



А.Б.Климчук, В.Н.Андрейчук

## О сущности карста

---

Климчук А.Б., Андрейчук В.Н. О сущности карста // Спелеология и карстология, - № 5. – Симферополь. – 2010. – С. 22-47.

**Резюме:** Сохраняющаяся до настоящего времени неопределенность центрального в карстологии понятия о карсте затрудняет обобщение знаний и развитие теоретических основ этой научной дисциплины. В статье анализируется сущность карста на основе обобщения современных представлений о закономерностях возникновения и эволюции каналовой проницаемости в растворимых породах, в свете идей синергетики и неравновесной термодинамики И.Р.Пригожина о самоорганизации в открытых системах и образовании упорядоченных диссипативных структур.

Присутствие в горнопородной среде растворимых пород вызывает явление самоорганизации структуры водообмена, приводящее систему вода-порода в новое качество-состояние - карстовое. Свойство самоорганизации этой геосистемы реализуется через специфический (спелеогенный) механизм развития проницаемости, действие которого кардинально изменяет (особым образом организует) структуру и функционирование водообменной системы.

Механизм самоорганизации водообмена и формирования карстовой геосистемы (спелеогенез) включает: 1) ранний спелеогенез, с действием обратной связи между водообменом и расширением первичных путей фильтрации (выявление протоканалов), 2) спелеогенное инициирование: каскадный процесс достижения протоканалами условий прорыва (сохранения раствором значительного недонасыщения), с ускоренным ростом инициированных каналов, гидродинамической конкуренцией, соответствующей дестабилизацией и реорганизацией стока и изменением граничных условий водообмена; 3) спелеогенное развитие: стабилизацию системы в состоянии подвижного равновесия за счет возрастания обмена энергией со средой и дальнейший рост каналов. В итоге этой специфической эволюции геосистема приобретает новое, «карстовое», качество и более сложную организацию с выделением в структуре проницаемости еще одного, наиболее контрастного, уровня.

Понятие о карсте определяется исходя из сущности прогрессивной эволюции геосистемы с проницаемыми растворимыми породами, движимой водообменом и спелеогенным механизмом самоорганизации структуры проницаемости. Регрессивная эволюция карстовой геосистемы включает процессы гравитационной деструкции и разнообразной аккумуляции, ведущие к фрагментации и разрушению реликтовых структур карстовой проницаемости. На основе нового подхода к определению понятия о карсте обсуждаются критерии разграничения карста и подобных, но не тождественных, явлений (мерокарста, псевдокарста). Ключевые слова: карст, геосистемы, самоорганизация, водообмен, каналовая проницаемость, гидрогеология карста, спелеогенез, геоморфогенез.

Климчук О.Б., Андрейчук В.М. Про сутність карсту // Спелеологія і карстологія, - № 5. – Симферополь. – 2010. – С. 22-47.

**Резюме:** Невизначеність центрального в карстологии поняття про карст, що зберігається дотепер, утруднює узагальнення знань і розвиток теоретичних основ цієї наукової дисципліни. У статті аналізується сутність карсту на основі узагальнення сучасних уявлень про закономірності виникнення та еволюції каналової проникності в розчинних породах, у світлі ідей синергетики й нерівноважної термодинаміки І.Р.Пригожина про самоорганізацію у відкритих системах і утворення впорядкованих дисіпативних структур.

Присутність у горнопородному середовищі розчинних порід викликає явище самоорганізації структури водообміну, що приводить систему вода-порода в новий стан - карстовий. Властивість самоорганізації цієї геосистеми реалізується через специфічний (спелеогенний) механізм розвитку проникності, дія якого кардинально змінює (особливим образом організує) структуру і функціонування водообменно́ї системи.

Механізм самоорганізації водообміну та формування карстової геосистеми (спелеогенез) включає: 1) ранній спелеогенез, із дією зворотного зв'язку між водообміном і розширенням первинних шляхів фільтрації (виявлення протоканалів),

2) спелеогенне ініціювання: каскадний процес досягнення протоканалами умов прориву (збереження розчином значного недонасичення), із прискореним ростом ініційованих каналів, гідродинамічною конкуренцією, відповідною дестабілізацією і реорганізацією стоку й зміною граничних умов водообміну, - виникнення інтегрованої структури каналової проникності; 3) спелеогенне розвиток: стабілізацію системи в стані рухливої рівноваги за рахунок зростання обміну енергією із середовищем і подальший ріст каналів. У результаті цієї специфічної еволюції геосистема здобуває нову, «карстову», якість і більш складну організацію з відокремленням у структурі проникності ще одного, найбільш контрастного, рівня.

Поняття про карст визначається виходячи із сутності прогресивної еволюції геосистеми із проникними розчинними породами, спонукуваної водообміном і спелеогенним механізмом самоорганізації структури проникності. Регресивна еволюція карстової геосистеми включає процеси гравітаційної деструкції й різноманітної акумуляції, що ведуть до фрагментації й руйнування реліктових структур карстової проникності. На основі нового підходу до визначення поняття про карст обговорюються критерії розмежування карсту і подібних, але не тотожних, явищ (мерокарсту, псевдокарсту). Ключові слова: карст, геосистеми, самоорганізація, водообмін, каналова проникність, гідрогеологія карсту, спелеогенез, геоморфогенез.

Klimchouk, O.B., Andreychouk, V.N. About the essence of karst // *Speleology and Karstology*, - № 5. – Simferopol. – 2010. P. 22-47.

**Abstract:** *The long-lasting uncertainty with the central for karstology notion of karst hinders synthesis of knowledge and the development of a theoretical basis of this scientific discipline. This paper analyses the essence of karst, based on generalization of the modern ideas about regularities of the origin and evolution of conduit permeability in soluble rocks, viewed in the light of ideas of synergetics and non-equilibrium thermodynamics of I.P.Prigogine regarding self-organization in open systems and formation of ordered dissipative structures.*

*The presence of soluble rocks in the sedimentary environment causes a phenomena of self-organization of the flow structure, which brings the water-rock system into a new capacity-state, namely – karstic. The property of self-organization of this geosystem realizes via specific (speleogenetic) mechanism of permeability development, which action radically changes (organizes in a special manner) the structure and functioning of the flow system.*

*The mechanism of self-organization of flow and of the formation of the karst geosystem (speleogenesis) includes: 1) early speleogenesis, positive feedback between flow and the rate of enlargement of initial flow paths (revealing of proto-conduits), 2) speleogenetic initiation: a cascade process of proto-conduits breakthroughs (a condition of considerable under-saturation of the solution at the exit), with accelerated growth of initiated conduits, hydrodynamic competition, respective destabilization and reorganization of the flow pattern and change in boundary conditions – the origin of integrated structure of conduit permeability, and, 3) speleogenetic development: stabilization of the system at dynamic equilibrium at the expense of increased energy exchange with the environment, and further growth of conduits. As a result of this specific evolution the geosystem acquires a new, «karstic», capacity and more complex of organization, with the establishment of one more level of permeability, the most contrast one.*

*The notion of karst is derived from the essence of progressive evolution of the geosystem containing permeable soluble rocks, driven by water exchange and speleogenetic mechanism of self-organization of the permeability structure. Regressive evolution of the karst geosystem includes processes of gravitational destruction and various accumulations, which lead to fragmentation and demolition of relict structures of karst permeability. Based on this new approach to definition of the notion of karst, criteria of distinction between proper karst and similar but not identical phenomena (merokarst, pseudokarst) are discussed. Keywords: karst, geosystems, self-organization, groundwater flow, conduit permeability, karst hydrogeology, speleogenesis, geomorphogenesis.*

## ВВЕДЕНИЕ

Развитие теоретического знания в научной дисциплине происходит неравномерно в течение ее истории. Накопление эмпирических данных в карстологии существенно опережало их теоретическое осмысление и соответствующее интегрирование понятийной надстройки. До недавнего времени развитие теоретических оснований карстологии происходило, в основном, стихийно и кластерно, не выходя за рамки эмпирических обобщений. Частные концептуальные модели, иногда весьма успешно и продуктивно развиваемые до статуса частных теорий, остаются плохо скоординированными и согласованными в рамках общих теоретических оснований карстологии – ее категориального базиса и общего понятийного аппарата.

Ситуация осложняется также различиями в исторических путях развития национальных и региональных научных школ, опирающихся на собственные методологические и научно-философские традиции. Эти различия усугублялись выраженными особенностями

проявлений карста в разных природных обстановках, с которыми исследователи преимущественно имели дело в своих странах и регионах. В карстологии, например, до середины 20-го столетия существенными различиями характеризовались североамериканская и европейская школы, однако эти различия сгладились в последние десятилетия в процессе интеграции мировой науки. По известным причинам, во многом обособленно от мирового контекста (хотя и весьма интенсивно), развивалась карстология в СССР. Однако в связи с общим кризисом развития науки в постсоветских странах, категориальный базис и понятийный аппарат карстологии в них во многом остались на уровне 70-х – 80-х годов и до сих пор не вполне корреспондируют с концепциями и теориями, развитыми в мировой карстологии.

Ввиду отмеченных выше обстоятельств, теоретические основания карстологии до настоящего времени остаются, во многом, конгломератом категориальных схем и оснований частных теорий, не образуя стройного и упорядоченного категориального базиса и понятийного аппарата научной дисциплины.

Соответственно, актуальными являются целенаправленные усилия по теоретическому анализу оснований карстологии, по определению (уточнению с учетом текущего развития знаний) ее ключевых понятий.

Категориальный базис научной дисциплины должен быть сквозным для ее частных теорий и концепций и иметь выходы в смежные области естествознания. Анализ оснований частной науки проводится при условии, что массив специального знания характеризуется теоретической многоаспектностью и эмпирической информационной насыщенностью (Круть, 1978). Именно такая ситуация характерна для современной карстологии.

Одной из серьезных трудностей в развитии теоретических оснований карстологии является неопределенность объема и содержания центрального ее понятия – *понятия о карсте*. Проблема эта отнюдь не формально-схоластическая - речь идет об определении *объекта* карстологии. Понимание сущности и соответствующее определение объекта научной дисциплины задает ее содержательную конфигурацию, устанавливает критерии идентификации, определяет связи и взаимоотношения с другими природными объектами (системами). Оно формирует предмет данной научной дисциплины и его связи с предметными областями соответствующих научных дисциплин, определяет методологию теоретического и эмпирического исследования объекта данной науки.

Следует отметить, что множественность определений понятия «карст» отчасти объясняется (и в этом смысле оправдана) тем, что карст как сложный объект входит различными своими аспектами (отношениями, свойствами) в предметные области различных научных дисциплин (геологии, геоморфологии, гидрогеологии, инженерной геологии, ландшафтоведения, спелеологии, проч.), с позиций которых и давались многие определения. В настоящей статье мы анализируем и уточняем понятие о карсте как объекте карстологии, т.е. реализуем «карстоцентрический» (в смысле работы Андрейчука, 2010) подход к изучению карста.

Дискуссии об объеме и содержании понятия-термина «карст» велись на всех этапах становления и развития карстологии. Некоторые определения становились на какое-то время доминирующими в рамках определенных школ и регионов, однако проблемные вопросы не решались и периодически актуализировались. Развернутый анализ существующих определений карста было дан одним из авторов 20 лет назад (Андрейчук, 1991). Актуализация проблемы в последнее время связана с несколькими обстоятельствами, среди которых отметим следующие:

- бурное развитие исследований карста в различных аспектах, возрастание их научной и практической значимости, привели к вхождению карстологии в ряд самостоятельных дисциплин геолого-географического цикла;

- резкое географическое «расширение» и геологическое «углубление» исследований карста привели к более полному осознанию разнообразия

природных условий и обстановок его развития и многообразия его проявлений;

- расширение круга наблюдаемых «карстоподобных» явлений в различных породах (лессах, кварцитах, гранитах, льду, многолетнемерзлых породах и т.д.), постоянно оживляет проблему «карст-псевдокарст»;

- глобализация и возрастающая интеграция мировой науки, а также интенсивное развитие частных концептуальных моделей и теорий в карстологии и спелеологии, проявляют и сталкивают различия в подходах и традиционных определениях карста национальных и региональных школ, обнажая нерешенные проблемы в понимании его сущности;

- в последние десятилетия наметилась смена главной парадигмы карстологии с преимущественно геоморфологической на преимущественно гидрогеологическую.

Сохраняющаяся и все более ярко проявляющаяся неопределенность понятия о карсте затрудняет обобщение знаний и развитие теоретических основ карстологии как научной дисциплины. Соответственно, требуются целенаправленные усилия по выявлению *сущности* карста и ревизия его определения как объекта изучения карстологии. В настоящей статье предпринята такая попытка, основанная на учете новых представлений о закономерностях и механизмах развития карста, сформированных в последние десятилетия.

#### КРАТКИЙ ОБЗОР ОПРЕДЕЛЕНИЙ ПОНЯТИЯ «КАРСТ»

Определение карста является давней научной проблемой карстологии, что иллюстрируется наличием в литературе свыше 150-ти его определений, выполненных с разных методологических позиций (см. Андрейчук, 1991; Тимофеев, Дублянский, Кикнадзе, 1991). Выделяются четыре подхода к пониманию сущности карста: 1) феноменологический (карст – явление или совокупность особых явлений), 2) процессуальный (карст - моно- или комплексный процесс), 3) территориальный/геоморфологический (карст – территория или рельеф с характерным набором признаков), 4) системный (карст – природная система взаимосвязанных объектов/свойств/отношений, образующих целостное множество).

Поход к определению карста *как явления (совокупности форм)*, т.е. феноменологический, иллюстрируется следующими определениями:

«Карст – явления (совокупность явлений), возникающие в растворимых водой горных породах» (Гвоздецкий, 1972).

«Карст – совокупность форм избирательного разрушения скальных и полускальных горных пород, целиком или частично сложенных растворимыми в природных водах минералами» (Цыкин, 1985).

При очевидной невозможности дать атрибутивные и эксклюзивные признаки явлений (форм), образующих карст, или дать их исчерпывающий перечень, большинство определений карста этой группы решают проблему указанием на связь карста

с растворимыми породами. Однако, учитывая, что подавляющее большинство горных пород сложены минералами, в определенных условиях и степени растворимыми в природных водах (см. ниже), а также то, что с растворимыми породами могут быть связаны явления самой различной природы, такой подход оставляет понятие о карсте крайне неопределенным и расширительным.

Одной из крайностей этой группы определений, интересным исторически обусловленным казусом, до сих пор встречающимся в западной литературе, является сохраняющаяся со времен Э.А.Мартеля традиция связывать «истинный» карст только с карбонатными породами:

*«Карст – явления в известняках» (Martel, 1984).*

*«Карстовые явления главным образом развиваются в карбонатных породах, известняках и доломитах, в которых они рассматриваются как настоящий карст» (Bakalowicz, 2005).*

*«Карст: Формы рельефа, которые были модифицированы растворением растворимых пород (известняка или доломита) (Pouchet, Copeland, 2006).*

*«Карст определяется как известняковый ландшафт с подземным дренажем» (Waltham, in Luhr, 2003).*

Казусом мы это называем ввиду того, что в последние десятилетия в мировой литературе (в советской это было и ранее) карст в некарбонатных породах (сульфатах, галоидах и др.) широко характеризуется и рассматривается как «правомерный» карст.

Характерными примерами процессуального подхода к определению карста являются следующие:

*«Карст – процесс химического и отчасти механического воздействия подземных и поверхностных внеуровневых вод на растворимые и проницаемые горные породы, в результате чего возникают поверхностные и подземные скульптурные, а при выпадении из раствора и обрушении – и аккумулятивные формы» (Максимович, 1962).*

*«Карст – гетерогенный процесс взаимодействия горных пород и подземных вод, заключающийся в растворении первых и выносе растворенных пород последними» (Зверев, 1982).*

Хотя процесс называется гетерогенным, его сущность сводится все же к растворению, или растворение принимается основной составляющей процесса. Некоторые ключевые проблемы процессуального подхода к карсту обсуждаются нами ниже.

Особняком стоят представления Ю.А.Ежова и др. (1992) о карсте как варианте метасоматоза («длинный метасоматоз», интрасоматоз по Г.Л. Поспелову, 1973), а также Р.А.Цыкина (1985), который к карсту относит также явления контактного метосоматоза:

*«Карст – «сквозной» процесс метасоматического изменения горных пород, заключающийся в образовании и последующем заполнении полостей, протекающем по общей схеме: растворение – перенос – растворение вещества» (Ежов и др., 1992).*

Характерной особенностью советской карстологической школы являлось понимание карста как совокупности или единства явления и процесса: *«Карст – это сами формы и процесс их образования» (Максимович, 1962); «Карст – это процессы развития карстовых явлений и сами явления» (Гвоздецкий, 1981).* С этой же позиции определял карст и один из авторов настоящей статьи:

*«Карст – это система процессов и явлений, возникающих и развивающихся под землей и на ее поверхности в результате взаимодействия природных вод с растворимыми в данной обстановке горными породами (растворение – вынос – осаждение)» (Андрейчук, 1991).*

Положение о карсте как единстве явления и процесса содержит ряд проблем методологического и философского характера, часть которых уже отмечались в литературе (Цыкин, Цыкина, 1978; Цыкин, 1985). В широком смысле природное явление есть любой искусственный материальный объект (вещь, отношение, свойство, процесс) (Круть, 1978), и в этом смысле положение о единстве явления и процесса тавтологично. В определениях карста под явлениями обычно подразумеваются формы рельефа и поверхности породы, а также гидрологические и гидрогеологические феномены (концентрированные выходы и поглощения вод на поверхности, подземные водоотводы, проч.), рассматриваемые как «формы-состояния». Но если процесс есть ряд последовательных взаимодействий (актов движения; динамический аспект), то форма есть равновесное состояние объекта (функциональный аспект); с позиций методологии системного анализа смешение этих аспектов в одном понятии недопустимо. Исследование геологических тел, сформировавшихся в прошлом (форм), и геолого-географических процессов настоящего, относится к различным методологическим системам, соответственно – статической и динамической (Косыгин, Соловьев, 1969).

В западной литературе преобладает понимание карста как территории (участка поверхности) с особыми формами и гидрологией, классический выражением которого является следующее определение:

*«Карст – это территория с характерными гидрологией и формами рельефа, возникающими от комбинации высокой растворимости пород и хорошо развитой каналовой (вторичной) пористости под землей» (Ford, Williams, 1989; Ford, 2004).*

Территориально-геоморфологический подход привязывает типологическую характеристику явления к территории. Его слабым местом является опора на понятие «территории», что подразумевает земную поверхность, а также акцентирование особого рельефа. Ниже будет показано, что выраженность в рельефе не является обязательным свойством карста вообще, а лишь свойством некоторых стадий его развития, т.е. функцией эволюции карста. Важной особенностью определения Форда и Уильямса является акцентирование каналовой пустотности.

Необходимость системного подхода к карсту (его рассмотрения как объекта-системы взаимосвязанных

объектов/свойств/отношений, образующих целостное множество) декларировалась во многих исследованиях, однако последовательной и сколько-нибудь полной реализации он пока не получил<sup>1</sup>. Не реализован он и в определениях понятия о карсте. Использование в некоторых определениях выражений типа «карст – это система» оставалось декларативным, поскольку в них не определялись объект-система, факторы и черты его/ее организованности и эмерджентные свойства (т.е. свойства, присущие объекту как системе, не сводимые к свойствам ее элементов, а возникающие из ее целостности).

Этот краткий обзор иллюстрирует неопределенность в понимании как категориальной, так и конкретно-научной сущности понятия «карст», а также в используемых наборах признаков, которые полагаются существенными, необходимыми и достаточными для его определения.

### ПРИЗНАКИ КАРСТА

Андрейчуком (1991) выполнена инвентаризация признаков карста, используемых в проанализированных им определениях этого термина. Не повторяя сделанного в этой работе анализа, дополняя, углубляя и конкретизируя его, остановимся на рассмотрении атрибутивности (неотъемлемости, необходимости), эксклюзивности и достаточности основных признаков.

Результат деятельности природных вод, их взаимодействия с породой. Этот признак прямо или косвенно присутствует в подавляющем большинстве определений карста, являясь аксиоматическим положением в карстологии. Вариации в уточнениях касательно типов и состояний вод, участвующих в образовании карста (поверхностные, подземные, движущиеся, внерусловые, проч.) являются несущественными и неоправданными в общем контексте интегрированного водообмена в геосистемах.

*Признак взаимодействия природных вод с горнопородным субстратом является атрибутивным для карста, однако не является эксклюзивным и достаточным для определения понятия о карсте.*

Результат растворения. Участие растворения в развитии карста общепризнано. Однако одной из проблем процессуального подхода к сущности карста является определение роли растворения в карсте как процессе. При том, что растворение признается большинством исследователей ведущим процессом, также практически общепризнанным есть то, что в карсте принимают участие (различное на разных стадиях его развития) целый ряд других процессов (механическая эрозия, гравитационные и аккумулятивные процессы, проч.). На ранних стадиях развития карста растворение доминирует, но на некоторых последующих стадиях доминирующими становятся какие-то из прочих процессов. Выход многие исследователи видели в признании комплексного (полигенетического, гетерогенного) характера карстового

процесса. Однако при вариабельности и ситуативности «пропорций» участия элементарных процессов в таком «комплексе», попытки определить сущность карста как комплексного процесса успеха не имели. Б.А.Вахрушев (2009) считает карст моногенетичным процессом, однако включает в него химическое растворение и хемогенную седиментацию (по-сути, различные процессы). Прочие элементарные деструктивные процессы (эрозия, гравитационная деструкция) рассматриваются им как элементы внутрисистемных взаимодействий единого карстового литодинамического потока. «Карстовый процесс моногенетичен, а формы карстового рельефа могут быть полигенетичными образованиями» (Вахрушев, 2009, с. 34).

Вольное или невольное отождествление карста (в процессуальном понимании термина) с химическим процессом растворения широко распространено, однако недопустимо, особенно в контексте определения карста как основного понятия и объекта карстологии. Растворение как процесс является взаимодействием естественных тел, организованных на атомарно-молекулярном уровне, - объектом исследования химии, но не наук о Земле. Последние исследуют вещи-системы (включая их взаимодействия), организованные на более высоком, географо-геологическом уровне (Круть, 1978). Растворение является элементарным процессом во многих геологических процессах, определяемых как взаимодействия вещей-систем соответствующего уровня организации.

Редукция карста к растворению (проведенная логически последовательно) приводит к недопустимому расширению объема понятия «карст» и полной потере карстовой специфики: в область понятия «карст» включаются все процессы растворения в любых породах. Следуя этой логике, любое проявление растворения, любая скульптурная форма растворения на любой породе, должны относиться к карсту.

*Принимая положение о том, что растворение является атрибутивным признаком карста<sup>2</sup>, следует подчеркнуть, что он не является эксклюзивным и достаточным для определения карста.*

Связь с растворимыми (полностью или частично) породами. В попытках преодолеть вышеупомянутое недопустимое расширение понятия карст, определяемого через процесс растворения, многие определения содержат указания на процесс (процессы) в растворимых (легкорастворимых) породах. Проблема этим, однако, не решается, поскольку растворимость порообразующих минералов в природных водах является функцией физико-химических условий взаимодействия твердой и жидкой фаз, варьирующих в широких пределах. В определенных термобарических и геохимических обстановках легкорастворимыми оказываются многие породы, перечень которых далеко выходит за рамки литологий, традиционно считающихся карстующимися. Использование характеристик пород как растворимых (легкорастворимых) в определениях карста имело определенный смысл в рамках «классической»,

<sup>1</sup> Системный подход частично реализован применительно к карстовому ландшафту (Воропай, Андрейчук, 1985; Андрейчук, 2009), но не к карсту в целом.

<sup>2</sup> Обоснование этого положения с позиций современных представлений о развитии карста дается в одном из следующих разделов.

преимущественно геоморфологической и эпигенной, парадигмы карстологии, где свойство растворимости «по умолчанию» характеризовалось для приповерхностных условий. Развитие представлений о глубинном и гипогенном карсте (Ежов и др., 1992; Дублянский Ю., 1990; Klimchouk, 2000a, 2007, 2010a), развивающемся в широком диапазоне физических и геохимических условий, обнажило заложенную в таких определениях проблему.

Привлечение признака “частично растворимых пород”, сохраняя проблему относительности свойства растворимости, привносит дополнительную неопределенность. По каким критериям относить или не относить к карсту широко распространенное явление избирательного растворения полиминеральных пород, например, песчаников или конгломератов с легкорастворимым в данных условиях цементом?

Другой аспект проблемы состоит в том, что сама по себе высокая растворимость пород (и высокая скорость растворения), являются, как будет показано ниже, свойствами, которые в целом препятствуют развитию карста.

*Таким образом, признак связи карста с растворимыми породами оказывается неопределенным и не является ни атрибутивным, ни эксклюзивным признаком карста.*

С характеристикой пород как растворимых тесно связана их классификация как «карстующихся». Под карстующейся породой понимается порода, в которой развивается карст, однако неопределенность понятия карст делает столь же неопределенным понятие «карстующаяся порода». Кажущаяся синонимичность терминов «растворимая порода» и «карстующаяся порода» вытекала из понимания карста как процесса или явления в растворимых породах, что, как показано выше, уже не может считаться правомерным.

*Любая карстующаяся порода является растворимой в определенных условиях, поскольку растворение является атрибутивным признаком карста. Однако не все растворимые породы являются карстующимися, поскольку признак растворения не является достаточным в определении понятия «карст».*

**Поверхностные и подземные формы.** Большинство определений карста содержат указания на характерные (своеобразные, особые, сложные, специфические и т.п.) формы рельефа (комплекс, ансамбль, совокупность форм) или характерный ландшафт, без расшифровки характеристики или специфики. В некоторых есть упоминания скульптурного (морфоскульптурного), в других – провального характера форм. Ряд определений конкретизируют формы как впадины, ямы, воронки, замкнутые долины.

Распространенность указаний на характерные формы и рельеф есть отражение этимологических истоков термина «карст», исторических путей развития карстологии и преобладания в недавнем прошлом преимущественно геоморфологической парадигмы карста. Карст ярко проявляется в рельефе и в этом качестве наиболее доступен для прямого наблюдения. Однако выраженность в рельефе есть

атрибут лишь некоторых стадий развития карста (Климчук, 2010), причем не самых длительных в контексте геологической истории и не преобладающих (в качестве эволюционных типов карста) по географической распространенности. Карст может быть интенсивно развит на значительной глубине под некарстующимся покровом, без всякого выражения на поверхности (закрытый карст). Именно возрастающее осознание роли и распространения глубинного, закрытого, карста (Ежов и др., 1991, 1992; Klimchouk, 2000a) и выявление механизмов его формирования вне непосредственной связи с земной поверхностью (гипогенный спелеогенез; Дублянский Ю., 1990; Palmer, 1991; Klimchouk, 2000a, 2007; 2010) послужили толчком к происходящей в мировой карстологии смене преимущественно геоморфологической парадигмы карстологии на преимущественно геологическую (гидрогеологическую).

*Признак выраженности в рельефе в виде характерных форм и комплексов форм не является для карста ни атрибутивным, ни эксклюзивным.*

Попутно отметим, что в группе экспонированных типов карста преобладание замкнутых и полужамкнутых отрицательных форм рельефа характерно для приоткрытого, взрезанного, раскрытого карста, но в открытом карсте характер доминирующей скульптурной морфологии является, опять же, функцией его эволюции и отчасти климата. В зрелом и старом карсте гумидных областей доминантными в карстовом рельефе становятся положительные формы (останцовый и башенный карст), а предельным состоянием карстовой планиции являются почти идеальные поверхности выравнивания (карстовые равнины) по уровню карстовых вод.

В небольшой части определений содержатся указания на подземные формы (полости, пещеры) как атрибутивный признак карста. *Наличие полостей (каналов) действительно является атрибутивным признаком, а с указанием на их происхождение в результате растворения подземными водами – и эксклюзивным признаком карста.*

**Гидрологические и гидрогеологические особенности.** Некоторые определения карста акцентируют гидрологические (чаще) и гидрогеологические особенности, формируемые в результате его развития. В большинстве случаев это самые общие указания на наличие особенностей, своеобразие, или характерность, без конкретизации их сути. Лишь определение Форда (Ford, Williams, 1989; Ford, 2004) указывает на то, что характерная для карста гидрология (отметим, что в североамериканском употреблении этот термин относится и к подземным водам) возникает от комбинации высокой растворимости пород и хорошо развитой каналовой (вторичной) пористости под землей. *Признак высокой каналовой пористости (проницаемости) является атрибутивным, хотя и не эксклюзивным признаком карста.*

**Саморазвитие и сосредоточение стока.** Особняком среди подавляющего большинства существующих стоит определение А.С.Девдариани (1962), указывающее сразу на два важных признака карста, упущенных практически всеми прочими определениями:

«Карст есть явление саморазвивающегося сосредоточения стока в растворимых породах» (Девдариани, 1962).

Тут акцентируются *признаки саморазвития* (а значит – *организации*) и *сосредоточения стока*, которые мы считаем *важными атрибутивными признаками* карста. Отнесение этих признаков к стоку связывает их с деятельностью природных вод, а указание на растворимые породы связывает их с растворением, что делает эти признаки карста эксклюзивными. На сосредоточение карста и стока как на одну из наиболее важных закономерностей развития карста указывал также В.С.Лукин (1966).

Локализованность. Близким к сосредоточенности является понятие *локализованности*, что Р.А.Цыкин (1985) считал инвариантом карста. Ежов и др. (1992), в контексте анализа глубинного карста, отмечают тенденцию уменьшения степени обособленности (локализованности, сосредоточенности) с глубиной, что связывается с повышением в этом направлении изотропности среды и полей физических параметров (температуры, давления, скоростей движения вод и др.).

Разрушение и преобразование пород (скальных или полускальных), изменение их структуры и физических и химических свойств. Некоторые исследователи определяют карст как процесс разрушения и преобразования пород (земной коры), происходящий вследствие химической и механической деятельности подземных вод (Рыжиков, 1954; Соколов Н., 1960, и др.), другие – как совокупность форм разрушения растворимых пород (Цыкин, 1985). *Изменение свойств пород, несомненно, есть атрибутивный признак карста, однако без указания на сущность собственно карстовых преобразований он не является эксклюзивным и, тем более, достаточным.* Деятельность подземных вод сопровождается различными изменениями горнопородного субстрата, далеко не все из которых могут связываться с карстом. Кроме того, с некоторых методологических позиций карст правомерно рассматривать не как разрушение пород, а как созидание новых структур неоднородности, на чем мы остановимся ниже.

Среди рассмотренных выше признаков (свойств) карста *имманентными* представляются два: 1) карст есть результат взаимодействия природных вод с горнопородным субстратом; 2) развитие карста связано с растворением горных пород природными водами.

Есть ряд других признаков, *атрибутивных* для карста: изменение свойств пород, сосредоточение подземного стока, локализованность проявлений, наличие полостей, высокая каналовая проницаемость. Однако ни один из упомянутых признаков не является эксклюзивным и достаточным для определения карста как особого природного явления.

Очевидно, что путь инвентаризации, «взвешивания» и комбинирования эмпирических признаков карста не является продуктивным для выяснения его сущности и понятийного определения. Для решения этой центральной проблемы карстологии необходимо использование новых методологических подходов и обобщение результатов новейших исследований самого явления.

## КАТЕГОРИАЛЬНЫЙ БАЗИС ПОНЯТИЯ О КАРСТЕ

Основной категорией естествознания в целом является понятие о естественных объектах, в качестве которых выступают вещи-системы и их совокупности (классы, уровни, иерархии), их элементы и структуры, взаимодействия, пространственные и временные отношения и свойства и т.д. Эти категории находятся за пределами понятийного аппарата частных теорий, но составляют категориальный фундамент и служат исходными для основных понятий отдельных естественных наук и их циклов (Круть, 1978). Последние, в свою очередь, образуют категориальную основу более специализированных научных дисциплин, таких как карстология. Такая иерархия, конечно, довольно условна, как условны и границы отдельных естественных наук и их разделов-дисциплин, однако полезна для понимания общей структуры теоретического знания и взаимосвязи его составляющих.

Категориальный базис карстологии складывается из основных понятий наук о Земле (таких как минерал, горная порода, горнопородная формация, ландшафт, геосистема, водообменная система, проч.), а также ряда «сквозных» концепций и методологических принципов. Центральное место среди основных понятий карстологии занимает понятие о карсте, образующее фундамент ее понятийной постройки.

Методологической основой развиваемого в статье нового подхода к пониманию сущности карста служит ряд сквозных концепций-теорий современного естествознания:

- 1) Концепция уровней организации естественных систем – геофизических, геохимических, геолого-географических.
- 2) Методология системного анализа.
- 3) Теория диссипативных систем (нелинейных) и концепция самоорганизации (синергетика).

Центральной исходной категорией для вывода понятия о карсте принимается понятие о *геосистеме* (выявляющей определенную пространственную и эволюционную целостность, генерируемую особыми взаимодействиями ее элементов), а основной теоретической предпосылкой – известный постулат В.И.Вернадского об огромной геологической роли природных вод, интенсивно развиваемый современной гидрогеологией (Основы гидрогеологии: Геологическая деятельность ..., 1982; Шварцев, 1996, 2007а, 2008; Sharp, Kyle, 1988; Tóth, 1995, 1999; La Fleur, 1984, и др.). Геологическая роль природных вод реализуется посредством многообразных взаимодействий в системе вода-порода.

Признание взаимодействия природных вод с горнопородным субстратом в качестве имманентного признака карста конкретизирует основные элементы (геосистемы, выступающие в качестве подсистем) геосистемы карста в виде: 1) *горнопородного субстрата* (геологических структур различных уровней организации: горнопородного, геотектонического, геосферного, – относительно инертной подсистемы), 2) *водообменной системы, или геогидродинамической системы* (динамической системы, также иерархически

организованной в координации с субстратом; системы подземных вод, характеризующейся общими условиями возникновения движения воды и осуществления водообмена; Карцев, 1972). С.Л.Шварцев рассматривает систему вода-порода в качестве особой стационарной неравновесной системы (Шварцев, 2007а, 2007б, 2008).

Карст как геосистема является одним из наиболее ярких проявлений геологической деятельности природных вод, выражением взаимодействия горнопородной и водообменной подсистем. *Взаимодействие в системе вода-порода обеспечивается водообменом.* Под водообменом понимается процесс, характеризующий поступление подземных вод в водоносную систему (или ее часть), перемещение внутри и выведение из нее в смежные системы (разгрузку) (Водообмен в геологических структурах Украины..., 1988). Количественно, водообмен представляет собой величину, обратную времени, в течение которого вода находится под землей и взаимодействует с горными породами:

$$Q/V = 1/T = WE,$$

где Q – расход подземных вод, V – емкостные запасы, T – время нахождения воды в горных породах, WE – показатель водообмена.

Водообмен является главным контролером равновесно-неравновесного состояния системы «вода-порода», главной причиной недостижимости равновесия (достигаемого лишь локально-мозаично и временно), к которому стремится эта система, систематическим механизмом массопереноса, поддерживающим неравновесие. Направленность взаимодействия в системе «вода-порода» и распределение его эффектов определяются интенсивностью и структурой водообмена в геосистеме.

Горнопородная и водообменная подсистемы характеризуются отношениями вложенности и взаимопроникновения, задаваемыми элементарными структурами пустотности всех видов (пор, трещин, каверн, каналов) и их организацией в тела-системы более высоких рангов. Характеристики структуры пустотности горнопородного субстрата определяют его главное для водообмена свойство - проницаемость. Структура проницаемости определяет структуру водообмена.

Структура пустотности и проницаемости горнопородного субстрата задается и изменяется в ходе геологических процессов седиментогенеза, пост-седиментационного преобразования пород, тектогенеза, проч. Она изменчива в масштабах времени соответствующих геологических процессов, однако обычно принимается статичной по отношению к подземным водам, - намного более динамичному элементу системы вода-порода. Потому вопросы динамических изменений и развития структуры водообмена в гидрогеологии обычно не ставятся и не рассматриваются.

Однако присутствие в горнопородной среде пород, растворимых в данных условиях, вызывает, как будет показано ниже, явление *саморазвития и самоорганизации водообмена*, приводящее геосистему

вода-порода в новое качество-состояние - *карстовое*. Свойство самоорганизации системы, имеющей компоненты растворимых пород, реализуется через специфический карстовый (*спелеогенный*) механизм развития проницаемости, действие которого кардинально изменяет (особым образом организует) структуру и функционирование водообменной подсистемы. Именно в этом заключается уникальность карстовых водообменных систем (их отличие от прочих водообменных геосистем). В этом заключается ключ к пониманию сущности карста.

## ЯВЛЕНИЯ САМООРГАНИЗАЦИИ ГЕОСИСТЕМ

Одним из фундаментальных явлений природы является возрастание энтропии, которая есть мера разупорядочения системы, ее приближения к хаосу. Другим фундаментальным явлением является *самоорганизация*, способность к которой долгое время считалась атрибутом лишь живой материи. В частности, в геологии акцент традиционно делался на процессах дезинтеграции и разрушения, упрощения структур. В последние десятилетия процессам самоорганизации уделяется особое внимание в естественных науках, причем выдвигается их действие и роль в эволюции косной материи, в частности – геологических тел-систем. Теоретической основой этого служат идеи и концепции неравновесной термодинамики (Пригожин, 1960; Пригожин, Стенгерс, 1986, 1987; Николис, Пригожин, 1979, 1990) и синергетики (Хакен, 1980), интенсивно развиваемые применительно как к объектам геологии (Летников, 1992, 1997; Руденко, 2000; Шербаков, 1990), так и к системе вода-порода (Геологическая эволюция..., 2005; Шварцев, 2005, 2007а, 2007б, 2008). Опираясь на эти идеи, мы попытаемся показать, что *карст является одним из наиболее ярких примеров геосистем, для которых самоорганизация есть атрибутивным и системообразующим свойством.* В связи с этим целесообразно кратко остановиться на основных понятиях неравновесной термодинамики и синергетики, в частности – идеях нелинейности, открытости, диссипативности, самоорганизации.

В закрытой (изолированной) системе энтропия не изменяется при обратимых процессах (тех, при которых система может быть возвращена в исходное состояние через те же самые промежуточные состояния) и возрастает при необратимых. Большинство природных процессов являются необратимыми, так как сопровождаются диссипацией (рассеянием) энергии. В закрытых системах диссипативные процессы ведут к хаотическому перераспределению частиц по всем возможным состояниям, тем самым – к снижению их упорядоченности, возрастанию энтропии до максимально возможных значений (равновесное состояние).

В открытых динамических системах энтропия может и снижаться, что означает повышение их упорядоченности. Снижение энтропии в такой системе происходит, когда внутреннее производство энтропии в ней компенсируется ее снижением за счет внешних взаимодействий. Работами И.Р.Пригожина и его соавторов по термодинамике систем, удаленных от равновесия (см. ссылки выше), показано, что флуктуации



в открытой системе могут вызвать ее перестройку и привести в новое состояние, характеризующее относительной устойчивостью, большей сложностью и более высоким уровнем упорядоченности. *Это и есть явление самоорганизации системы.* Г. Хакен (1980) развил представление о кооперативном взаимодействии и когерентном поведении отдельных частей макросистемы в процессе их эволюционного развития. Самоорганизацию такого типа он назвал синергетической, а науку, изучающую явления самоорганизации – синергетикой.

Упорядоченные образования, возникающие в открытых системах в ходе необратимых процессов, называются диссипативными структурами, поскольку для их поддержания требуется больше энергии, чем для поддержания более простых материнских структур (Пригожин, Стенгерс, 1986). Согласно упомянутым работам И.Р. Пригожина и его последователей, все открытые системы являются диссипативными и включают необратимые процессы. Таковыми являются подавляющее большинство природных систем. Диссипативные системы могут обладать одновременно более высокой организацией и более сложной функцией развития, ведущей к усложнению механизмов взаимодействия и эволюции в целом. Таким образом, необратимые процессы могут выступать источником не хаоса, а порядка и эволюционного развития (Пригожин, Стенгерс, 1986).

В смысловом (семантическом) аспекте энтропия характеризует степень деградации энергии в системе, связанную с ее рассеянием: энергия высокого качества, за счет которой может производиться работа (например, потенциальная энергия поднятого груза или направленного потока фотонов в солнечном свете), превращается в энергию более низкого качества — тепловую энергию хаотического теплового движения частиц. Поскольку энтропия системы при этом уменьшается, то И.Р. Пригожин с сотрудниками используют понятие об отрицательной энтропии, которая является причиной самоорганизации и может служить мерой организованности системы. Синергетика рассматривает самоорганизацию как процесс уменьшения энтропии, как прогрессивную эволюцию, обусловленную антиэнтропийным характером развития системы.

Самоорганизующейся системой Г. Хакен (1980), называет такую систему, которая без специфического воздействия извне обретает какую-то пространственную, временную или функциональную структуру (под специфическим воздействием он понимает такое, которое навязывает системе структуру или функционирование). Важнейшим признаком самоорганизующейся системы считается (Эшби, 1966) направленность изменений в ней на связывание изначально разрозненных частей. Понятие самоорганизации можно также охарактеризовать как возрастание структурной сложности и упорядоченности системы под влиянием внутрисистемных взаимодействий, приводящее к функциональным изменениям системы и изменениям ее внешних взаимодействий.

Понятие самоорганизации тесно корреспондирует с понятием информации, которая, по В.М.Глушкову, содержится во всякой неоднородности. Согласно Э.Шредингеру и Л. Бриллюэну, информация является величиной (негэнтропия по Л. Бриллюэну), обратной энтропии. Выступая противоположностью энтропийной неопределенности, информация возникает как результат решения альтернативы, возрастания неоднородности, структурированности и организованности системы. Структурированность системы включает в себе механизмы оценки и переработки информации (Щербаков, 1990). Эволюционное развитие системы, ее возникновение и разрушение являются информационным процессом, который фиксируется в структуре возникающих образований (Шварцев, 2007а).

Ф.А. Летников (1992, 1997) показал, что, большинство геологических систем относится к диссипативным и самоорганизующимся, поскольку они являются открытыми, динамическими, состоят из большого числа компонентов (атомы, молекулы, минералы, породы), развиваются в нелинейной области, далекой от равновесия. Среди примеров таких структур Ф.А. Летников называет рост минералов, образование кластеров, формирование флюидных, флюидно-солевых и расплавных систем, становление метасоматических, метаморфических и других комплексов.

С.Л. Шварцев (1997, 2005, 2007а, 2007б, 2008) детально исследовал синергетические свойства диссипативной самоорганизующейся системы вода-порода, процессы и механизмы направленной эволюции системы в аспекте формирования водно-минеральных систем (гидрогенно-минеральных комплексов).

Другим аспектом взаимодействий и самоорганизации в системе вода-порода, до сих пор не получавшим должного внимания, является *направленное развитие структуры водопроницаемости* (т.е. свойств горнопородного субстрата) и обусловленная им эволюция водообменной системы (коэволюция). Такое развитие всегда имеет место в системе вода-порода, составляя обратную сторону эволюции гидрогенно-минеральных комплексов, но в обстановках относительно низкой растворимости горнопородного субстрата его эффекты проявляются лишь в геологически длительных временных масштабах, сопоставимых со временем жизни самого субстрата. Поэтому структура пустотности и проницаемости горных пород обычно принималась статичной по отношению к подземным водам, - намного более динамичному элементу системы, а вопросы динамических изменений и развития структуры водообмена в ходе взаимодействий в системе вода-порода в гидрогеологии не ставились и не рассматривались.

Вместе с тем, именно эта сторона взаимодействия в системе вода-порода, - развитие структуры пустотности и проницаемости, - оказывается в центре исследований карста и самого понятия о карсте. Динамика карстового преобразования этой структуры намного более высока по сравнению с некарстовыми геосистемами. Она намного более высокая, чем временные масштабы

жизни горнопородного субстрата, ввиду чего карст становится существенным фактором преобразования структуры этого субстрата. Во многих случаях динамика карстового преобразования структуры пустотности и проницаемости пород может быть заметной в масштабах исторического времени человека, а в экстремальных случаях – во временных масштабах жизни современных искусственных сооружений.

Успехи последних десятилетий в исследовании и моделировании процессов растворения, водообмена и массопереноса в карстовых системах, а также механизмов и закономерностей эволюции каналовой проницаемости в различных условиях, позволяют подойти к выявлению сущности карста с рассмотренных выше позиций теории диссипативных систем и синергетики.

### ГЕНЕЗИС И ЭВОЛЮЦИЯ СТРУКТУР КАРСТОВОЙ КАНАЛОВОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ В СВЕТЕ НОВЕЙШИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Вплоть до 70-х годов прошлого столетия представления о карсте, отраженные в большинстве широко используемых определений этого понятия, формировались на основе эмпирического обобщения натуральных наблюдений. Закономерности развития карста нащупывались эмпирически, без глубокого понимания сущности и механизмов. За последние 40 лет, наряду с резким возрастанием массива эмпирического знания о карсте и его качества, произошло несколько важных экспериментальных и теоретических продвижений, революционизировавших современную карстологию. К ним относятся (Климчук, 2008б; White, 2002; Ford, 2006; Worthington, Ford, 2009):

1) Открытие особенностей кинетики растворения карбонатных пород (Bernier, Moore, 1974), теоретическое осознание их следствий для развития карста (White, 1977)

2) Результаты численного моделирования раннего развития каналов, разработка концепции “прорыва” (Dreybrodt, 1990; Dreybrodt, Gabrovsek, Romanov, 2005; Palmer, 1991).

3) Результаты физического (Ford, Ewers, 1978; Ewers, 1982) и численного (Dreybrodt, Gabrovsek, Romanov, 2005; Liedl et al., 2003; Kaufmann, Braun, 1999) моделирования развития сетей каналов и механизмов эволюции карстовых коллекторов;

4) Обоснование (Баренблат, Желтов, 1960) и внедрение в численное моделирование (Liedl et al., 2003) концепции многоуровневой пористости, формируемой в результате развития карста.

5) Разработка представлений об обстановках спелеогенеза и его основных генетических категориях, эволюционного подхода к типологии карста; согласование эмпирических (концептуальных) и численных моделей эволюции карстовых коллекторов (Ford, Williams, 1987, 2007; Klimchouk et al., 2000; Gabrovsek, 2002; Palmer, 2007; Worthington, Ford, 2009).

6) Обоснование и разработка концептуальных моделей глубинного и гипогенного карста (Дублянский Ю., 1990; Ежов и др., 1992; Klimchouk, 2000а, 2007;

Dublyansky Yu., 2000), численное моделирование механизмов гипогенного спелеогенеза в различных обстановках (Birk, 2002; Rehl, Birk, Klimchouk, 2008; Andre, Rajaram, 2005, Rajaram, Cheung, Chaudhuri, 2009).

На современном этапе развития карстовых исследований становится очевидным, что различные внешние признаки и свойства карста, характеризующиеся в работах эмпирического этапа и используемые в рассмотренных выше определениях, являются частными выражениями состояний *особой (карстовой) эволюции водообменной системы в растворимых породах, контролируемой и направляемой самоорганизацией структур проницаемости в растворимых породах*. Развитие организованных определенным образом полостей и каналов (рис. 1) в растворимой в данных условиях породе в результате взаимодействия с ней природных вод составляют сущность процесса спелеогенеза, который является центральным механизмом формирования и эволюции карстовых геосистем.

Рассмотрим кратко механизмы саморазвития структур проницаемости в растворимых породах и эволюции карстовых геосистем, как это обобщенно представляется на основе вышеупомянутых и других современных исследований. Закономерности такого развития наиболее полно исследованы для карста в карбонатных породах, однако действуют и для других растворимых пород.

### Докарстовые структуры проницаемости

Необходимым условием спелеогенеза является начальная («докарстовая») проницаемость пород, обеспечивающая возможность подземного водообмена. Проницаемость некарстованных пород определяется размерами, распределением и гидравлической связностью «докарстовой» (будем тут называть ее первичной) пустотности, главным образом седиментогенной и тектонической природы, – пор и трещин. Фильтрационные и емкостные свойства основных вложенных друг в друга гидрогеологических структур (поровой и трещинной) обычно резко различны, а образуемые ими компоненты стока (элементы водообменной системы) обнаруживают определенную самостоятельность и сложным образом взаимодействуют между собой. Для обозначения более крупных элементарных водовмещающих пустот с раскрытием свыше 1-5 мм употребляются термины «каверны» или «каналы»; мы будем использовать термины «канал» и «канальная пустотность», акцентируя гидравлическую связность. Каналы некарстового происхождения (крупные трещины) относительно редки, а их структуры (системы) консервативны и не обнаруживают способность к саморазвитию. При развитии собственно карстовой структуры каналовой проницаемости, некарстовые каналы интегрируются в нее.

Проницаемость некарстованных пористо-трещиноватых скальных пород варьирует обычно в пределах  $10^{-8}$  –  $10^{-5}$  м/с. Спелеогенез приводит к формированию дополнительного, наиболее контрастного, уровня проницаемости пород и приводит к ее возрастанию на три-пять порядков (до  $10^{-2}$

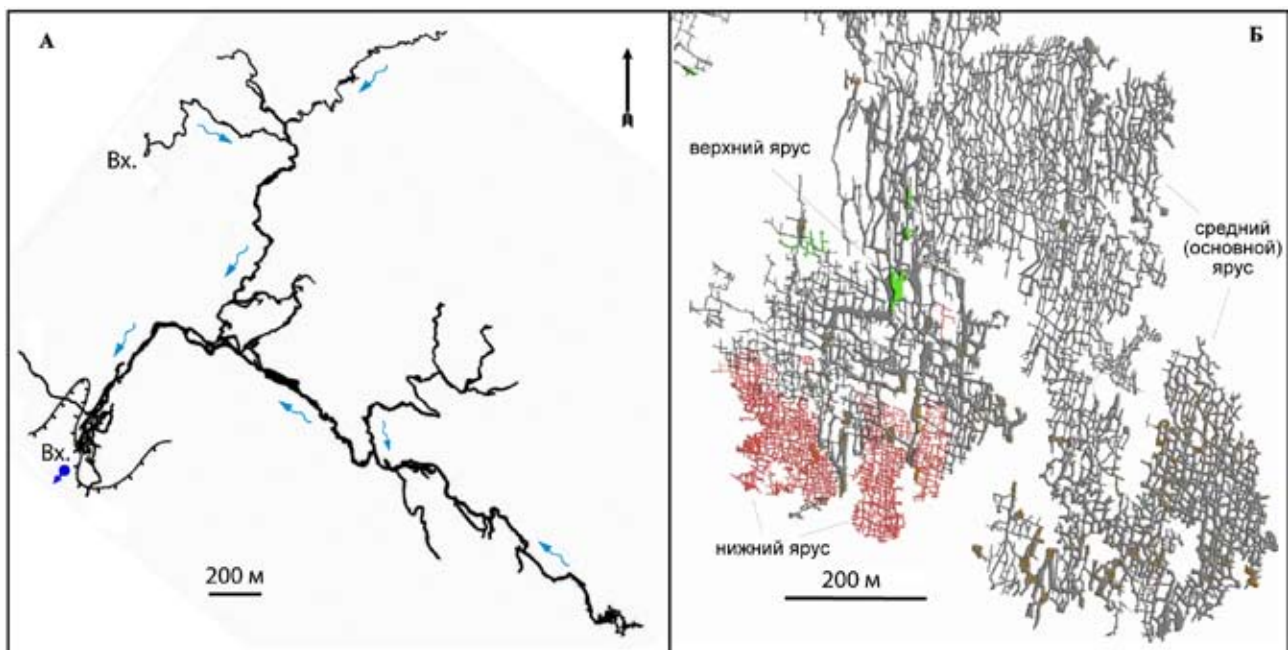


Рис. 1. Типичные структуры каналовых систем: А = эпигенного карста (пещерная система Голубиная - Кызыл-Коба, Крым, 21,5 км закартированных ходов), Б = гипогенного артезианского карста (пещера Озерная, Западная Подолія, фрагмент карты южной части пещеры, примерно 50 км ходов в пределах границ рисунка). Карта Голубиной - Кызыл-Кобы: по съемкам разных лет, сведена Г.В.Самохиным. Карта Озерной: по съемкам разных лет Тернопольского спелеоклуба "Подолье", сведена Б.В.Максимовым). Древовидная структура системы Голубиная – Кызыл-Коба организована для эффективного латерального стока от очагов питания на поверхности с его концентрацией на источнике на склоне массива. Лабиринтовая сетчатая структура пещеры Озерная обеспечивала (в период артезианского развития) совершенную вертикальную гидравлическую связь между подгипсовым и надгипсовым водоносными горизонтами с локальным латеральным перераспределением стока от многочисленных точек питания на нижнем контуре к редким точкам разгрузки на верхнем контуре. Кластеры высокой закарстованности сформированы в палеозоне пьезоинимума, обусловленной утончением верхнего глинистого водоупора углубляющейся палеодолиной.

м/с и выше), причем эти структуры обнаруживают яркие черты организованности (рис. 1). В результате изменяются граничные условия стока и структура водообменной системы в целом.

Предложенная Г.И Баренблатом и Ю.П Желтовым (1960) концепция «двойной пористости», основанная на раздельном рассмотрении движения воды в контрастных вложенных средах и учетом обмена между ними, широко используется в современных моделях, исследующих развитие карстовых каналовых систем во взаимодействии с трещинно-поровой средой.

#### Зарождение карстовых каналов (ранний спелеогенез)

В типичных начальных условиях водообмен в условно-сплошной пористо-трещинной среде характеризуется медленным ламинарным движением подземных вод. Для примера будем рассматривать движение вод по трещине (или комбинации соединяющихся трещин) с расходом, определяемым раскрытостью (шириной) и гидравлическим градиентом.

Преобразование трещины с первоначально малым раскрытием в канал фильтрации заключается в ее расширении растворением, причем *ключевым параметром динамики процесса является не скорость растворения, а скорость раскрытия (роста) протоканала*. Процесс контролируется законом баланса массы (которая может быть приведена к объему породы  $V$  через плотность  $\rho$ ):

рост протоканала в равной мере зависит от расхода ( $Q$ ), скорости растворения (изменения концентрации растворенного вещества в растворе,  $\Delta C$ ) и времени ( $t$ ).

$$\Delta V = Q t \Delta C / \rho$$

Иными словами, необходимыми условиями формирования карстовых каналов есть *движение подземных вод, их агрессивность по отношению к данной твердой фазе и достаточное время*.

Как ни парадоксально это звучит в свете традиционных взглядов на карст, но *высокая скорость растворения (а значит – высокая растворимость пород, так как эти свойства коррелируют) является препятствием для эволюции протоканалов в каналы, т.е. - для развития карста в целом*. При высокой скорости растворения и ее линейном снижении по мере возрастания насыщенности раствора, растворяющий эффект концентрировался бы на контуре поступления агрессивных вод в породу, а дальнейшее расширение первичных путей фильтрации было бы невозможным. Иными словами, развитие карста было бы невозможным в большинстве распространенных обстановок. Это иллюстрируется тем, что наиболее легко растворимая из распространенных пород, каменная соль, скорость растворения которой контролируется скоростью диффузии, в массивном залегании практически не затрагивается карстованием (за исключением сильно нарушенных или приповерхностных условий). Наибольшим же распространением и выраженностью отличается карст в карбонатных породах, которые

являются относительно труднорастворимыми. Гипсы демонстрируют промежуточную способность к закарстованию, для которого в этой породе нужны особые условия; Klimchouk, 2000b, 2002, 2010b).

Даже применительно к известнякам с их кинетическим характером растворения долгое время имела место проблема интерпретации роста протоканалов вдоль протяженных путей фильтрации, поскольку использование ранних экспериментальных данных по скорости растворения кальцита указывало на достижение насыщения в начальных сегментах и невозможность дальнейшего роста протоканалов. Важнейшее значение для развития теории спелеогенеза имели экспериментальные работы Бернера и Морза (Bernier, Morse, 1974) и Пламмера и Уигли (Plummer, Wigley, 1976), открывшие явление резкого снижения скорости растворения кальцита при достижении примерно 90% насыщения. Дальнейшие исследования (Plummer, Wigley, Parkhurst, 1978) показали, что при низких температурах и парциальных давлениях  $\text{CO}_2$ , резкое снижение скорости растворения происходит уже при 60-70% насыщения. Уайт (White, 1977) привлек эти результаты в теорию спелеогенеза, введя понятие «кинетического переключателя» режимов быстрого и медленного растворения, что является важнейшим пороговым эффектом в эволюции протоканалов. Новейшими работами выявлены также проявления нелинейной кинетики растворения в гипсах в области, очень близкой к насыщению (Jeschke et al., 2001).

На основании данных Пламмера с соавторами (1978), Палмер (Palmer, 1991) вывел общее уравнение роста каналов:

$$S = 31,56k(1 - C/C_s)^n / \rho$$

где  $S$  = скорость отступления стен (см/год),  $k$  = коэффициент реакции,  $C/C_s$  = степень насыщения (отношение действительной концентрации к концентрации насыщения),  $n$  = порядок реакции,  $\rho$  = плотность породы (около 2,7 для известняка), 31,5 = коэффициент размерности для перевода результата в см/год. Увеличение порядка реакции  $n$  вызывает снижение скорости растворения.

В начальных условиях расход через протоканал является малым, и раствор находится в состоянии, близком к насыщению на большей части пути фильтрации, за исключением первых нескольких метров. Резкое снижение скорости растворения в области медленной кинетики (со значениями порядка реакции  $n$  варьирующими с различной степенью приближения к насыщению и наличием примесей от 2 до 11) позволяет медленный рост протоканала по всей его длине, но эта подготовительная стадия спелеогенеза является наиболее длительной (рис. 2).

По мере роста протоканала увеличиваются расход и скорость движения воды в нем, соответственно область быстрой кинетики постепенно проникает вглубь протоканала. Но параметром, лимитирующим расход, остается раскрытие протоканала в его дальнейшей по течению части, которое увеличивается медленно. Основным механизмом развития протоканала является позитивная обратная связь между скоростью его роста и увеличением расхода. Ввиду значительных вариаций в начальных условиях, особенно

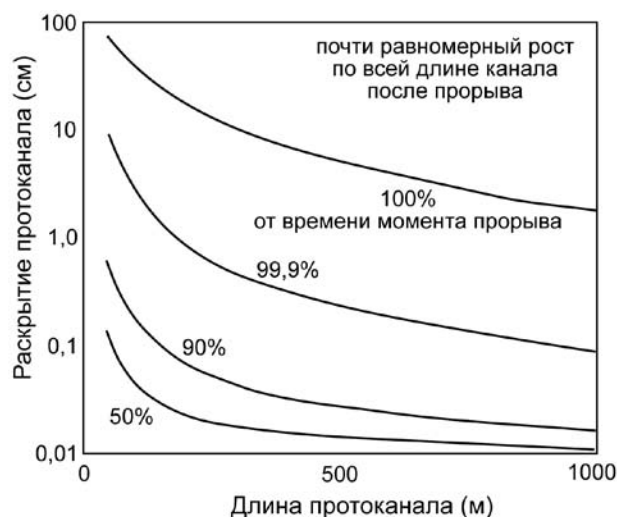


Рис. 2. Конфигурация и динамика роста протоканала (расширения профиля трещины) по результатам моделирования (Palmer, 1991). Начальное раскрытие протоканала = 0,01 см, гидравлический градиент = 0,1, начальное  $P_{\text{CO}_2}$  = 0,01 атм, температура = 10°C. Время наступления прорыва в этой модели – 96 тыс. лет. В природных условиях время прорыва варьирует под влиянием многих факторов, но общая конфигурация и основные черты динамики остаются неизменными.

в раскрытии и длине протоканалов, некоторые из них изначально имеют больший расход, а следовательно – получают преимущества в дальнейшем росте (рис. 3). Уже на этой стадии существующие неоднородности и анизотропия проницаемости горнопородного субстрата усиливаются спелеогенезом. Однако структура и динамика водообменной системы в целом еще принципиально не изменяется.

**Прорыв (спелеогенетическое инициирование, точка бифуркации)**

Достижение протоканалом раскрытия, при котором область быстрой кинетики охватывает всю его длину, знаменует критический момент (точнее – короткий период) в его эволюции, получивший название «прорыва» (breakthrough). Это значит, что с этого момента раствор проходит всю длину протоканала с сохранением значительного недонасыщения, в связи с чем кардинально меняется динамика его дальнейшего роста и изменения других переменных (рис. 4). Протоканал неизбежно становится карстовым каналом: скорость его роста и расход воды увеличиваются на несколько порядков. Напор в растущем канале падает, вызывая перестройку граничных условий и процесс интеграции каналов.

Время достижения условий прорыва (breakthrough time) есть мера длительности стадии протоканала (раннего спелеогенеза - зарождения канала) и является важнейшим параметром развития каналов и их систем. Для спелеогенеза в известняках, по данным моделирования при типичных в зоне гипергенеза значениях начальных условий (начального раскрытия, градиента, парциального давления  $\text{CO}_2$  и температуры) и длине пути фильтрации в 1 км, прорыв достигается за время порядка 20-70 тыс. лет (Dreybrodt, 1990, 1996; Dreybrodt, Eisenlohr, 2000; Palmer, 2007). Однако

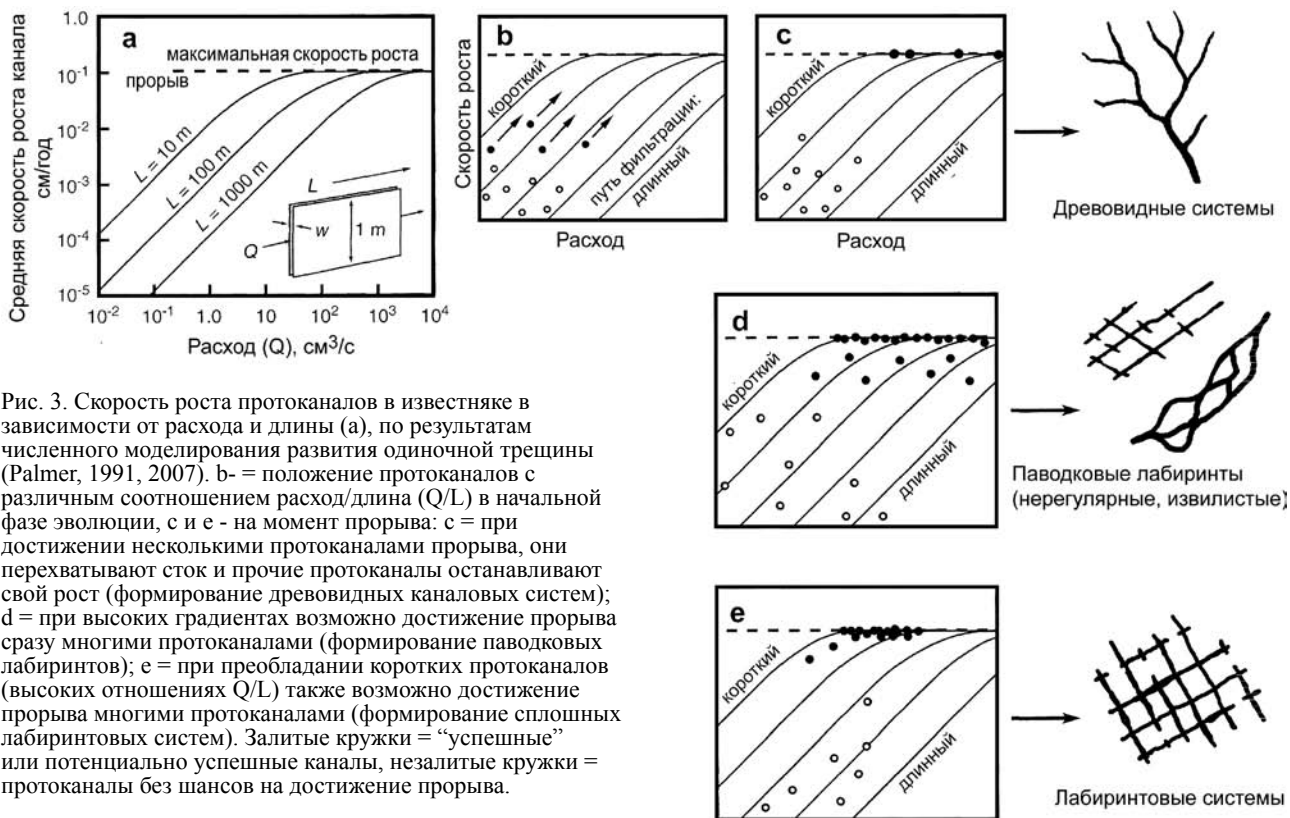


Рис. 3. Скорость роста протоканалов в известняке в зависимости от расхода и длины (а), по результатам численного моделирования развития одиночной трещины (Palmer, 1991, 2007). б- = положение протоканалов с различным соотношением расход/длина (Q/L) в начальной фазе эволюции, с и е - на момент прорыва: с = при достижении несколькими протоканалами прорыва, они перехватывают сток и прочие протоканалы останавливают свой рост (формирование древовидных каналов систем); д = при высоких градиентах возможно достижение прорыва сразу многими протоканалами (формирование паводковых лабиринтов); е = при преобладании коротких протоканалов (высоких отношениях Q/L) также возможно достижение прорыва многими протоканалами (формирование сплошных лабиринтовых систем). Залитые кружки = "успешные" или потенциально успешные каналы, незалитые кружки = протоканалы без шансов на достижение прорыва.

ввиду вариабельности начальных граничных условий и параметров, их сложного влияния на результат и наличия многих специальных конфигураций, вариации времени прорыва за пределы этого диапазона могут быть значительными.

У.Уайт (1988) отметил, что в обычных для природных условий гидравлических градиентах кинетический прорыв примерно совпадает с переходом ламинарного режима в турбулентный. Этот же диапазон условий характеризуется возникновением способности переноса взвешенных частиц. Поэтому можно говорить о прорыве как о комплексном спелеогенетическом пороге в карстовом развитии первичных путей фильтрации. Значения раскрытия каналов, достигающих прорыва, типично варьируют в пределах 1-10 мм, что является сущностным обоснованием примерной размерной границы между структурами трещинной и каналовой проницаемости.

Концепция прорыва дополнительно разъясняет вышеупомянутое «парадоксальное» положение о высокой скорости растворения и легкорастворимости пород как препятствию в развитии карста. При высокой скорости растворения и ее линейном снижении с возрастанием насыщения раствора в протоканалах, эффект растворения концентрировался бы на контуре поступления агрессивных вод в породу.

В основе явления прорыва и возможности формирования каналовой проницаемости лежит эффект нелинейного снижения скорости растворения при существенном возрастании степени насыщения раствора («кинетический переключатель» Уайта). Без такого снижения протяженные протоканалы не могли

бы быть инициированы и развиты до крупных каналов в пределах времени геологической жизни большинства горнопородных формаций. Соответственно, было бы невозможным собственно карстовое развитие, а именно: образование и развитие структур карстовой каналовой проницаемости и переход водообменной системы в качественно новое функциональное и динамическое состояние. Точнее, развитие каналовой проницаемости было бы возможным лишь в ограниченных обстановках высокого начального раскрытия трещин и (или) коротких путей фильтрации, таких как маломощная приповерхностная зона, прирвовочные участки крутых и обрывистых склонов и маломощные пласты растворимых пород, разделяющие водообильные горизонты с большим напорным градиентом (при условии высокой агрессивности вод питающего горизонта). В этом случае общая картина распространения и характер проявлений того, что мы сегодня связываем с карстом, были бы кардинально иными. Это служит дополнительным аргументом развиваемого тут положения о том, что сущность карста заключается именно в явлении саморазвития структур каналовой проницаемости в растворимых породах.

*Момент прорыва является критической точкой в эволюции не только отдельного канала, а и структуры проницаемости геосистемы в целом. Прорыв является точкой бифуркации в эволюции геосистемы с растворимым горнопородным субстратом, знаменующей начало кардинальной перестройки ее структуры, изменяющей функционирование водообменной системы и даже граничные условия. С этим связан переход геосистемы в новое структурно-*

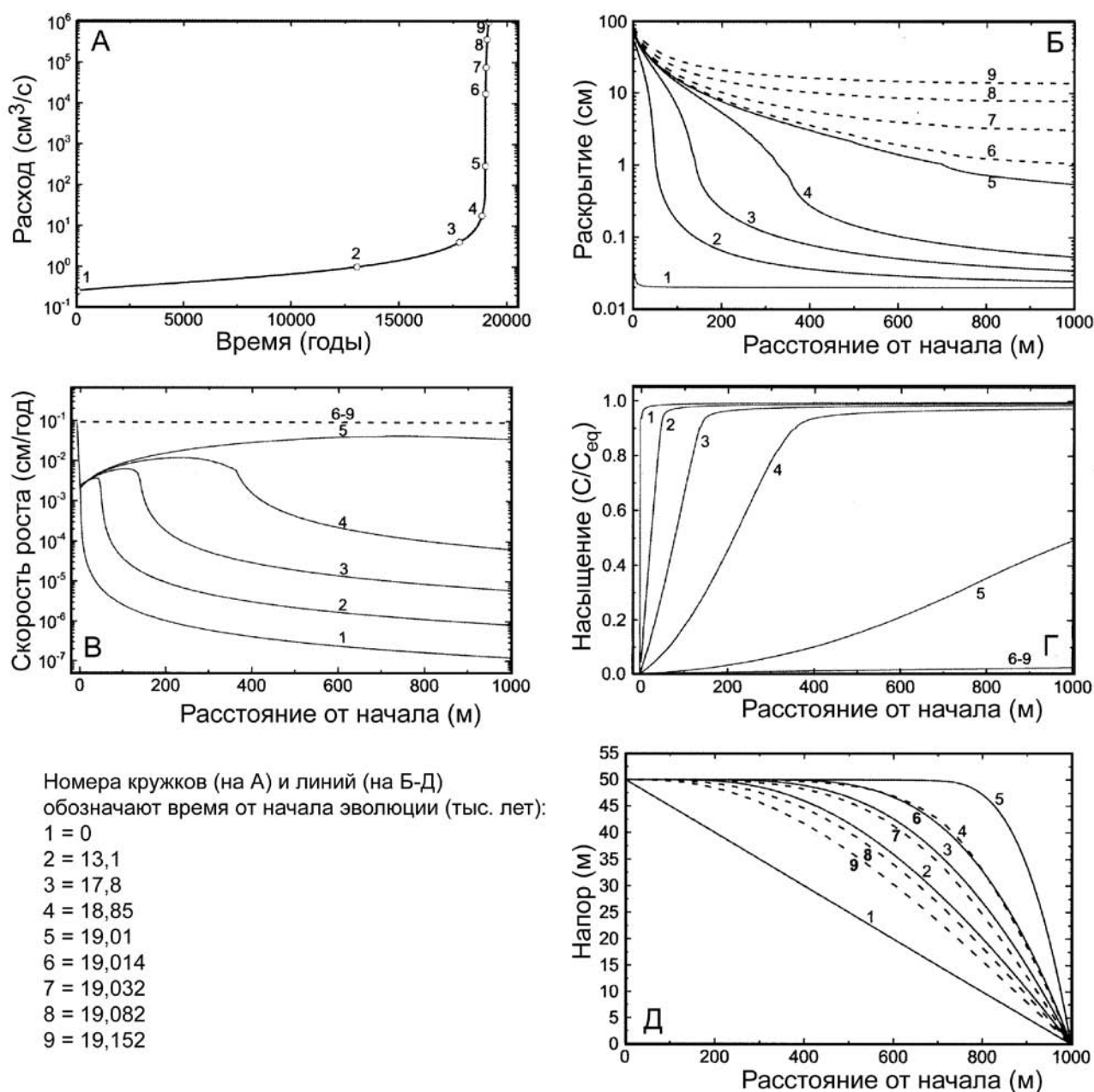


Рис. 4. Типичная эволюция одиночного протоканала (трещины) под воздействием растворения в известняках (начальное раскрытие = 0,02 см, длина = 1000 м, гидравлический градиент = 0,05) по результатам численного моделирования (Dreybrodt, Gabrovsek, Romanov, 2005). А = эволюция расхода (резкое увеличение расхода соответствует прорыву), Б – Д = изменение переменных по профилю протоканала: Б = раскрытие, В = скорости роста, Г = концентрации раствора, Д = гидравлического градиента. Динамика роста расхода и изменения прочих переменных показывают, что прорыв примерно соответствует моменту под номером 5 (19,01 тыс. лет от начала эволюции).

функциональное качество. Это момент «рождения» карста после периода «эмбрионального» развития (гидрогеологического «созревания» массива).

Следует отметить, что описанный выше механизм образования карстовых каналов через действие обратной связи между расходом и скоростью роста, достижение протоканалом условий быстрой кинетики растворения (называемых сейчас «прорывом») и дальнейшее конкурентное сосредоточение стока в карсте, был концептуально описан В.С.Лукином (1966) задолго до открытия кинетического порога и работ по моделированию. Однако должного внимания и дальнейшего развития эти идеи не получили, пока

упомянутые процессы не были выявлены и детально изучены экспериментально и на моделях.

#### Закономерности эволюции одиночного канала

К настоящему времени численным моделированием охвачены многочисленные типичные и специальные варианты граничных условий и параметров спелеогенеза (Dreybrodt, Gabrovsek, Romanov, 2005). Наиболее важным результатом явилось выявление зависимостей между временем прорыва, начальной раскрытостью протоканалов, гидравлическим градиентом и длиной пути фильтрации.

Эволюция одиночного канала, графически показанная на рис. 3 и 4, управляется механизмом обратной связи между расходом и скоростью роста. Графики на рис. 4 иллюстрируют эволюцию расхода (А) и изменение основных переменных (раскрытия канала, скорости роста, концентрации раствора, гидравлического градиента; Б-Д) по профилю протоканала в ходе его эволюции от начального состояния до прорыва.

Различные факторы имеют неодинаковое влияние на рост протоканала и канала. Наиболее сильным фактором является начальное раскрытие протоканала, что связано с его ролью в определении расхода. При прочих равных начальных условиях, из двух протоканалов с раскрытием, различающимся в два раза, более широкий канал достигнет прорыва в 8 раз быстрее узкого. Существенным и одинаковым влиянием обладают гидравлический градиент и длина протоканала: удвоение градиента уменьшает время прорыва примерно в 2,5 раза, а удвоение длины протоканала увеличивает это время в столько же раз (Palmer, 2007). В качестве интегрального фактора, наиболее сильно контролирующего скорость роста протоканала, может быть принято отношение расхода к длине (рис. 3).

Температура играет сложную роль. Высокая температура ускоряет химическую реакцию, но для каналов значительной протяженности это увеличивает время прорыва, поскольку при высокой скорости растворения агрессивность быстрее снижается уже в начальном сегменте протоканала, что оставляет меньший потенциал растворения для роста оставшейся части. Повышение температуры увеличивает скорость движения жидкости ввиду снижения вязкости, но снижает растворимость кальцита и доломита. Преобладающим эффектом является увеличение времени прорыва с ростом температуры.

В случае углекислотного растворения карбонатов, доступность дополнительного  $\text{CO}_2$  (по отношению к начальному содержанию) по пути фильтрации существенно сокращает время прорыва, при этом эффект будет максимальным, если его подвод приходится на дальнюю от контура питания часть протоканала. Это может происходить за счет подключения источников геогенного  $\text{CO}_2$ . В других механизмах растворения сходный эффект имеют процессы, которые возобновляют агрессивность раствора по отношению к данной породе, например – процессы сульфатредукции при спелеогенезе в гипсах. Эффекты возобновления агрессивности при смешивании вод разного состава («коррозия смешивания») также снижают время прорыва.

При наступлении прорыва скорость роста быстро увеличивается, достигая максимума на уровне около 0,001 – 0,1 см/год (в зависимости от начального отношения  $C_0/C_{\text{eq}}$ ; Palmer, 1991, 2007). В дальнейшем механизм обратной связи между расходом и скоростью роста прекращает свое действие (рис. 3 и 4). Скорость роста поперечного размера канала становится почти равномерной по всей его длине и остается высокой в ходе последующей эволюции канала до тех пор, пока обеспечивается условие его полного

заполнения (стадия спелеогенного развития). Однако с увеличением сечения канала его водопроницаемость начинает превышать количество доступного питания и напор резко снижается. При удвоении диаметра канала и неизменном расходе, гидравлический градиент снизится до 3% от первоначально значения, поэтому крупные каналы не могут поддерживать высокие градиенты. Возникает свободная поверхность воды в канале, которая быстро снижается почти до уровня источника. Дальнейшее развитие канала происходит в вадозных условиях, где свободный поток может продолжать эрозионно-коррозионное углубление нижней части сечения канала. С углублением базиса дренирования и развитием каналов на нижних уровнях, данный канал становится реликтовым и переходит в регрессивную фазу эволюции, в которой преобладают процессы седиментации и гравитационной деструкции.

Таким образом, вскоре после прорыва и фазы быстрого роста происходит динамичное изменение структуры системы и граничных условий. Поэтому дальнейшее рассмотрение развития структур каналовой проницаемости необходимо осуществлять в масштабе водообменной системы (водоносного горизонта, массива, проч.).

#### Эволюция структур каналовой проницаемости (спелеогенез)

Явление прорыва является критической точкой не только в эволюции отдельного канала, а и точкой бифуркации в эволюции водообменной геосистемы с растворимым горнопородным субстратом, знаменующей начало кардинальной перестройки структуры ее проницаемости (следовательно, и самой структуры водообмена), в конечном счете изменяющей граничные условия и функционирование системы.

В исходной (до спелеогенеза) водообменной системе сток распределен по порово-трещинной или трещинной среде, в которой, однако, обычно уже имеются начальные неоднородности проницаемости – пути преимущественной фильтрации. Они разрабатываются и усиливаются в течение стадии раннего спелеогенеза (развитие протоканалов), но при этом еще не происходит существенных изменений в граничных условиях и структуре стока. После прорыва и формирования одного или нескольких каналов, динамика спелеогенеза и водообмена кардинально изменяется, вызывая перестройку граничных условий и процесс интеграции каналов (рис. 5 и 6).

Из пяти имеющихся точек питания (слева и в центре), развитие протоканалов к контуру разгрузки (справа) вначале инициируется только от точек D и E, поскольку левая часть модельной области образует поле равных напоров и сток от точек A, B и C на левой границе минимальный (рис. 5-1). Через 2600 лет канал E справа внизу достиг прорыва к контуру разгрузки, ввиду чего граничные условия для него теперь изменяются от фиксированного напора на фиксированное питание. Этим реорганизуется поле гидравлических градиентов таким образом, что напор становится низким вдоль первого успешного канала. Теперь сток от точек B и C направлен в область низкого напора вокруг него (рис. 5-2). Через 5336 лет (рис. 5-3) канал от точки

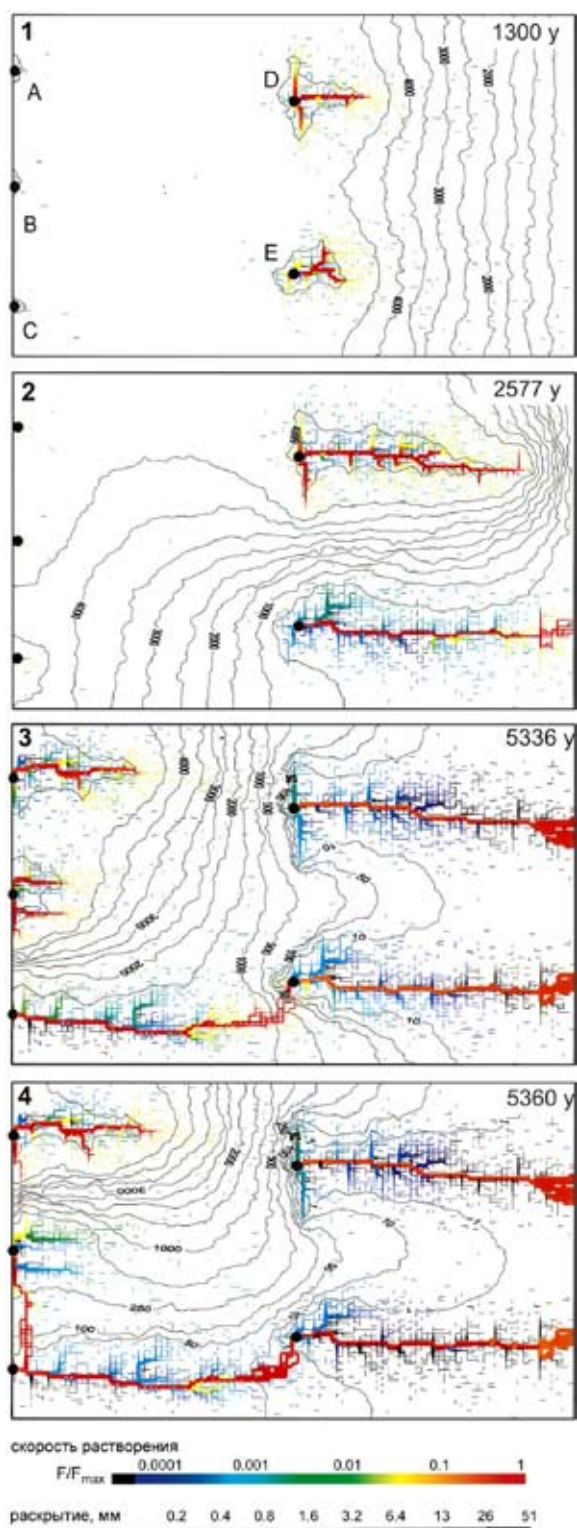


Рис. 5. Эволюция карстовой каналовой системы в сплошной трещинной среде (Dreybrodt, Gabrovsek, Romanov, 2005). Сеть трещин задана с плотностью  $10 \times 5 \text{ м}^2$  и логнормальным распределением раскрытия (в границах  $a_{\text{мин}} = 0,25a_0$ ,  $a_{\text{макс}} = 2,5a_0$ ,  $a_0 = 0,02 \text{ см}$ ). Модельная область имеет длину 2 км и ширину 0,5 км, с напором на контуре питания (левая граница) 50 м и на контуре разгрузки (правая граница) 0 м. Имеются две точки питания в центральной части модельной области (D и E) и три точки питания на левой границе (A, B и C). На контур питания поступают воды с  $P_{\text{CO}_2} = 0,05 \text{ атм}$  и концентрацией 0. Изолинии напора даны в см с шагом 500 м. 1-2 = фазы эволюции (пояснения в тексте).

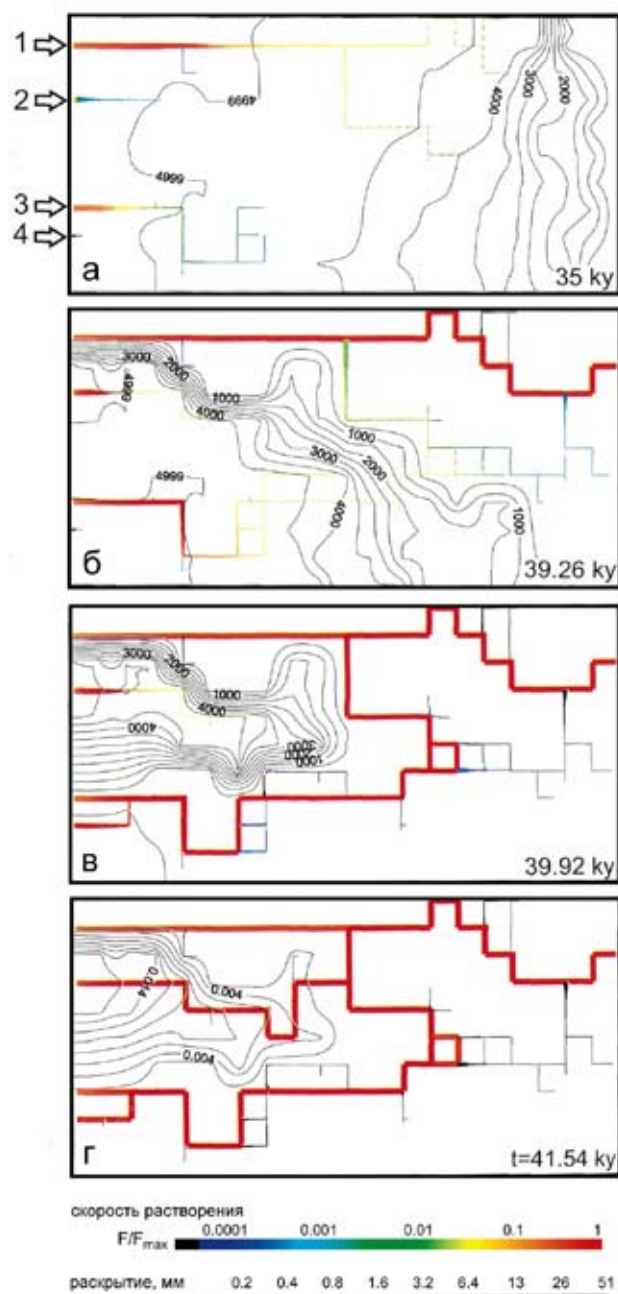


Рис. 6. Эволюция карстовой каналовой системы в среде "двойной пористости" на основной стадии спелеогенеза (после прорыва) по результатам численного моделирования (Dreybrodt, Gabrovsek, Romanov, 2005). Сеть крупных трещин состоит из отрезков 50 м длиной, с раскрытием 0,02 см. Сплошная статистическая сеть мелких трещин длиной 5 м и логнормальным распределением раскрытия не показана. Имеются четыре точки питания в крупные трещины. Напор контуре питания 50 м, на контуре разгрузки 0 м, начальная концентрация питания = 0,  $P_{\text{CO}_2} = 0,05 \text{ атм}$ . a-d = фазы эволюции (пояснения в тексте).

Рис. 5 иллюстрирует один из характерных сценариев и результатов численного моделирования эволюции каналов в двухмерных сетях. Модельная область представляет собой фильтрационную среду полностью соединяющихся первичных трещин (статистическая сеть). Такая структура фильтрационной среды соответствует породам, которые принимаются равномерно трещиноватыми.



С прорывается к первому успешному каналу. В это же время верхний слева канал D достиг прорыва к контуру разгрузки, соответственно для него граничные условия также изменились на фиксированное питание, обусловив дальнейшую перестройку поля напоров. Теперь вектор высокого градиента направлен от точки В к каналу, развитому из точки С, что приводит к прорыву в этом направлении и соединению после 5360 лет (рис. 5-4). После очередного изменения граничных условий высокие градиенты возникают между точками А и В, а также между А и D. Соответственно, эти точки будут соединены в результате соответствующих прорывов, а все точки питания и точки разгрузки будут интегрированы в единую высокоэффективную структуру каналовой проницаемости с низкими напорами, которая станет относительно стабильной.

Аналогичная эволюция выявляется моделированием в условиях, отражающих более сложную начальную (доспелеогенную) структуру фильтрационной среды – двухуровневую, соответствующую концепции «двойной пористости» Г.И Баренблата и Ю.П Желтова (1960). В численном моделировании такие условия задаются «погружением» кластерных перколяционных сетей, отражающих неравномерное пространственное распределение более крупных первичных трещин, в сплошную среду связанных трещин со статистическим распределением раскрытия, и заданием параметров гидравлического и химического взаимодействия между ними. В наложенной перколяционной сети имеются фильтрующие системы, гидравлически связанные от контура питания до контура разгрузки, «тупиковые» (не проводящие сток) кластеры и фрагменты, и полностью изолированные трещины. Рис. 6 показывает формирование интегрированных каналовых систем в таких сетях (визуализированы только развивающиеся элементы перколяционной сети, а ее неизменяющиеся элементы и сплошная фоновая «статистическая» сеть не показана).

На рис. 6-а (35 тыс. лет) верхний протоканал от точки 1 находится в состоянии, близком к прорыву, который произойдет на отметке 37 тыс. лет. Протоканалы от нижних точек питания при этом развились лишь на небольшую длину. После прорыва верхнего канала на контур разгрузки (справа) граничные условия для него изменяются на фиксированный расход, напор в нем падает и градиентное поле реорганизуется так, что теперь протоканал 3 стремится развиваться на соединение с каналом 1, а не с контуром разгрузки (рис. 6-б). На уровне 39,92 тыс.лет (рис. 6-в) этот прорыв происходит, и теперь точки 3 и 4 интегрированы в каналовую систему. Изменение граничных условий для них снова реорганизует поле напоров, - теперь таким образом, что протоканал из точки 2 развивается до прорыва к уже сформированной каналовой системе, создавая еще один «приток» в нее (рис. 6-г). Напоры по всей модельной области становятся низкими, практически весь сток теперь проводится каналовой структурой и водообменная система стабилизируется.

Эти модели иллюстрируют важнейшее обстоятельство в эволюции водообменной системы, содержащей растворимые породы: *независимо от исходной структуры проницаемости, спелеогенная*

*эволюция приводит к формированию нового, наиболее контрастного уровня проницаемости, - системы каналов с раскрытием свыше 5-10 мм (до нескольких метров), структура которых организована для наиболее эффективного водообмена в направлении градиента.*

Структура каналовых систем может различаться в зависимости от многих факторов, среди которых наиболее значимы гидродинамические и гидрохимические граничные условия (распределение и агрессивность питания), начальная структура гидравлически связанных путей фильтрации в растворимой породе, наличие крупных геологических неоднородностей в области спелеогенеза и ограничений для разгрузки. Эти и другие факторы сложным образом взаимодействуют, обуславливая вариации в длительности раннего (до прорыва) развития и особенности последующей каскадной интеграции системы, т.е. особенности ее структуры. Многочисленными исследованиями на моделях установлено, что увеличение длительности стадии раннего спелеогенеза (до наступления прорыва) ведет к усложнению структуры каналовой системы и снижению степени ее внутренней контрастности. В любом случае, структура каналовой системы задается главным образом на стадии раннего спелеогенеза и в фазе каскадной интеграции. В ходе последующего развития отдельные каналы могут существенно увеличивать размеры, а сама система может продолжать пространственную экспансию, но ее структура принципиально не изменяется. Ее дальнейшее изменение может происходить только в результате кардинального изменения граничных условий в результате действия внешних геологических и геоморфологических факторов.

*Однако при всех вариациях структуры карстовой каналовой проницаемости, она проявляет яркие признаки организованности, а ее развитие обуславливает возникновение у водообменной геосистемы ряда принципиально новых и уникальных свойств. Главным итогом и сущностью карстовой эволюции является самоорганизация структуры проницаемости (а не само по себе увеличение пустотности, как часто полагают). Выражением этой организованности является сосредоточение подземного стока и кардинальное увеличение интенсивности водообмена, поддерживаемые за счет нового уровня ее взаимодействия с внешней средой. Интегрированная каналовая система, несмотря на то, что составляет лишь небольшую долю от общей пустотности горнопородного субстрата (порядка 0,05-3, до 10-15% в особых ситуациях), обеспечивает экстремально высокую проницаемость и проводит почти весь подземный сток (от 94% до 99,7%) (Worthington, Ford, Beddows, 2000). Эта способность является ярким интегральным показателем организованности структуры каналовой проницаемости в карстовых системах. Конкретными проявлениями организованности являются высокие скорости движения подземных вод, протяженность совершенных гидравлических связей и доля крупных источников, а также выраженная гетерогенность и анизотропия пустотности и физических свойств пород.*

Анализ результатов 3015 экспериментов по трассированию подземных вод в карстовых районах

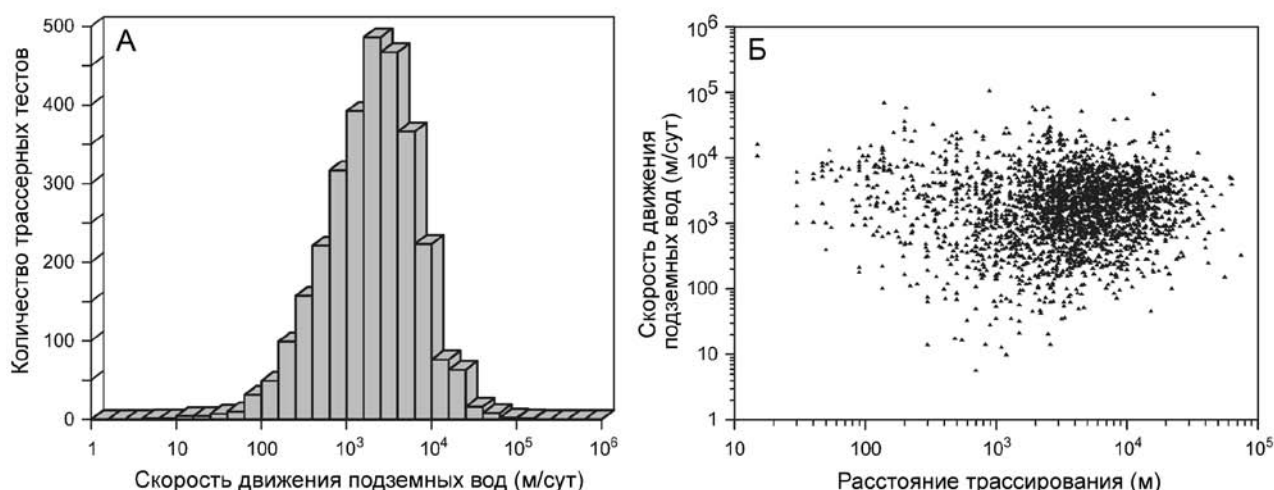


Рис. 7. Частотное распределение скоростей движения подземных вод (А) и зависимость скорости от расстояния трассирования (Б) по данным 3015 трассерных экспериментов (Worthington, Ford, 2009).

34 стран (Worthington, 1999; Worthington, Ford, 2009; рис. 7) показал, что медианные и геометрические скорости движения подземных вод в карсте составляют, соответственно, 1940 м/сут и 1740 м/сут, что на 5-7 порядков выше типичных скоростей движения вод в некарстовых системах зоны интенсивного водообмена. Подавляющее большинство учтенных экспериментов проведены на расстоянии свыше 1 км, а 595 экспериментов - на расстоянии свыше 10 км. Такие данные однозначно свидетельствуют о наличии систем крупных каналов, интегрированных (организованных) на больших расстояниях.

Степень сосредоточенности подземного стока в карстовых системах может быть иллюстрирована анализом сводных данных по источникам больших регионов, где представлены как карстовые, так и

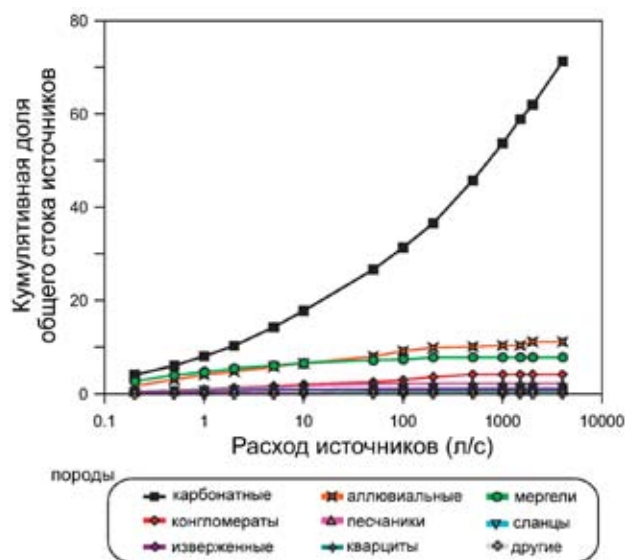


Рис. 8. Расходы источников из коллекторов разных пород в Испании (построено Уорсингтоном и Фордом (2009) по данным Sanz Pérez, 1996). Карбонатные породы демонстрируют anomalously высокую частоту крупных источников в сравнении с другими породами, что отражает организованность структуры каналовой проницаемости.

некарстовые геосистемы. Например, в Испании зарегистрировано около 8000 источников (Sanz Pérez, 1996). Карстовые районы составляют 19% территории, но содержат 49% источников, расход которых составляет 71% от совокупного расхода всех источников. Рис. 8 по данным этой работы ярко демонстрирует беспрецедентную для некарстовых пород степень концентрации подземного стока в карбонатных породах.

#### КАРСТОВАЯ ЭВОЛЮЦИЯ ВОДООБМЕННОЙ СИСТЕМЫ С ПОЗИЦИЙ СИНЕРГЕТИКИ И НЕРАВНОВЕСНОЙ ТЕРМОДИНАМИКИ

Обобщим кратко сущность карстовой эволюции водообменной системы с позиций синергетики и неравновесной термодинамики.

На стадии раннего спелеогенеза, в результате действия механизма обратной связи расхода и скорости роста канала, флуктуаций начальных структурных и химических условий взаимодействия системы вода-порода, происходит развитие протоканалов, - зарождается «пред-структура» новой каналовой проницаемости. При возникновении первых каналов (после прорыва) водообменная система дестабилизируется. Дальнейшая эволюция (основная стадия спелеогенеза) выражается в серии каскадных событий прорывов протоканалов на контур разгрузки и к уже сформированным каналам, вызывающих изменения локальных граничных условий водообмена и перестройки поля потенциалов. По сути, эта дестабилизация и каскадная реорганизация представляют собой гигантскую флуктуацию открытой динамической системы в смысле идей И.Р. Пригожина и синергетики. Эволюция на этой стадии направлена на интеграцию каналовой системы, в которую вовлекаются все протоканалы, «намеченные» на стадии раннего спелеогенеза. Механизмом интеграции является гидродинамическая конкуренция динамично растущих каналов за подземный сток (в конечном счете – за питание). Этот процесс саморазвития структуры проницаемости приводит

к изменению граничных условий водообмена в целом и последующей стабилизации водообменной системы за счет внешнего обмена энергии на другом уровне. В синергетике такое новое, более сложное, состояние называется «стационарным», характеризующимся подвижным равновесием. В итоге система приобретает новую, более сложную структуру и изменяет функционирование, т.е. – приобретает новое качество и может быть отнесена к более высокому уровню организации геосистем.

Таким образом, сущностной стороной развития карста является процесс самоорганизации открытой динамической системы. Система вода-порода – это типичная диссипативная структура, которая при наличии в ней проницаемых растворимых пород эволюционирует особым образом, посредством механизмов спелеогенеза (которые и составляют механизм ее самоорганизации), приобретает новое, более сложное динамическое состояние (качество, уровень организации), требующее больше энергии, чем это было необходимо для поддержания ее «докарстового» состояния.

## **ОБЪЕМ И СОДЕРЖАНИЕ ПОНЯТИЯ «КАРСТ»: ОПРЕДЕЛЕНИЕ И НЕКОТОРЫЕ КОММЕНТАРИИ**

### **Определение карста**

Разворачиваемый в этой статье новый подход к пониманию сущности карста на основе явления самоорганизации структур проницаемости в неявной форме использовался П.Хантоном и А.Б.Климчуком в их определениях понятия «карст» (Климчук, 2008а, 2010; Huntoon, 1995; Klimchouk, Ford, 2000; Klimchouk, 2007). Он был использован как концептуальный базис недавней фундаментальной международной монографии «Спелеогенезис: эволюция карстовых коллекторов» (Klimchouk et al., 2000) и служит основой современных определений карстовых коллекторов (Worthington, Ford, 2009).

Основываясь на формулировке А.Б.Климчука (2010) и проведенном выше анализе, дадим следующее определение карста:

*Карст – это водообменная геосистема в определенном объеме гидrolитосферы, возникновение и прогрессивная эволюция которой характеризуются самоорганизацией структуры водопроницаемости с формированием интегрированных систем каналов вследствие действия специфического механизма спелеогенеза, включающего позитивную обратную связь между водообменом и растворением.*

Здесь понятие о карсте определяется исходя из сущности прогрессивной эволюции геосистемы с проницаемыми растворимыми породами, движимой водообменом и спелеогенными механизмами самоорганизации структуры проницаемости. Под *прогрессивной эволюцией* мы понимаем процесс возникновения и развития новых структур (возрастание структурной сложности), а под *регрессивной эволюцией* – процесс их разрушения и распада (снижение структурной сложности).

Кульминацией прогрессивной карстовой эволюции является переход системы к новому, более сложному динамическому состоянию (и стабилизация в нем), энергия для поддержания которого обеспечивается изменением граничных условий и увеличением внешнего обмена (со средой). В этом уже заложены предпосылки для смены прогрессивного тренда эволюции регрессивным, поскольку требуемый для дальнейшего прогрессивного карстового развития геосистемы уровень внешнего обмена энергией не всегда может поддерживаться, тем более – в течение длительного времени. Соответственно, процесс прогрессивной эволюции с какого-то времени может охватывать уже не всю карстовую водообменную геосистему, а сосредотачиваться в ее части, тогда как в остальной части геосистемы начинает преобладать регрессивная эволюция.

Так, в открытом карсте, спелеогенное развитие структур каналовой проницаемости продолжается в зонах периодического и полного насыщения (субфреатической и фреатической зоне), тогда как в вадозной зоне оно становится избирательным и ограниченным по условию доступности питания. Большинство карстовых каналов в вадозной зоне теряют первоначальную водообменную функциональность и становятся реликтовыми. Одновременно, в ней возникают и нарастают процессы гравитационной деструкции и аккумуляции (механической и химической), ведущие к фрагментации и разрушению реликтовых структур карстовой проницаемости. Кроме того, в открытом и раскрытом карсте мощным деструктивным фактором по отношению к карстовым структурам являются разнообразные денудационные и аккумулятивные процессы на поверхности<sup>3</sup>. Завершение текущего гидрогеологического цикла морской трансгрессией сопровождается погребением и переводом открытых неглубоких карстовых систем в ископаемое состояние (палеокарст). Полная фоссилизация структур карстовой проницаемости может произойти в результате существенного изменения гидрохимических граничных условий и хемогенной аккумуляции в них. Совместное действие внутренних и внешних деструктивных и аккумулятивных процессов в конечном итоге ведут к уничтожению карстовой водообменной геосистемы.

Деструкция структур карстовой пустотности и каналовой проницаемости может начаться и нарастать одновременно с их прогрессивным развитием, до перехода этих структур в реликтовое состояние. Примером является формирование карстовых брекчий или поверхностей несогласия (при полном удалении растворимых пород) путем гравитационной деструкции маломощного сильнозакарстованного горизонта и каналовых структур в глубинном (закрытом) карсте.

<sup>3</sup> Некоторые поверхностные явления и процессы являются частью прогрессивной карстовой эволюции, тогда как другие – проявлениями деструкции карстовой геосистемы. Они сложным образом взаимодействуют друг с другом. В карстовом геоморфогенезе поверхности прогрессивным развитием характеризуются те формы (структуры рельефа), которые являются элементами питающего аппарата карстовой водообменной системы.

Здесь лимитирующими факторами прогрессивного развития карстовой водообменной геосистемы выступает не недостаток энергии, а пространственное ограничение, а также нарушение физического равновесия горнопородного субстрата.

Являются ли явления и процессы дезинтеграции структур карстовой пустотности и каналовой проницаемости карстом? В строгом понимании карста какобъекта-системы (определенном выше), не являются. *Понятие карста в этом смысле соответствует результату процесса прогрессивной эволюции - возникновению более сложных и более организованных структур, новому состоянию материнской системы.* Как было показано выше, сущность карста заключается в явлении самоорганизации открытой динамической водообменной геосистемы, причем эта самоорганизация имеет конкретный специфический механизм (спелеогенез). Если развитие таких карстовых структур создает геодинамический или геохимический потенциал для протекания других процессов вполне определенной природы (развития определенных динамических геосистем другого рода), то карстовыми они не становятся только потому, что инициированы и пространственно локализованы развитием карста (в узком смысле). Такой подход корреспондирует пониманию карста Б.А.Вахрушевым (2009) как моногенетического процесса (исключая относимую им к карсту хомогенную седиментацию) и отнесению им прочих процессов в карсте к парагенезисам.

Вместе с тем, возможно широкое понимание карстового процесса как некоего гетерогенного геологического процесса (взаимосвязанной совокупности процессов преобразования горных пород, включая их разрушение), инициированного и направляемого саморазвитием структуры проницаемости карстовой водообменной геосистемы, выражающегося в возрастании гетерогенности и анизотропии емкостных, фильтрационных и механических свойств пород, направленного на их дезинтеграцию и замещение стабильными в данных условиях минерально-аккумулятивными образованиями. При этом проявлениями и результатом карстового процесса будут являться структуры-системы, порожденные дезинтеграцией собственно карстовых систем (стратиграфические несогласия, отложения и другие геологические тела - продукты деструкции карстовых систем и их горнопородного субстрата).

Поставим вопрос по другому: означает ли данное выше определение понятия «карст» то, что в объектную область карстологии не включаются карстовые структуры в реликтовых и ископаемых состояниях, явления их дезинтеграции и аккумуляции в них, т.е. – структуры и явления регрессивной фазы эволюции геосистемы карста? Не смотря на то, что такие явления не включаются в определение понятия о карсте, они охватываются самим понятием в его полной, в том числе ретроспективной, реализации. Они, безусловно, являются объектами карстологии.

Поясним этот кажущийся парадокс дополнительно. Объектная и таксономическая определенность естественной вещи-системы включает, прежде

всего, способ ее обособления из материального мира (генезис), ее структуру и функционирование в системной целостности, а также нашу способность отразить сущностные генетический и структурно-функциональные аспекты в предмете. Хотя именно через эти аспекты объект и определяется, но предмет ими отнюдь не исчерпывается. *Карст определен выше с сущностных генетических и структурно-функциональных позиций* (прогрессивная эволюция – направленный процесс возникновения и развития новых структур и нового качества-состояния геосистемы), что позволяет выявить природу и границы изучаемой системы, ее место в таксономии естественных вещей-систем. Вместе с тем, системное исследование не ограничивается генетическим и структурно-функциональным аспектами, а требует развертывания полной истории. Генетическое есть лишь часть истории; последняя охватывает также реликтовые состояния и уничтожение вещей-систем (Круть, 1978). Для исторического исследования главное значение приобретает ретроспективный анализ, в основе которого, однако, все равно стоит понимание самой вещи-системы в ее становлении и структурно-функциональной целостности.

Развиваемый тут подход, как и данное определение карста, могут показаться гидрогеологическими. Это так, но это определяется не дисциплинарными пристрастиями или предпочтениями авторов, а гидрогеологической сущностью карста (Климчук, 2010). Гидрогеологическая сущность карста задается тем, что фундаментальной его причиной является неравновесие в системе «вода-порода», создаваемое и поддерживаемое водообменом. Водообмен в геосистемах является движущей силой и системообразующим фактором возникновения и развития карста. Карст возникает в процессе саморазвития водообменной геосистемы и является новым специфическим качеством-состоянием последней. Следовательно, развиваемый в этой статье подход и данное выше определение карста являются, по-сути, не гидрогеологическими, а карстоцентрическими и системоцентрическими (в трактовке подходов к изучению карста В.Н. Андрейчука, 2010).

#### Роль каналовой проницаемости в карстовом геоморфогенезе поверхности и ландшафтогенезе

Карст получает выражение в рельефе, непосредственно взаимодействует с внешними рельефообразующими факторами и сам становится фактором геоморфогенеза на определенной стадии развития водообменной геосистемы, когда растворимый горнопородный субстрат изначально находится в экспонированном состоянии или переводится в неглубокое или экспонированное залегание после погребения в ходе геологической и геоморфологической эволюции. Ввиду этого, выраженность карста в рельефе не является атрибутивным признаком карста, как это часто считалось ранее.

Кроме того, в рамках «классической» парадигмы карста поверхностный карстовый морфогенез часто рассматривался как самостоятельный процесс,

непосредственно не связанный с подземным закарстованием, а определяемый главным образом растворением поверхностным стоком (за исключением форм провального генезиса, образование которых прямо определяется наличием карстовых полостей в массиве). Это выражалось в преобладании схем типовых эволюционных связей поверхностных и подземных форм, построенных по типу: первичные ложбины стока → ванновые формы рельефа → поноры → колодцы → шахты (Иванов, 1963; Гвоздецкий, 1972; Соколов, 1962; Максимович, 1963 и др.). Таким образом, неявно постулировалась существенная независимость поверхностного карстового геоморфогенеза от подземного закарстования (спелеогенеза) или даже примат первого над вторым.

На современном уровне понимания карста и спелеогенеза очевидно, что развитие каналовой проницаемости происходит не последовательным проникновением в массив поверхностных понижений, а по всему пути фильтрации от контура питания до контура разгрузки. Существенное выражение в карстовом рельефе получают лишь те формы, которые функционально связаны со структурами каналовой проницаемости в трехмерном объеме породы, т.е. являются элементами разгрузки или питающего аппарата карстовой водообменной системы. Формы разгрузки (ассоциированные с крупными источниками – долины-карманы, жерла восходящих источников, проч.) являются прямым указанием на крупные каналовые структуры. Формы аллогенного питания (слепые долины, замкнутые котловины, поля, проч.) получают свое развитие только после существенного роста каналов и в парагенетической связи с их дальнейшим развитием. Формы автогенного питания (карровые поля, эпикарстовые воронки) образуются в ходе реализации особого эпикарстового механизма морфогенеза, управляемого подповерхностным перераспределением рассеянного питания и его концентрацией на верхних элементах структуры каналовой проницаемости в глубине массива (Климчук, 2009). Таким образом, образование и развитие большинства характерных для карстового рельефа форм полностью подчинено возникновению структур каналовой проницаемости в массиве и их конкурентному (за питание) развитию. Исключением служат только скульптурные микроформы поверхностного растворения типа лунковых и желобковых карров, камениц, и т.п.

Сказанное не значит, что проблематика геоморфологии карста полностью “съедается” спелеогенезом. Важными ее частями являются исследования взаимодействий и парагенезов собственно карста и других геоморфологических агентов (гравитации, эрозии, ледниковой экзарации, проч.), палеогеоморфологический анализ в связи с развитием карста, климатическая, геоструктурная и прочая вариабельность развития питающих аппаратов каналовых систем, динамика поверхностной карстовой денудации, роль эпикарста в карстовом морфогенезе, проч. (Вахрушев, 2009; Климчук, 2009; Ford, Williams, 1987, 2007).

С экспонированием карстовой геосистемы на поверхность формируется специфический тип-состояние карстовой геосистемы – карстовый

ландшафт. Как и в случае геоморфогенеза (одной из составляющих ландшафтогенеза), роль каналовой проницаемости геологического основания также остается определяющей в развитии ландшафта – как по отношению к ландшафтными компонентам (водам, биоте, почвам и т.д.), так и по отношению к ландшафту в целом. Наличие подземных каналов решающим образом определяет условия, характер и объем дренирования осадков и поверхностной гидросети, отвечает за безводность и засухливость карстовых территорий. Это, в свою очередь, предопределяет весьма специфические экологические условия жизнедеятельности наземных организмов, формирования почв и т.д. Все элементы карстового ландшафта эволюционируют, “специфицируются” под влиянием карстового дренажа и в своей взаимосвязи предопределяют особенный характер всего ландшафта, в том числе как среды жизни и деятельности человека (Андрейчук, 2007).

### Эволюционные типы карста

А.Б. Климчуком (Klimchouk, 1996; Klimchouk, Ford, 2000; Климчук, 2010) развит эволюционный подход к типологии карста и разработана соответствующая классификация. Эволюционная типология карста основана на рассмотрении геологической эволюции горнопородного субстрата и водообменной системы, отражающей такие базовые закономерности геологического развития, как направленность и цикличность. Различные стадии постседиментационного преобразования пород и развития геогидродинамических систем характеризуются определенными закономерными и устойчивыми комбинациями литологических и структурных предпосылок водообмена и спелеогенеза, режима водообмена, условий питания, движения и разгрузки подземных вод, термобарических и геохимических условий. Такие комбинации приводят к формированию карстовых систем с определенными характерными свойствами – типов карста, а направленность развития – к закономерной смене типов карста. Смена одного типа карста другим обусловлена процессами тектонической и геоморфологической эволюции, которые определяют изменение граничных условий водообмена и спелеогенеза.

В классификации эволюционных типов карста они отражают последовательные стадии эволюции геосистемы под воздействием внешних по отношению к карсту геологических факторов. Между этими стадиями существенно и закономерно меняются граничные условия и структура водообмена, внешние факторы и внутренние механизмы карстообразования (спелеогенеза). Эволюционные типы карста интегрально характеризуют наиболее существенные свойства карстовых систем (структуру вторичной пустотности и проницаемости, степень и характер выражения в рельефе, гидрогеологические особенности, потенциал провально-просадочной опасности, проч.), обстановки и доминантные механизмы спелеогенеза, а также потенциал унаследования структур пустотности и проницаемости от предшествующих стадий развития.

## Генетические типы карста

Эволюционные типы карста не указывают прямо на его происхождение, но характеризуют *обстановки спелеогенеза*, тем самым – указывают на доминантные спелеогенетические механизмы и структуры каналовой проницаемости, причем с учетом возможного унаследования последних от предшествующих стадий карстовой эволюции.

Генетические типы карста выделяются по происхождению структур каналовой проницаемости – типам спелеогенеза. Кардинальные различия в граничных условиях и режиме водообмена в закрытых и открытых гидрогеологических условиях выражаются в соответствующих основных генетических типах спелеогенеза, различаемых в последние годы – *гипогенном* и *эпигенном* спелеогенезе. Гипогенные и эпигенные карстовые системы связаны с разными типами и сегментами геогидродинамических систем, формируются в различных гидрохимических и термальных условиях существенно различающимися спелеогенетическими механизмами и приводят к формированию различных структур пустотности и каналовой проницаемости (Klimchouk, 2007, 2010a; Климчук, 2010). Эволюционные и генетические типы карста отчетливо коррелируют между собой.

*Гипогенный карст* формируется в условиях водонапорных систем восходящим водообменом вод через слои и толщи растворимых пород. Он генетически не связан с поверхностью и местным поверхностным питанием и может развиваться на различных, в т.ч. значительных и больших (до 1-2 км и более) глубинах. При раскрытии гидрогеологических структур, выведении гипогенного карста в неглубокое залегание (в безнапорные, сдренированные условия) и потери им восходящего питания, он становится реликтовым. Гипогенные формы в условиях неглубокого залегания могут отчасти наследоваться и перерабатываться эпигенным спелеогенезом. В гипогенном спелеогенезе действуют факторы ослабления обратной связи между расходом и скоростью роста каналов, т.е. ослабляется тенденция к конкурентному развитию каналов, характерная для эпигенного спелеогенеза (Климчук, 2006, 2008a; Klimchouk, 2000a, 2003, 2007; Andre, Rajaram, 2005; Rajaram, Cheung, Chaudhuri, 2009; Rehl, Birk, Klimchouk, 2008), что может приводить (при наличии соответствующих структурных предпосылок и равномерного площадного питания), к формированию первазийной пустотности, в несколько раз превышающую пустотность эпигенного карста (см. рис. 1-Б). Однако, ввиду восходящего, «поперечного», вектора гипогенного спелеогенеза, закарстованные площади обычно имеют кластерное распределение. В других структурных и гидрогеологических условиях гипогенный спелеогенез формирует изолированные изоморфные полости, вертикальные каналы и зоны кавернозности по разломам и трещинным зонам (Klimchouk, 2007, 2009, 2010a). Основная роль гипогенного спелеогенеза состоит в повышении вертикальной гидравлической интеграции горизонтов в слоистых водонапорных комплексах и участков в трещинно-жильных водонапорных системах.

*Эпигенный карст* формируется в открытых гидрогеологических условиях, в непосредственной

генетической связи с поверхностью и поверхностным питанием, концентрированность которого возрастает в ходе сопряженной эволюции каналовых систем и карстового рельефа. Механизм эпигенного спелеогенеза использует в наиболее сильной форме обратную связь между расходом и ростом каналов на послепрорывной стадии, что приводит к высокой гидродинамической конкуренции каналов и формированию преимущественно древовидных полостных структур (рис. 1-А). Проницаемость пород в эпигенном карсте отличается крайне высокой неоднородностью и анизотропией. Режим источников отличается большими вариациями расходов. Основная роль эпигенного спелеогенеза состоит в повышении латеральной гидравлической интеграции массивов и горизонтов растворимых пород.

## Карст и псевдокарст

В свете развернутых в статье позиций и данного определения понятия «карст», может получить разрешение давняя в карстологии проблема различения карста и подобных, но не тождественных, явлений. Для последних широко использовался термин *псевдокарст*. Дискуссии о критериях разграничения понятий карст и псевдокарст до сих пор активны, но в рамках традиционной парадигмы карстологии и при неопределенности самого понятия «карст» перспективное разрешение проблемы не просматривается.

В основе проблемы лежит традиционное явное или неявное отождествление карста с растворением и стремление использовать критерий растворимости к разграничению карста и «некарста». Как уже отмечалось выше, этот критерий оказывается неопределенным, а в определенном смысле – ложным. Во-первых, ввиду имманентности свойства растворимости для всех горных пород и относительности качеств высокой и слабой растворимости. Во-вторых, ввиду того, что (как показано исследованием эволюции протоканалов) высокая растворимость и скорость растворения являются препятствием для развития каналовой проницаемости – наиболее важного признака карста.

В этой статье показано, что определяющим процессом для карста является не само по себе растворение минералов и пород природными водами, а *самоорганизация структуры проницаемости горнопородного субстрата вследствие действия механизма спелеогенеза, приводящая к развитию и интеграции высокопроводящих каналов*. Это положение, положенное в основу определения карста, дает ясный критерий для разграничения карста и «некарста». Карстом не являются явления, не связанные с водообменом и не сопровождающиеся самоорганизацией структуры проницаемости и ее возрастанием вследствие действия этого специфического механизма.

Таким образом, явления, обладающие сходными с карстом отдельными признаками, но не отвечающие этому системообразующему свойству, следует относить к псевдокарсту. По этому же принципу, карстом не следует считать явления, связанные лишь с внешним растворением тела растворимых горных пород,

без спелеогенного развития структур внутренней проницаемости в них. Для таких случаев, характерных как для слабопроницаемых солей, так и для многих слаборастворимых пород, уместно использовать термины «мерокарст»<sup>4</sup> или «паракарст».

Вместе с тем, к карсту следует относить явления в породах, часто относимых к некарстовым, таких как кварциты, конгломераты и песчаники с растворимым цементом и кластами, проч., если водообменная система в них развита путем самоорганизации проницаемости вследствие действия описанных принципов спелеогенеза, с ее возрастанием и возникновением интегрированных каналовых структур.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Путь инвентаризации, «взвешивания» и комбинирования эмпирических признаков карста не является продуктивным для выяснения его сущности и понятийного определения. Для решения этой центральной проблемы карстологии необходимо использование новых методологических подходов и обобщение результатов новейших исследований самого явления. В последние десятилетия достигнут большой прогресс в выявлении закономерностей возникновения и эволюции каналовой проницаемости в растворимых породах, которые могут интерпретироваться в контексте идей синергетики и неравновесной термодинамики И.Р.Пригожина о самоорганизации в открытых системах и образовании упорядоченных диссипативных структур.

Проведенный анализ показал, что сущностной стороной карста является процесс самоорганизации открытой динамической «системы вода – растворимая порода» с образованием новых диссипативных структур. Присутствие в горнопородной среде пород, растворимых в данных условиях, вызывает явление самоорганизации структуры водообмена, приводящее систему в новое качество-состояние - карстовое. Свойство самоорганизации этой геосистемы реализуется через специфический механизм развития проницаемости (спелеогенез в растворимых породах), действие которого кардинально изменяет (усложняет и особым образом организует) структуру и функционирование водообменной системы.

Механизм самоорганизации водообмена и формирования карстовой геосистемы (спелеогенез) включает: 1) ранний спелеогенез с действием обратной связи между водообменом и расширением первичных

путей фильтрации (выявление протоканалов), 2) спелеогенное инициирование: каскадный процесс достижения протоканалами условий прорыва (сохранения раствором значительного недонасыщения), с ускоренным ростом инициированных каналов, гидродинамической конкуренцией, соответствующей дестабилизацией и реорганизацией стока и изменением граничных условий водообмена - возникновение интегрированной структуры каналовой проницаемости; 3) спелеогенное развитие: стабилизацию системы в состоянии подвижного равновесия за счет возрастания обмена энергией со средой и дальнейший рост каналов. В итоге этой специфической эволюции геосистема приобретает новое, «карстовое», качество и более высокий уровень организации.

При всех вариациях структуры формируемой в карстовой геосистеме каналовой проницаемости, она проявляет яркие признаки организованности, а ее развитие обуславливает возникновение у водообменной геосистемы ряда принципиально новых и уникальных свойств. Выражением этой организованности является сосредоточение подземного стока и кардинальное увеличение интенсивности водообмена, поддерживаемые за счет нового уровня взаимодействия геосистемы с внешней средой. Интегрированная каналовая система, несмотря на то, что составляет лишь небольшую долю от общей пустотности горнопородного субстрата, обеспечивает экстремально высокую проницаемость и проводит почти весь подземный сток (от 94% до 99,7%). Это свойство является ярким интегральным показателем организованности структуры каналовой проницаемости в карстовых системах. Конкретными проявлениями организованности являются также высокие скорости движения подземных вод, протяженность совершенных гидравлических связей и доля крупных источников, а также выраженная гетерогенность и анизотропия пустотности и физических свойств пород.

Понятие о карсте определяется исходя из сущности прогрессивной эволюции геосистемы с проницаемыми растворимыми породами, движимой водообменом и спелеогенным механизмом самоорганизации структуры проницаемости. Регрессивная эволюция карстовой геосистемы включает процессы гравитационной деструкции и разнообразной аккумуляции, ведущие к фрагментации и разрушению реликтовых структур карстовой проницаемости.

Карст является одним из наиболее ярких проявлений геологической деятельности природных вод, выражением взаимодействия горнопородной и водообменной подсистем, показательным примером геосистем, для которых самоорганизация есть атрибутивное и системообразующее свойство.

Положение о самоорганизации структуры проницаемости растворимого горнопородного субстрата вследствие действия механизма спелеогенеза, положенное в основу определения карста, дает ясный критерий для разграничения карста и подобных, но не тождественных, явлений (мерокарста, псевдокарста).

<sup>4</sup> Термин «мерокарст» был введен Дж.Цвийичем в 1925 г. для обозначения «неполного», «несовершенного» карста, к которому он относил покрытый карст (т.е. – под «неполнотой» карста имелась ввиду неполнота его выражения на поверхности). Со временем неправомерность такого подхода стала ясна и в западноевропейской карстологии, и термин стал излишним в этом понимании. Термин «паракарст» использовался в западной литературе в смысле «неполноценного» карста, в том числе неправомерно прилагался к карсту в некарбонатных породах (гипсовому, соляному, проч.), при растворении которых число компонентов в фазовом равновесии является меньшим, чем три (Cigna, 1985).

## ЛИТЕРАТУРА

- Геологическая эволюция и самоорганизация системы вода–порода. Т. 1. Система вода–порода в земной коре: взаимодействие, кинетика, равновесие, моделирование / Алексеев В.А., Рыженко Б.Н., Шварцев С.Л. и др. - Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2005. - 244 с.
- Андрейчук В.Н. Определение антропогенного карста. - Кунгур: Горный институт УрАН СССР, 1991. - 88 с.
- Андрейчук В.Н. Карст как геоэкологический фактор. - Сосновец-Симферополь: Высшая Школа Экологии и Украинский институт спелеологии и карстологии, 2007. - 136 с.
- Андрейчук В.Н. Системная природа карстового ландшафта // Спелеология и карстология. 2009. - №3. - С. 47-59.
- Андрейчук В.Н. О подходах к изучению карста // Спелеология и карстология. - 2010. №4. - С. 5-10.
- Баренблатт Г.И., Желтов Ю.П. Об основных уравнениях фильтрации однородных жидкостей в трещиноватых породах // Докл. АН СССР. - 1960. - т.132. - №3. - С. 545-548.
- Вахрушев Б.А. О генетическом содержании карстового рельефообразующего процесса. // Спелеология и карстология. - 2009. №2. - С. 30-34.
- Водообмен в геологических структурах Украины. Методы изучения водообмена / Шестопалов В.М., Ситников А.Б. Лялько В.И., др. - Киев: Наукова думка, 1988. - 272 с.
- Воропай Л.И., Андрейчук В.Н. Особенности карстовых ландшафтов как геосистем. - Черновцы: Изд-во Черновицкого ун-та, 1985. - 81 с.
- Гвоздецкий Н.А. Проблемы изучения карста и практика. - М.: Мысль, 1972. - 391 с.
- Девдариани А.С. О сосредоточении стока в карстовых массивах // Специальные вопросы карстологии. - М.: Изд-во АН СССР, 1962. - С. 85-91.
- Дублянский Ю.В. Закономерности формирования и моделирование гидротермокарста. - Новосибирск: Наука, 1990. - 151 с.
- Ежов Ю.А., Лысенин Г.П., Андрейчук В.Н., Дублянский Ю.В. Карст в земной коре: распространение и основные типы. - Новосибирск: Сиб. отд-ние РАН, 1992. - 76 с.
- Зверев В.П. Роль подземных вод в миграции химических элементов. - М.: Недра, 1982.
- Иванов Б.Н. О типологии карстового рельефа равнин на примере Подольско-Буковинской карстовой области // Вопросы карста на юге Европейской части СССР. - Ялта: Изд-во АН УССР, 1956. - С. 131-156.
- Карцев А.А. Гидрогеология нефтяных и газовых месторождений. - М.: Недра, 1972. - 280 с.
- Климантович Ю.Л. Статистическая теория открытых систем. - М.: Янус, 1995. 626 с.
- Климчук А.Б. Карстообразование в артезианских условиях: Концепция поперечного спелеогенеза // Геологический журнал. - 2006. - №2-3. - С. 181-191.
- Климчук А.Б. Особенности и проблемы гидрогеологии карста: спелеогенетический подход // Спелеология и карстология. - 2008а. - №1. - С. 23-46.
- Климчук А.Б. Состояние и тенденции спелеологии в начале XXI века: становление и роль теории спелеогенеза // Геол. журнал. - 2008б. - №3. - С. 65-73.
- Климчук А.Б. Эпикарст: Гидрогеология, морфогенез и эволюция. - Симферополь: УИСК-Сонат, 2009. - 112 с.
- Климчук А.Б. Эволюционная типология карста // Спелеология и карстология. - 2010. №4. - С. 23-32.
- Косыгин Ю.А., Соловьев В.А. Статические, динамические и ретроспективные системы в геологических исследованиях. // Изв. АН СССР, сер. геол. - 1969. - № 6.
- Круть И.В. Введение в общую теорию Земли. - М.: Мысль, 1978. - 367 с.
- Летников Ф.А. Синергетика геологических систем. - Новосибирск: Наука, 1992. - 230 с.
- Летников Ф.А. Процессы самоорганизации при формировании магматогенных и гидротермальных рудных месторождений // Геология рудных месторождений. - 1997. - № 4. - С. 307-322.
- Лукин В. С. О сосредоточении карста // Вопросы изучения карста Русской равнины. - М., 1966. - С. 92—94.
- Максимович Г.А. Основы карстологии. - Пермь, 1963. - Т.1. - 445 с.
- Николис Г., Пригожин И. Познание сложного. - М.: Мир, 1990. - 342 с.
- Николис Г., Пригожин И. Самоорганизация в неравновесных системах. - М.: Мир, 1979. - 512 с.
- Основы гидрогеологии: Геологическая деятельность и история воды в земных недрах / Пиннекер Е. В., Писарский Б. И., Шварцев С. Л. и др. - Новосибирск: Наука, 1982. - 239 с.
- Поспелов Г.Л. Парадоксы, геолого-физическая сущность и механизмы метосоматоза. - Новосибирск: Наука, 1973. - 355 с.
- Пригожин И. Введение в термодинамику необратимых процессов. М.: Изд-во иностр. лит-ры, 1960. 232 с.
- Пригожин И., Стенгерс И. От бытия к становлению. М.: Мир, 1987. 307 с.
- Пригожин И., Стенгерс И. Порядок из хаоса. Новый диалог человека с природой. - М.: Прогресс, 1986. - 431 с.
- Руденко А.П. Самоорганизация и синергетика // Синергетика. Тр. семинара. - Вып. 3. - М.: Изд-во МГУ, 2000. - С. 61-99.
- Рыжиков Д.В. Природа карста и основные закономерности его развития. - М.: Изд-во АН СССР, 1954. 253 с.
- Соколов Д.С. Основные условия развития карста. - М.: Госгеолтехиздат, 1962. - 321 с.
- Соколов Н.И. Типологическая классификация карста // Материалы Комис. по изучению геологии и географии карста: Информ. сб. - М.: Изд-во АН СССР, 1960. - №1. - С. 3—21.
- Тимофеев Д.А., Дублянский В.Н., Кикнадзе Т.З. Терминология карста. - М.: Наука, 1991. - 259 с.
- Хакен Г. Синергетика. - М.: Мир, 1980. - 406 с.
- Цыкин Р.А. Отложения и полезные ископаемые карста. - Новосибирск: Наука. Сибирское отделение, 1985. - 166 с.
- Цыкин Р.А. Цыкина Л.Ж. Карст восточной части Алтае-Саянской складчатой области и связанные с ним полезные ископаемые. - Новосибирск: Наука. Сибирское отделение, 1978. - 104 с.
- Чернавский Д.С. Синергетика и информация. Динамическая теория информации. М.: Изд-во УРСС, 2004. - 288 с.
- Шварцев С.Л. К проблеме самоорганизации геологической системы вода–порода // Геология и геофизика. - 1995. - № 4. - С. 22-29.
- Шварцев С.Л. Геологическая система “вода–порода” // Вестник РАН. - 1997. - № 6. - С. 518-524.
- Шварцев С.Л. Прогрессивная самоорганизация в системе вода–порода // Изв. Секции наук о Земле РАЕН. - 2005. - Вып. 13. - С. 139-152.
- Шварцев С.Л. Основные процессы и механизмы эволюционного развития системы вода–порода // Изв. Томского политехнического ун-та. - 2007а. - Т. 311. - № 1. - С. 103-113.
- Шварцев С.Л. Прогрессивно самоорганизующиеся абиогенные диссипативные структуры в геологической



истории Земли // Литосфера. - 2007б. - № 1. - С. 65–89.

Шварцев С.Л. Фундаментальные механизмы взаимодействия в системе вода–горная порода и ее внутренняя геологическая эволюция // Литосфера. - 2008. - № 6. - С. 3–24.

Щербаков А.С. Самоорганизация материи в неживой природе: философские аспекты синергетики. - М.: Изд-во МГУ, 1990. - 111 с.

Эбелинг В. Образование структур при необратимых процессах. М.: Мир, 1980. 272 с.

Эшби У.Р. Принципы самоорганизации // Принципы самоорганизации. - М.: Мир, 1966. - С. 314-343.

Andre, B.J., Rajaram, H. Dissolution of limestone fractures by cooling waters: Early development of hypogene karst systems. *Water Resources Research*. - 2005. - 41. doi:10.1029/2004WR003331.

Berner, R.A., Morse, J.W. Dissolution kinetics of calcium carbonate in sea water. IV. Theory of calcite dissolution. *American Journal of Science*. - 1974. - 274 (2). - P. 108–134.

Birk, S. Characterisation of karst systems by simulating aquifer genesis and spring responses: Model development and application to gypsum karst // *Tübinger Geowissenschaftliche Arbeiten C60*. - 2002. - 122 p.

Cigna A.A. Some remarks on phase equilibria of evaporites and other karsti-fiable rocks // *Le Grotte d'Italia*. - 1985. - 12 (4). - P. 23-42.

Dreybrodt, W. The role of dissolution kinetics in the development of karst aquifers in limestone: A model simulation of karst evolution. *Journal of Geology*. - 1990. - 98 (5). - P. 639–655.

Dreybrodt, W. Principles of early development of karst conduits under natural and man-made conditions revealed by mathematical analysis of numerical models: *Water Resources Research*. 1996. - 32. - P. 2923-2935.

Dreybrodt, W., Eisenlohr, L. Limestone dissolution rates in karst environments // *Speleogenesis – evolution of karst aquifers* (ред. Klimchouk A.B., Ford, D.C., Palmer, A.N., Dreybrodt W.). - Huntsville: National Speleological Society, 2000. - P. 136-148.

Dreybrodt, W., Gabrovšek, F., Romanov D. Processes of speleogenesis: A modeling approach. - Postojna, Ljubljana: Karst Research Institute ZRC SAZU, 2005. - 373 p.

Dubljansky, Ju.V. 2000b. Hydrothermal speleogenesis: its settings and peculiar features // *Speleogenesis – evolution of karst aquifers* (ред. Klimchouk A.B., Ford, D.C., Palmer, A.N., Dreybrodt W.). - Huntsville: National Speleological Society, 2000. - P. 292-297.

Ewers, R.O. Cavern development in the dimensions of length and breadth. Unpublished Ph.D. thesis. Hamilton, Ontario: McMaster University, 1982.

Ford, D.C. Karst // *Encyclopedia of Caves and Karst Science* (ред. Gunn G.). - New York-London: Fitzroy Dearborn/Taylor and Francis, 2004. - P. 473-475.

Ford, D.C., Ewers, R.O. The development of limestone cave systems in the dimensions of length and depth // *Canadian Journal of Earth Sciences*. - 1978. - 15 (11). - P. 1783–1798.

Ford D.C., Williams P.W. *Karst Geomorphology and Hydrology*. - London: Unwin Hyman, 1989. - 601 p.

Ford D.C. Williams P.W. *Karst hydrogeology and geomorphology*. - Chichester: John Wiley and Sons, 2007. - 565 p.

Ford, D.C. 2006. Karst geomorphology, caves and cave deposits: A review of North American contributions during the past half century // *Perspectives on Karst Geomorphology, Hydrology and Geochemistry, GSA Special Paper 404* (ред. Harmon, R.S., Wicks, C.W.). - Boulder, Colorado. - P. 1-14.

Gabrovšek F. (Ed.). *Evolution of karst: from prekarst to cessation* / - Ljubljana: SAZU, 2002. - 448 c.

Huntoon, P.W. Is it appropriate to apply porous media groundwater circulation models to karstic aquifers? // *Groundwater models for resources analysis and management* (ред. Aly I.E.-K.). - Boca Raton: Lewis Publishers, 1995. - С. 339-358.

Jeschke A., Vosbeck, K., Dreybrodt, W. Surface controlled dissolution rates of gypsum in aqueous solutions exhibit nonlinear dissolution kinetics // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. - 2001. - 65 (1). - P. 27-34.

Kaufmann, G., Braun, J. Karst aquifer evolution in fractured rocks // *Water Resources Research*, 1999. - 35 (11). - P. 3223-3238.

Klimchouk A.B. The typology of gypsum karst according to its geological and geomorphological evolution / *Gypsum karst of the world* (ред. Klimchouk A.B., Lowe, D., Cooper, A., Sauro, U.). - International Journal of Speleology, Theme Issue, 25 (3-4), 1996. - 307 c.

Klimchouk A.B. Speleogenesis under deep-seated and confined settings // *Speleogenesis: Evolution of karst aquifers* (ред. Klimchouk A.B., Ford, D.C., Palmer, A.N., Dreybrodt W.). - Huntsville: National Speleological Society. 2000a. - С. 312 - 336.

Klimchouk, A.B. Speleogenesis in gypsum // *Speleogenesis: Evolution of karst aquifers* (ред. Klimchouk A.B., Ford, D.C., Palmer, A.N., Dreybrodt W.). - Huntsville: National Speleological Society. 2000b. - P. 431-442.

Klimchouk, A.B. Evolution of karst in evaporites // *Evolution of karst: from prekarst to cessation* (ред. Gabrovšek, F.). - Postojna-Ljubljana: Založba ZRC, 2002. - P. 61-96.

Klimchouk A.B. Conceptualisation of speleogenesis in multi-storey artesian systems: A model of transverse speleogenesis // *Speleogenesis and Evolution of Karst Aquifers*, www.speleogenesis.info. - 2003. - №2. - С. 1 - 18.

Klimchouk A.B. Hypogene speleogenesis: Hydrogeological and morphogenetic perspective. - Carlsbad: National Cave and Karst Research Institute, 2007. - 106 c.

Klimchouk A. Morphogenesis of hypogenic caves // *Geomorphology*. - 2009a. - 106. - С. 100-117.

Klimchouk A.B. Hypogene speleogenesis // *Treatise on Geomorphology, Vol. 12: Karst Geomorphology* (ред. Frumkin, A.). - Elsevier, 2010a.

Klimchouk A.B. Intrastratal gypsum karst // *Treatise on Geomorphology, Vol. 12: Karst Geomorphology* (ред. Frumkin, A.). - Elsevier, 2010b.

Klimchouk A.B., Ford D. Types of karst and evolution of hydrogeologic setting // *Speleogenesis: Evolution of karst aquifers* (ред. Klimchouk A.B., Ford, D.C., Palmer, A.N., Dreybrodt W.). - Huntsville: National Speleological Society, 2000. - С. 45-53.

Klimchouk A.B., Ford, D.C., Palmer, A.N., Dreybrodt W. (Eds.). *Speleogenesis: Evolution of Karst Aquifers*. - Huntsville: National Speleological Society, 2000. - 527 c.

LaFleur, R.G. (Ed.). *Groundwater as a Geomorphic Agent*. - Boston: Allen and Unwin, 1984. - 390 p.

Liedl, R., Sauter, M., Hückinghaus, D., Clemens T., Teutsch G. Simulation of the development of karst aquifers using a coupled continuum pipe flow model // *Water Resources Research*. - 2003. - 39 (3). - P. 1-11.

Luhr, J.F. (Ed.) *Earth*. Washington: Smithsonian Institution and Dorling Kindersley, 2003. - 520 pp.

Martel, E.A. *Les Abims. Les eaux souterraines, les caverns, les sources, la speleologie*. - Paris, 1984.

Palmer, A.N. 1991. Origin and morphology of limestone caves // *Geol. Soc. Am. Bull.* - 103. - P. 1-21.

Palmer, A.N. *Cave geology*. - Cave Books, 2007. - 454 p.

Plummer, L.N., Wigley, T.M.L. The dissolution of calcite in CO<sub>2</sub>-saturated solutions at 25°C and 1 atmosphere total pressure.

- Geochimica et Cosmochimica Acta. - 1976. – 40 (2). – P. 191–202.
- Plummer, L.N., Wigley, T.M.L., Parkhurst, D.L. The kinetics of calcite dissolution in CO<sub>2</sub>-water systems at 5° to 60° C and 0.0 to 1.0 atm CO<sub>2</sub> // American Journal of Science. – 1978. – 278. – P. 179-216.
- Poucher, S., Copeland, R. Speleological and Karst Glossary of Florida and the Caribbean. University Press of Florida, 2006. – 192 p.
- Rajaram, H., Cheung, W., Chaudhuri, A. Natural analogs for improved understanding of coupled processes in engineered earth systems: examples from karst system evolution // Current Science. - 2009. - 97 (8). – P. 1162-1176.
- Rehrl, C., Birk, S., Klimchouk, A. B. Conduit evolution in deep-seated settings: conceptual and numerical models based on field observations // Water Resources Research. - 2008. – 44. - W11425. doi:10.1029/2008WR006905.
- Sanz Pérez, E. 1996. Springs in Spain: Classification according to their flows and lithologies and their hydraulic contributions // Ground Water 34. – 6. – P. 1033–1041.
- Sharp J.M., Kyle J.R. The role of ground-water processes in the formation of ore deposits // The geology of north america, hydrogeology (ред. W. Back J.S.R., P. R. Seaber). – Boulder: 1988. – C. 0-2.
- Tóth J. Groundwater as a geologic agent: An overview of the causes, processes, and manifestations // Hydrogeology Journal. - 1999. –7, – C. 1 - 14.
- Toth J. Hydraulic continuity in large sedimentary basins // Hydrogeology Journal. 1995. – 3 (4). – P. 4-15.
- White, W.B. Geomorphology and hydrology of karst terrains. - New York: Oxford University Press, 1988. - 464 p.
- White, W.B. Karst hydrology: recent developments and open questions // Engineering Geology. - 2002. – 65. – P. 85.105.
- White, W.B. Role of solution kinetics in the development of karst aquifers // Karst Hydrogeology (ред. Tolson J.S., Doyle, F.L.). - Huntsville, Alabama: UAH Press, 1977. – P. 503–517.
- Worthington, S.R.H. A comprehensive strategy for understanding flow in carbonate aquifers // Karst modeling, Special Publication No. 5 (ред. Palmer, A.N., Palmer, M.V., Sasowsky, I.D.). - Charles Town; Karst Waters Institute, 1999. – P. 30–37.
- Worthington, S.R.H., Ford D.C. Self-organized permeability in carbonate aquifers // Ground Water. – 2009. - 47 (3). - P. 326-336.
- Worthington, S.R.H., Ford, D.C., Beddows, P. Porosity and permeability enhancement in unconfined carbonate aquifers as a result of solution // (ред. Klimchouk A.B., Ford, D.C., Palmer, A.N., Dreybrodt W.). - Huntsville: National Speleological Society, 2000. – P. 423-432.