностной части межразломных блоков. Количество гидра-

тированных гипсов обычно не превышает 2% от общего объема гипсоангидритового массива. Диффузионная гидратация протекает путем проникновения в кристаллическую решетку ангидрита не всей молекулы воды, а только ионов гидроксильной группы. Переход ангидрита в гипс происходит через промежуточную стадию частичного или полного растворения сернокислого кальция с образованием промежуточного минерала бассанита ($\text{CaSO}_4 \cdot 0,5 \text{H}_2\text{O}$) с плотностью 2,69г/см³.

К.А Горбунова [1, 5] объясняет природу гидратации ангидрита в зависимости от степени увлажнения. В условиях достаточного и избыточного увлажнения ангидриты, попадающие в зону активного водообмена, подвергаются гидратации, которая идет одновременно с растворением и не сопровождается увеличением объема породы. В условиях недостаточного увлажнения гидратация ангидрита протекает практически без растворения, при этом происходит увеличение объема. Один кубический сантиметр ангидрита образует до 1,577 см³ гипса, т.е увеличение объема составляет около 36,5% (Biesse, 1931). В ходе гидратации, протекающей с увеличением объема гипсовой породы, могут образовываться не только складки, гофрировка пород и бугры пучения, но и полости [3]. Гидратация предшествует карстообразованию и активизирует карст.

Наблюдается обратный процесс растворению – замутнение и выпадение мелких кристаллических частиц гипса в воде родников, имеющих повышенное содержание сульфата кальция. В процессе изучения карста гипсоангидритовых пород в Пермском крае зафиксированы родники с дебитами от 3,5 до 50л/сек, имеющие достаточно большое замутнение воды. Замутнение родниковой воды объясняется следующими причинами: в процессе химического выветривания сульфатов, в результате гидратации формируются вторичные отложения гипса, представленные в массиве в виде переотложенной корки на стенках микротрещин и пор. При изменении гидродинамики фильтрационного потока подземных вод в паводковый период тонкодисперсные полиминеральные продукты физического выветривания и переотложенные продукты гидратации (химического выветривания) смываются, образуя перенасыщенный водный раствор гипса с высоким содержанием тонкодисперсной минеральной фракции, который фиксируется в местах выхода вод в виде замутненных родников.

Таким образом, появление в районах развития сульфатно-карбонатного карста в родниковом стоке взвешенных частиц тонкодисперсной фракции является естественным процессом выноса подземными водами продуктов дезинте-

грации горных пород, что также способствует карстовым процессам.

В Иренском карстовом районе при близком залегании к поверхности земли гипсов образуется большое количество различных провальных форм в виде просадок, поноров, провальных воронок, суффозионно-карстовых провалов. Атмосферные осадки, имея минерализацию до 70 мг/дм³ попадая на гипсовый массив, быстро растворяют его поверхность, на участках трещиноватых и разрывных тектонических нарушений, а при проникновении воды вглубь, образуют вертикальные полости. На участке Ясылского карстового поля, входящего в Иренский карстовый район на площади 19 км² было зафиксировано 2537 воронок. Воронки преимущественно конусообразные, чаще всего они располагаются цепочками. Размеры воронок самые разнообразные и часто достигают 15-25 м в поперечнике и 5-10 м в глубину. Среди пещер самой крупной на Ясылской площади является Пономаревская протяженностью до 300 м. Площадной коэффициент закарстованности территории Ясылского поля составляет 24%.

По Г.А. Максимовичу это I класс с весьма значительной степенью плотности [4]. Подземная закарстованность на данном участке изучалась в процессе проведения инженерно-геологических работ для разработки противокарстовых

мероприятий на трассах магистральных газопроводов. Было пробурено 146 скважин. При бурении вскрыто 236 карстовых полостей, которые приурочены в основном к гипсам, намного реже к ангидритам. Открытые, незаполненные полости были вскрыты в 43 скважинах, в количестве равном 102. В процентном отношении, открытые полости составляют 43 % от общего количества полостей. Заполненных полостей вскрыто 134 (57%).

По характеру заполнителя преобладают тонкодисперсные отложения, а именно суглинки. Данный заполнитель был встречен в 90 полостях, что составляет 67 % от их общего количества. На втором месте – обломочный материал, который в основном представлен глыбами и щебнем гипса. Он обнаружен в 20 полостях исследуемой территории, что составляет 15 %.

На третьем – суглинисто-щебенистый заполнитель, который был встречен в 13 полостях, что соответствует 9,7 % (рис. 2). Также были встречены в качестве заполнителя обвальное-глыбовые отложения (в 6 полостях) – 4,5 %, щебенистый грунт (2 полости) 1,5 %. Помимо этого заполнителем являются глинистый, суглинисто-супесчаный, суглинисто-сульфатный материалы, которые наблюдались соответственно в 1 полости.

Рис. 2. Типы заполнителей карстовых полостей

По глубине вскрытия можно сделать вывод, что основное количество карстовых полостей не превышает глубину 15,0 м. Большинство полостей не превышает в высоту 2,0 м (рис.3). В основном распространены полости и полости-трещины, которые не превышают 0,2 м. Средняя высота полостей равна 1,7 м. Суммарная высота всех полостей – 416,7 м. Самая высокая полость (12,4 м) была вскрыта в скважине № 55. Линейный коэффициент внутренней закарстованности (по керну) составил на отдельных участках от 0,11 до 0,53 дол.ед. Ли-

нейный коэффициент открытой закарстованности – от 0,07 до 0,2 дол.ед.

При проведении съемки с применением беспилотного самолета 8-9 октября 2019г на участке магистрального газопровода в Ординском районе был обнаружен карстовый провал (рис.4). Провал произошел в 2,0м от магистрального газопровода. Он представляет собой бутылочную форму, верхняя часть имеет размер 3,6х2,5м, длинной осью вытянута вдоль трубы газопровода, нижняя часть размером 4,0х5,0м. Глубина провала 10,0м.

Карстовый провал произошел на участке аномальной зоны, которая была зафиксирована при карстологических изысканиях в 1995г. Тогда с помощью геофизических методов (ВЭЗ) и бурением скважин, было установлено наличие незаполненных карстовых полостей на глубинах 14,0-16,5 м; 29,0-34,2м с объемом 177 м³ и 1217 м³ соответственно (рис.4).

Рис. 3. Распределение карстовых полостей по глубине вскрытия

Рис. 4. Схематический геологический разрез участка с карстовым провалом

Скорость обрушения в карстовую полость горных пород по наблюдениям за 24 года (1995 - 2019гг) составила 1,2 м/год. При этом необходимо учитывать, что обрушения были многократными, так как рядом существующая полость имеет в днище обвальное-карстовое отложение.

Изучение механизма растворения гипсоангидритовых пород и особенностей карстообразования позволят прогнозировать возникновение и развитие новых провалов в районах распространения сульфатных отложений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Горбунова К. А. Морфология и гидрогеология гипсового карста / К. А. Горбунова – Пермь: изд-во ПГУ, 1979. – 95 с.
2. Горбунова К. А. Гидратация ангидрита и сопутствующие ей явления/ К. А. Горбунова // Карст и гидрогеология Предуралья. – Свердловск : УНЦ АН СССР, 1979. – С. 35–41.
3. Горбунова К. А., Дорофеев Е.П., Минькевич И.И. Экспериментальное изучение растворимости суль-

Верхняя полость приурочена к терригенному типу разреза соликамского горизонта Р₁. Нижняя полость, над которой произошел провал, приурочена к контакту соликамских отложений с иренскими гипсами кунгурского яруса. Трещинно-карстовые воды вскрываются на глубине 56м. Состав воды SO₄-Ca, с минерализацией 3,2 г/дм³. Вода не агрессивна к гипсам. Данный участок по предыдущей оценке карстоопасности был отнесен к потенциально опасному, но противокарстовые мероприятия кроме мониторинга здесь не выполнялись. Образование полостей связано с инфильтрацией атмосферных осадков через сильно трещиноватые выветрелые покровные алевролиты с прослоями аргиллитов и песчаников. Полости приурочены к зоне вертикальной нисходящей циркуляции.

фатных пород подземными водами в Кунгурской пещере. // Пещеры. Итоги исследований. – Пермь: Изд-во Пермского государственного университета, 1993. – С. 140–148.

4. Дорофеев Е. П. Соотношение размеров провальных впадин и карстовых полостей в сульфатных породах / Е. П. Дорофеев // Вопросы карстования. – Пермь :Изд-во ПГУ, 1970. – Вып. 2. – С. 11–15.

5. Килин Ю.А., Минькевич И.И.Полости Краснояльского карстового поля// Пещеры: Межвуз. Сб. науч. тр./ Перм. ун-т. –Пермь, 1999. С.52-57.

6. Лукин В. С., Ежов Ю.А. Карст и строительство в районе Кунгура – Пермь : Кн. изд-во, 1975. – 119 с.

7. Максимович Г. А. Основы карстования / Г. А. Максимович – Пермь, 1963. – Т. 1 – 444с.

8. Минькевич И.И., Килин Ю.А. Активизация карста и провалообразование на территории города Кунгура и его окрестностей //Геология и полезные ископаемые Западного Урала: матер. регион. науч.-практ. конф. /Перм. ун-т. – Пермь, 2003. С.248-249.

9. Якуч Л. Морфогенез карстовых областей / Л. Якуч. – Москва : Прогресс, 1979.