

Ф. А. МАКАРЕНКО, В. П. ЗВЕРЕВ

ГИДРОГЕОХИМИЧЕСКИЕ И ГИДРОДИНАМИЧЕСКИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ РАЗВИТИЯ КАРСТА

(Представлено академиком Н. М. Страховым 20 V 1969)

Известно, что карст — это процесс взаимодействия природных вод с растворимыми горными породами, происходящий на поверхности их раздела (1). Как и всякая гетерогенная реакция, карстообразование складывается из трех отдельных процессов: поступление растворителя к поверхности твердого вещества, собственно процесс растворения или фазового перехода и удаление растворенных в воде материалов от поверхности растворения.

Собственно процесс растворения твердых кристаллических веществ в общем виде заключается в разрушении кристаллической решетки твердого вещества в результате электростатического и теплового воздействий молекул воды с ионами, связанными в решетке силами электростатического притяжения. При взаимодействии твердого вещества с водой имеют место два одновременно протекающих процесса — переход частиц из твердого состояния в раствор и обратно. В зависимости от преобладания того или иного происходит растворение или кристаллизация. Когда скорости обоих процессов выравниваются, наступает равновесие и растворение практически прекращается.

В основе взаимодействия между твердым веществом и раствором лежит закон фазового равновесия Гиббса, согласно которому равновесие наступает, когда химический потенциал вещества в растворе (μ_A^s) становится равным химическому потенциалу вещества в твердой фазе (μ_A^l), т. е.

$$\mu_A^s = \mu_A^l = \mu_A^0 + RT \ln(x_A), \quad (1)$$

где μ_A^0 — стандартный химический потенциал вещества А в растворе, R — газовая постоянная, T — температура в градусах Кельвина, x_A — молярная доля вещества А в растворе.

В неравновесной системе компонент из фазы, в которой его химический потенциал больше, будет самопроизвольно переходить в фазу системы, в которой он меньше, т. е. с термодинамической точки зрения процесс карстообразования возможен, когда $\mu_A^s > \mu_A^l$. Поскольку интенсивные параметры системы, в пределах которой происходит карстообразование, практически неизменны, растворение в природных системах прежде всего обуславливается величиной градиента концентрации между жидкой фазой и насыщенным пограничным слоем, существование которого предполагается на поверхности растворяющегося тела (2).

Основными карстующими породами в земной коре являются известняки, гипсы и каменная соль. Следовательно, величины максимально возможных градиентов концентрации в природных системах будут определяться максимальными величинами растворимости этих соединений в водных растворах. Растворимость CaCO_3 в природных водах обуславливается в основном давлением CO_2 и не превышает первых сотен миллиграммов на литр; растворимость CaSO_4 больше и изменяется от 2,1 г/л в маломинерализованных водах до 7,3 г/л в растворах NaCl ; наибольшие градиенты концентрации могут возникать при карстообразовании галита, растворимость которого достигает 318 г/л. В действительности подобные градиенты кон-

центрации возможны лишь в отдельных редких случаях; обычно они намного меньше и в процессе карстообразования, экспоненциально уменьшаясь, стремятся к 0.

В общем виде процесс растворения описывается конвективно-диффузионным уравнением массопереноса (2)

$$dc / dt = D\Delta c - (\bar{v} \text{ grad } c), \quad (2)$$

где D — коэффициент диффузии, \bar{v} — скорость движения жидкой фазы, c — концентрация.

При карстообразовании процессы поступления растворителя и отвода растворенного вещества обычно имеют одну природу и, как это следует из уравнения (2), обуславливаются молекулярной или конвективной диффузией.

Количественный анализ этих процессов показал, что молекулярно-диффузионный массоперенос растворенного вещества при одних и тех же градиентах концентрации возможен лишь в условиях крайне незначительных скоростей фильтрации (10^{-7} — 10^{-8} см/сек), характерных для зон замедленного водообмена земной коры. Он может приводить лишь к рассолению засоленных и загипсованных толщ в масштабе геологического времени (3). Собственно процесс карстообразования, приводящий к образованию подземных полостей и ходов, им определяться не может. Карст возможен лишь при наличии конвективного массопереноса растворенного вещества, способного в сравнительно короткие отрезки времени перераспределять значительные массы. Для случая растворения поверхности пласта карстующейся горной породы количество растворенного вещества Q , выносимое в водную фазу, выражается уравнением

$$Q = bL(c_s - c_0)\sqrt[4]{4D_L v / \pi L}, \quad (3)$$

где $(c_s - c_0)$ — градиент концентрации, b — ширина растворяющегося пласта, L — протяженность растворяющегося пласта в направлении потока, D_L — коэффициент конвективной диффузии, v — скорость движения водной фазы.

Из рассмотрения этого и подобных уравнений, выведенных для других граничных условий, следует, что скорость растворения пропорциональна корню квадратному из скорости движения жидкой фазы, т. е. подземных вод, и коэффициенту конвективной диффузии, который, в свою очередь, также имеет прямую зависимость от скорости движения жидкой фазы (4). Таким образом, переходя к условиям земной коры, можно заключить, что интенсивность развития карста находится в прямой зависимости от динамичности подземных вод.

Анализ подземного стока в толще земной коры показывает его отчетливую зональность в вертикальном и горизонтальном направлениях. Всего для суши выделены три наиболее характерных зоны развития карста, соответствующие трем главным зонам подземного стока: верхняя — зона активного «грунтового» стока и интенсивного развития карста выше местного эрозионного вреза; средняя — зона замедленного стока и своеобразного карста, она ниже первого, но выше уровня регионального вреза реки или моря; нижняя зона весьма замедленного стока со слабым развитием карста. Эти зоны были документированы одним из авторов еще в 1937 г. (5) на примере изучения генезиса и геологической деятельности подземных вод карстового района Сочи — Мацеста, а позже и в других районах Кавказа, Средней Азии и Русской платформы (6).

Карст «верхней зоны», частый и мелкий в начальный период, развивается по многочисленным направлениям скважности и имеет в основном нисходящее направление, ориентированное к ближайшим дренам. Карст «средней зоны», более редкий и преимущественно горизонтальный, приурочен главным образом к основным тектоническим направлениям. Карст «нижней зоны» выражен крайне слабо, локально и большей частью может быть связан с различными биологическими и физико-химическими процес-

сами. Крупные карстовые пустоты в этой зоне являются погребенным карстом верхних зон.

Сформировавшиеся в процессе развития земной коры зоны карста нередко накладываются друг на друга. Реконструкция последовательности циклов карстообразования в таких случаях возможна путем анализа палеогидродинамических условий с учетом неотектонических движений.

Изучение баланса подземного и химического стока ряда территорий (Кавказ, Средняя Азия, Русская платформа) позволило установить следующие относительные темпы развития карста в выделенных выше глубинных пространственных зонах земной коры: 1,0; 0,1—0,01, 0,001—0,0001 и ниже, где 1,0—темпы карстообразования в верхней зоне, а первая цифра — коэффициент горных стран каждой зоны. Приведенные цифры выражают также и соотношения между скоростями движения подземных вод в выделенных гидродинамических зонах, которые соответственно составляют: $(10^{-2}-10^{-3})$, $(10^{-4}-10^{-5})$ и $(10^{-6}-10^{-8})$ см/сек.

Необходимо отметить, что широко рассматриваемые в литературе литологические, тектонические, геоморфологические и другие закономерности развития карста в значительной мере определяют характер, особенности и скорость перемещения подземных вод в толще земной коры.

Из уравнения (3) также следует, что растворение горных пород наиболее интенсивно развивается в местах поступления агрессивных по отношению к карстующейся породе природных вод, убывая по экспоненте по мере удаления от начального сечения. Это положение находит широкое подтверждение на многочисленных примерах, показывающих, что карст не развивается повсеместно и равномерно по всей площади распространения воднорастворимых горных пород. Наиболее интенсивное карстообразование приурочено к местам сосредоточенного поступления высокоагрессивных подземных вод на контакт или в толщу карстующихся горных пород (7).

Развитие карстовых процессов возможно также и в результате отдельных природных физико-химических и биологических процессов, нарушающих равновесие между твердой и жидкой фазами, — микробиологической деятельности, окисления сульфидов, адсорбции и т. д.

Широкое развитие карста, его важное значение как индикатора, запечатлевающего палео- и современную динамику подземных вод, историю их эволюции и геологической деятельности, историю колебательных движений земной коры и аккумулятора ряда рудных месторождений полезных ископаемых (бокситы, полиметаллы и др.) (8), а также необходимость освоения карстовых районов для промышленного, гражданского и гидротехнического строительства (9) требует более детального его изучения. От описания морфологии карста, которое не дает объяснения законов его развития, необходимо более активно переходить к анализу карста как гидрогеохимического и гидродинамического процесса, что позволит не только уточнить основные закономерности его развития, но и открывает возможность прогнозирования его масштабов и пространственного распределения в будущем.

Геологический институт
Академии наук СССР
Москва

Поступило
20 V 1969

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- ¹ Д. С. Соколов, Основные условия развития карста, М., 1962. ² В. Г. Левич, Физико-химическая гидродинамика, М., 1952. ³ С. И. Смирнов, Сов. геол., № 11 (1968). ⁴ Чжоу-Чэн-сюнь, Тр. Московск. инст. нефтехимич. и газовой пром. им. И. М. Губкина, в. 33 (1961). ⁵ Ф. А. Макаренко, Тр. Лабор. гидрогеол. пробл. АН СССР, 1, 1948. ⁶ Ф. А. Макаренко, Тез. докл. карстово-спалеолитич. конфер., Пермь, 1947. ⁷ В. П. Зверев, Гидрогеохимические исследования системы гипсы — подземные воды, «Наука», 1967. ⁸ Ф. А. Макаренко, Э. А. Чепижная, Тр. Лабор. гидрогеол. пробл. АН СССР, 42 (1962). ⁹ В. П. Зверев, В кн. Рекомендации по инженерно-геологическим изысканиям и оценки территории для промышленного и гражданского строительства в карстовых районах СССР, М., 1967.