

А. Б. Климчук

**ЭВОЛЮЦИОННЫЙ ПОДХОД К ТИПОЛОГИИ КАРСТА***(Рекомендовано акад. НАН Украины В. М. Шестопаловым)*

Демонструється гідрогеологічна сутність карсту, подається його визначення, обґрунтовується еволюційний підхід до його типології і пропонується відповідна класифікація. Еволюційна типологія карсту заснована на розгляді геологічної еволюції тіла порід (шара, формації), які карстуються, та водообмінної системи, що відбиває такі базові закономірності геологічного розвитку, як спрямованість і циклічність. Різні стадії постседиментаційного перетворення порід і розвитку геогідродинамічних систем характеризуються певними стійкими комбінаціями літологічних і структурних передумов водообміну і спелеогенезу, режиму водообміну, умов харчування, руху й розвантаження підземних вод, термобаричних і геогідрохімічних умов. Такі комбінації приводять до формування карстових систем з певними характерними властивостями — типів карсту, а спрямованість розвитку — до закономірної зміни типів карсту. Зміна одного типу карсту іншим обумовлена процесами тектонічної і геоморфологічної еволюції, які визначають зміну граничних умов водообміну і спелеогенезу.

У рамках запропонованої класифікації типи карсту відображають послідовні стадії його еволюції, між якими суттєво і закономірно змінюються граничні умови та структура водообміну, зовнішні фактори і внутрішні механізми карстоутворення (спелеогенезу). Еволюційні типи карсту інтегрально характеризують найбільш істотні властивості карстових систем (структуру вторинної пустотності й проникності, ступінь і характер вираження в рельєфі, гідрогеологічні особливості, потенціал провальної-просадкової небезпеки, тощо), обстановки та домінуючі механізми спелеогенезу, а також потенціал успадкування структур порожнинності і проникності від попередніх стадій розвитку. Це дозволяє використовувати дану класифікацію для вирішення широкого кола наукових і практичних проблем, пов'язаних з карстом.

The paper reveals the hydrogeological essence of karst, provides its definition, substantiates the evolutionary approach to karst typology and offers a respective classification. The evolutionary typology of karst is based on consideration of geological evolution of a body of karstified rocks (unit, formation) and evolution of a groundwater circulation system. It reflects such basic regularities of geological evolution as directed development and cyclicity. Different stages of post-sedimentary transformation of rocks and of the development of a geohydrodynamic systems are characterized by certain steady combinations of lithologic and structural pre-requisites for groundwater flow and speleogenesis, the mode of groundwater flow, recharge and discharge conditions, thermobaric and geohydrochemical conditions. Such combinations result in formation of karst systems with certain characteristic properties — i.e. types of karst. The directed development — results in regular changes of karst types. Changes of one type of karst into another are conditioned by the processes of tectonic and geomorphological evolution, which determine change of border conditions for groundwater flow and speleogenesis.

Within the framework of the proposed classification, the types of karst correspond to the successive stages of its evolution, between which boundary conditions of groundwater flow and speleogenesis, external factors and internal mechanisms of karstification (speleogenesis) differ considerably and in a regular manner. The evolutionary types of karst integrally characterize the most substantial properties of karst systems (structure of secondary porosity and permeability, degree and character of karst manifestation in surface relief, hydrogeologic features, potential for collapse and subsidence hazard, etc.), speleogenetic environments and dominant mechanisms, as well as potential of inheritance of porosity and permeability structures from the previous stages of development. This allows using this classification for resolving of broad range of scientific and practical problems, related to karst.

**Введение**

Движущая сила карстового процесса — это водообмен. Важнейшим и уникальным свойством карстовых водообменных систем явля-

ется прогрессирующее возрастание проницаемости пород и пространственной неоднородности и анизотропии емкостных и фильтрационных свойств карстовых коллекторов, происходящее в результате циркуляции вод в растворимых породах и сопутствующего спелеогенеза. (Климчук, 2008; Speleogenesis:

© А. Б. Климчук, 2010

Evolution of Karst Aquifers, 2000). В результате развития карста происходит интенсификация водообмена и кардинальное изменение его структуры, формируется огромная пространственная неоднородность емкостных и фильтрационных свойств.

Проявления и особенности развития карста, его геолого-экологическая роль, разнообразные практически значимые свойства карстовых территорий (морфология и выражение в рельефе карстовых форм, провально-просадочная опасность, гидрология, распределение пористости и проницаемости растворимых пород, строение и функционирование карстовых водоносных систем, уязвимость карстовых вод к загрязнениям и др.) характеризуются огромным разнообразием в зависимости от геологических и географических условий и факторов. Проблема разработки типологической классификации карста, отражающей в своих категориях его разнообразие и наиболее важные свойства, имеет большое научное и практическое значение, но до сих пор далека от удовлетворительного решения.

Целью настоящей работы является обоснование и развитие эволюционного подхода к типологии карста и соответствующей типологической классификации в русскоязычном понятийном контексте. Эволюционная классификация карста была предложена автором в 1996 г. в англоязычных терминах (Klimchouk, 1996), развита в работе А. Б. Климчука и Д. Форда (Klimchouk, Ford, 2000a) и в настоящее время широко используется в англоязычной карстологической литературе как основа для рассмотрения теоретических (спелеогенез, геоморфология и гидрогеология карста — Speleogenesis: Evolution of Karst Aquifers, 2000; Ford, Williams, 2007; Klimchouk, 2007; Palmer, 2007) и практических (Европейский проект по оценке провальной опасности ROSES — Younger et al., 2005 и др.) проблем карстологии.

## Понятие о карсте

Проблема типологии карста, как и многих других сложных природных систем, объективно сложна из-за необходимости оперировать большим количеством признаков и свойств, преобладанием нечетких мно-

жеств, между которыми трудно провести строгие разграничительные линии, а также различий в трактовках сущности и объема самого понятия "карст". Определение карста является давней научной проблемой карстологии, в разработке которой выделяются феноменологический (карст — определенный набор явлений), процессуальный (карст — моно- или комплексный процесс), территориальный (карст — территория с типическим набором признаков) и системный (карст — природная система взаимосвязанных объектов/свойств/отношений, образующих целостное множество) подходы, а часто происходит их недопустимое смешение. В частности, методологически неоправданным представляется характерное для советской карстологической школы объединение в одном понятии-термине процесса и явлений, что уже подвергалось обоснованной критике Р. А. Цыкиным (Цыкин, Цыкина, 1978; Цыкин, 1985).

В современной карстологии отчетливо проявляются признаки смены научной парадигмы и необходимость ревизии базовых понятий — понятия о карсте и производных от него. Специальному рассмотрению этой проблемы будет посвящена отдельная статья. Тут дадим лишь определение карста, используемое нами в разработке вопросов его типологии, которое является развитием определений, данных в работах Хантона (Huntoon, 1995), А. Б. Климчука и Д. Форда (Klimchouk, Ford, 2000a) и А. Б. Климчука (Klimchouk, 2007; Климчук, 2008).

**Карст** — это интегрированная водообменная геосистема (геогидродинамическая система) в определенном объеме гидролитосферы, характеризующаяся преобладанием каналовой проницаемости, структура которой развивается преимущественно растворением по первичным путям фильтрации и организуется для наиболее эффективной циркуляции подземных вод в направлении градиента. При экспонированном или приповерхностном развитии карст выражается комплексом специфических явлений в рельефе и гидрологии, связанных с высокой пустотностью и каналовой проницаемостью в толще пород, и вызывает формирование особых карстовых ландшафтов. При изменении гидрогеологической обстановки карстовая система способна дина-

мично приспособляться к новым граничным условиям, но ее компоненты могут становиться реликтовыми по отношению к ним (если остаются, хоть утратившими первоначальную функциональность, частями непрерывно развивающейся водообменной системы) или переходить в ископаемое состояние (если развитие данной водообменной системы полностью прекратилось, как правило, в результате погребения).

Центральным, системообразующим, процессом в формировании карста является **спелеогенез** — развитие полостей и каналов в горной породе путем расширения преимущественно растворением первичных путей фильтрации подземных вод. Карстовый процесс, однако, не сводится к спелеогенезу, хотя последний играет в нем ведущую роль. **Карстовый процесс** — это взаимосвязанная совокупность процессов преобразования горных пород, гетерогенный геологический процесс, развивающийся под воздействием водообмена, выражающийся возрастанием проницаемости, гетерогенности и анизотропии емкостных, фильтрационных и механических свойств пород, вызванный и направляемый развитием полостей и каналов растворения по первичным путям фильтрации подземных вод (спелеогенезом).

### Краткий обзор представлений о типах карста

Проблема типологии карста сложна и многогранна, ей посвящена обширная литература. Не претендуя на ее всесторонний обзор, отметим некоторые ключевые моменты.

Различными исследователями было выделено по разным признакам (географическому местоположению, климату, рельефу, геоморфологии, тектонике, литологии карстующихся пород, характеру и мощности покрова, морфологии, гидрогеологии, генезису (?), возрасту, гидрогеологии, активности и др.) около 300 типов карста. Многие из них не являются частями классификационных систем с определенными основаниями, а выделены индивидуально по географической представительности некоторых местных или региональных особенностей карста (так называемые географические

его типы). Многие классификации используют в качестве оснований частные, второстепенные признаки и факторы, присущие лишь некоторым вариантам карста или обстановок его развития.

Особенно сложна и противоречива ситуация с выделением генетических типов карста. Согласно словарю "Терминология карста" (Тимофеев, Дублянский, Кикнадзе, 1991), генетический тип карста определяется генезисом карстовых форм. Но очевидно, что генезис карста как сложной геосистемы принципиально не сводится к генезису отдельных форм-компонентов, который заведомо разнообразен даже в рамках генетически однородного карста. На самом деле в имеющейся практике выделения так называемых генетических типов карста в качестве оснований используются самые разные признаки отдельных условий и факторов развития карста, которые сами по себе не определяют генезис карста как целостной системы. Такая практика приводит к очевидным противоречиям. Например, типы карста по химическому механизму растворения (углекислый, сернокислый, сероводородный, гидротермальный) отнесены к генетическим, а типы по гидродинамическим, литологическим, геоструктурным, климатическим факторам названы среди прочих типологических систем (Тимофеев, Дублянский, Кикнадзе, 1991). Вместе с тем все эти факторы участвуют в генезисе карста в степени, варьирующей в ходе эволюции.

В последние десятилетия вопросам типологии карста уделялось внимание в работах В. Н. Дублянского и Г. Н. Дублянской (Дублянская, Дублянский, 1992; Дублянский, Дублянская, 2004). В качестве наиболее существенных признаков в классификации карста они используют литологию карстующихся пород (шесть типов карста: I — карбонатный, II — сульфатный, III — соляной, IV — переслаивания карстующихся пород, V — переслаивания карстующихся и некарстующихся пород, VI — переслаивания прослоев карстующихся пород среди некарстующихся) и характер перекрывающих отложений (четыре типа: А — открытый, Б — покрытый, В — перекрытый, Г — перекрыто-покрытый), предлагая совмещать эти классификации в типизации "закарстованных территорий".

В разграничении типов по характеру перекрывающих отложений используются мощность и степень консолидации (сцементированные-несцементированные) покровных отложений. Такой формализованный подход удобен при картировании условий развития карста, но не образует содержательной основы для отражения его генезиса и собственных существенных свойств.

Карст является продуктом сложного комплекса условий и факторов его развития. Проблемы генезиса и типологии карста тесно взаимосвязаны. Их решение, на наш взгляд, заключается в разработке подхода, позволяющего идентифицировать закономерные и устойчивые сочетания основных условий и факторов (обстановки) развития карста, приводящие к формированию систем с характерными структурно-функциональными свойствами, а также выявлять соотношения (трансформации) обстановок. Закономерность и устойчивость сочетаний условий и факторов развития карста определяются общими закономерностями геологической и гидрогеологической эволюции осадочных формаций и территорий, что делает приоритетным эволюционный подход к типологии карста.

### **Гидрогеологическая сущность и эволюционный контекст карста**

Современная гидрогеология интенсивно развивает положение В. И. Вернадского об огромной геологической роли подземных вод (Пиннекер, Писарский, Шварцев, 1982; Шварцев, 1996; Sharp, Kyle, 1988; Toth, 1995, 1999; Groundwater as Geomorphic Agent, 1984). Спелеогенезис (и карстообразование в целом) является одним из наиболее ярких проявлений геологической роли подземных вод, результатом их взаимодействия с геологической средой, характер и интенсивность которого определяются различными компонентами и атрибутами двух систем, стремящихся к равновесию. Равновесие, однако, в реальных геологических условиях нигде полностью не достигается (достигается лишь временно, а в пространстве — мозаично), и неравновесие остается преобладающим состоянием системы вода—порода. Эффект неравновесия определяется интенсивностью взаимодействия,

которая может варьировать в широких пределах. Для достижения выраженного спелеогенного развития растворяющий эффект неравновесия должен аккумулироваться на протяжении достаточно долгого времени или концентрироваться в пределах относительно небольшого объема литосферы.

Систематическим механизмом массопереноса, поддерживающим неравновесие, является подземный сток (Tóth, 1999), а в более широком смысле — водообмен в геосистемах (гидрогеологических структурах)\*. Структура, интенсивность и прочие свойства водообменной системы контролируют распределение геологического эффекта взаимодействия воды с породой, в случае карста — всех его проявлений. Следовательно, именно характер и свойства водообменной геосистемы или геогидродинамической системы определяют генезис карста и его основные структурно-функциональные свойства (структуру проницаемости, морфологию вторичной пустотности, роль и функции карста в водообмене и др.). В этом состоит выдвигаемое нами положение о гидрогеологической сущности карста. Такой подход, как и данное нами определение карста, можно считать гидрогеологическими, однако в свете вышеприведенного положения они являются, по сути, карстоцентрическими (в трактовке подходов к изучению карста В. Н. Андрейчука, 2010).

Эволюционная типология карста основана на рассмотрении геологической эволюции тела карстующихся пород (пласта, формации) и водообменной системы, отражающей такие базовые закономерности геологического развития, как направленность и цикличность.

В эволюции осадочных пород выделяются стадии седиментогенеза, диагенеза, катагенеза и гипергенеза, отражающие направленность их развития, а само осадкообразование циклично. В англоязычной номенклатуре упомянутым стадиям примерно соответствуют стадии зогенеза (охватывает первые две из вышеприведенных), мезогенеза и телогенеза (Choquette,

\* Водообмен в геосистемах понимается как процесс, характеризующий поступление подземных вод в водоносную систему (или ее часть), перемещение внутри и выведение из нее в смежные системы (Водообмен в геологических структурах Украины, 1988).

Pray, 1970). В ходе постседиментационного преобразования осадочных пород существенно изменяются их литологические и структурно-текстурные свойства, характер и структура геофильтрационной среды (Klimchouk, Ford, 2000б). Стадии литогенеза характеризуются различными термобарическими условиями и геогидрохимическими обстановками.

Постседиментационные преобразования осадочных толщ в ходе тектонического (а на определенных стадиях и геоморфологического) развития регионов обуславливают общую направленность в развитии гидрогеологических структур от закрытых к раскрытым и от слоистых (стратиформных) к трещинно-жильным (сквозьформационным), в общем соответствующую ряду артезианские бассейны → нарушенные бассейны (адбассейны) → слоистые гидрогеологические массивы (адмассивы) → гидрогеологические массивы (Зайцев, Толстихин, 1971; Пиннекер, 1977). Таким образом, происходит постепенное "вытеснение" структур бассейнового типа структурами типа массивов. Это выражается в общей направленности смены типов (стадий в развитии) карста от закрытого к раскрытому в пределах одного цикла (рис. 1).

Конечным результатом направленного развития является уничтожение (распад) горнопородных формаций, гидрогеологических структур и водообменных систем (включая карстовые), однако на этом пути они могут переживать вовлечение в новые циклы осадконакопления и гидрогеологического развития. Гидрогеологический цикл (Карцев, 1972) начинается с трансгрессии, осадконакопления и формирования седиментационных вод, включает этап последующей регрессии, поднятия, денудации и инфильтрационного промыва и заканчивается новым погружением, трансгрессией и прекращением инфильтрации. Этапы гидрогеологического цикла характеризуются различными режимами водообмена (элизионным и инфильтрационным), которые сложным образом взаимодействуют между собой, особенно при наложении последующих гидрогеологических циклов (рис. 1). Для приповерхностных карстовых систем вовлеченность в следующий гидрогеологический цикл означает погребение и переход

в ископаемое состояние (погребенный карст — палеокарст). Однако на новом этапе поднятия и инфильтрационного промыва они могут переживать оживление и частичную интеграцию во вновь образующиеся системы (откопанный карст). В отложениях прежнего цикла сохраняются воды последнего, в том числе инфильтрогенные на следующем элизионном этапе, но происходит перераспределение типов вод и режимов водообмена за счет возобновления выжимания древних седиментогенных и возрожденных вод из глин в коллекторские породы. Таким образом, более глубокие гипогенные карстовые системы прежнего гидрогеологического цикла могут продолжать свое развитие в новом цикле, адаптируясь к изменяющемуся полю динамических и химических параметров, или приостанавливать его с возобновлением на следующем инфильтрационном этапе, или также переходить в ископаемое состояние вследствие заполнения химическими осадками (в том числе рудными).

Сложная картина взаимодействия основных (элизионного, преимущественно геостатического, и инфильтрационного — гидростатического) режимов водообмена в ходе гидрогеологических циклов может дополнительно усложняться участием в элизионном режиме геодинамического давления, вызываемого тектоническими напряжениями. Существенную роль может также играть режим свободной конвекции, поддерживаемый плотностными градиентами (концентрационными или термальными).

На инфильтрационном этапе гидрогеологического цикла инфильтрационный режим, с его собственной иерархией геогидродинамических систем (региональные, промежуточные, локальные), в целом "подвешен" над областью элизионного режима; однако положение границы между ними варьирует в зависимости от геологических, геоморфологических и климатических условий и может смещаться близко к поверхности (в частности, в областях разгрузки региональных систем). Взаимодействие различных систем и режимов может поддерживать гидрохимические неравновесия и агрессивность вод. Поэтому зоны такого взаимодействия часто являются особо благоприятными для глубинного (гипогенного) спелеогенеза (Klimchouk,

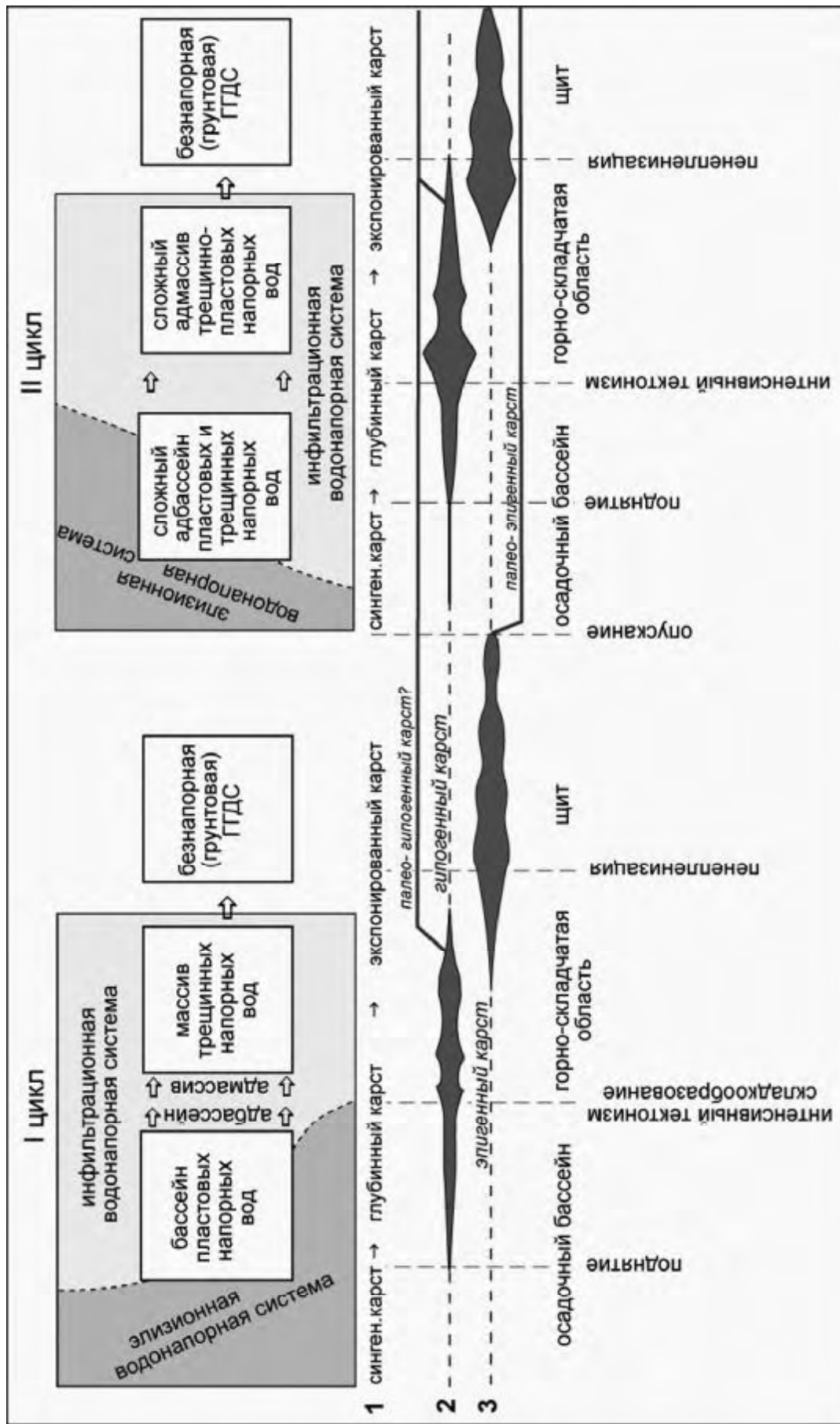


Рис. 1. Развитие карста в контексте эволюции геогидродинамических систем и гидрогеологических структур. Содержательная основа рисунка в обобщенно-геологической части — по А. А Карцеву (1972), с изменениями.

1 — направленность смены эволюционных типов (групп типов) карста; 2, 3 — относительная интенсивность развития карста в ходе эволюции; 2 — гипогенного, 3 — эпигенного

2007, 2009б). Они мигрируют по мере тектонического и геоморфологического развития, охватывая все более глубокозалегающие формации по мере перемещения последних к поверхности в ходе денудации и проникновения инфильтрационного режима вглубь. Существенные изменения в конфигурации водообменных систем и режимов происходят также в результате самого гипогенного спелеогенеза, способствующего развитию сквозьформационной проницаемости и вертикальной связности водоносных горизонтов и комплексов.

### **Эволюционный подход к типологии карста**

Б. Н. Иванов (1956) и И. Г. Глухов (1961) подчеркивали важность с точки зрения формирования подземных вод и развития карста наличия или отсутствия (а также проницаемости) некарстующегося покрова над растворимыми породами, предложив выделять в качестве основных типов карст *открытый* (покров отсутствует), *полуоткрытый* (присутствует проницаемый покров) и *закрытый* (присутствует слабопроницаемый покров). Б. Н. Иванов (1956) был, по-видимому, первым, кто высказал идею о придании этим типам эволюционного значения, рассматривая их как стадии развития карста на фоне восходящих неотектонических движений и геоморфологической эволюции. В работах Дж. Квинлана (Quinlan, 1978) разграничивается типологическая роль покровных толщ *разного по отношению к карсту возраста*: карст, сформированный до образования покрова и им перекрытый (палеокарст), и карст, сформированный уже при наличии покрова (по терминологии Дж. Квинлана: *interstratal* — межпластовый карст; *intrastratal* — внутривластовый карст). Различение возраста покрова по отношению к формированию карста является принципиально важным, поскольку содержит путь к увязке с генетическими обстановками развития карста. Упомянутые идеи легли в основу эволюционной классификации карста, разработанной А. Б. Климчуком (Klimchouk, 1996) и А. Б. Климчуком и Дж. Фордом (Klimchouk, Ford, 2000а), рассматривающей его типы в контексте общей геологической и геоморфологической эво-

люции, эволюции осадочных пород и гидрогеологического цикла (рис. 2).

Карст, который развивается в свежестолженных или молодых, диагенетически незрелых, растворимых породах, не испытавших погребения, называется *сингенетическим*, или *эогенетическим*. Большинство формаций в нормальном геологическом цикле испытывают погружение и погребение под более молодые осадки, с соответствующими катагенетическими преобразованиями (мезогенез — в западной литературе), а затем — поднятие с выводом в зону гипергенеза и экспонированием на поверхность (телогенез — в западной литературе). Постседиментационное закарстование растворимых пород может происходить (непрерывно или прерывисто) на любой стадии этого цикла, однако условия карстообразования закономерно различаются по стадиям развития гидрогеологических структур в цикле погребения и раскрытия (Klimchouk, Ford, 2000а, 2000б). Различные стадии этого развития характеризуются определенными устойчивыми комбинациями литологических и структурных предпосылок водообмена и спелеогенеза, режима водообмена, условий питания, движения и разгрузки подземных вод (по отношению к данной области гидrolитосферы, рассматриваемой в контексте региональной системы подземных вод), их химического и газового состава и степени наследования карстовых структур от предыдущих стадий. Такие комбинации приводят к формированию карстовых систем с определенными характеристическими свойствами — типов карста, а направленность развития — к закономерной смене типов карста (рис. 2). Смена одного типа карста другим в значительной степени обусловлена процессами тектонической и геоморфологической эволюции, которые определяют изменение граничных условий водообмена и спелеогенеза.

Карст, развивающийся под ранее накопленным покровом осадков без непосредственного влияния поверхностных факторов (в гидрогеологически закрытых структурах), называется *закрытым* (*deep-seated* в — англоязычной номенклатуре). На восходящей ветви цикла выделяются следующие последовательно сменяющиеся стадии развития карста, рассматриваемые как эволюцион-

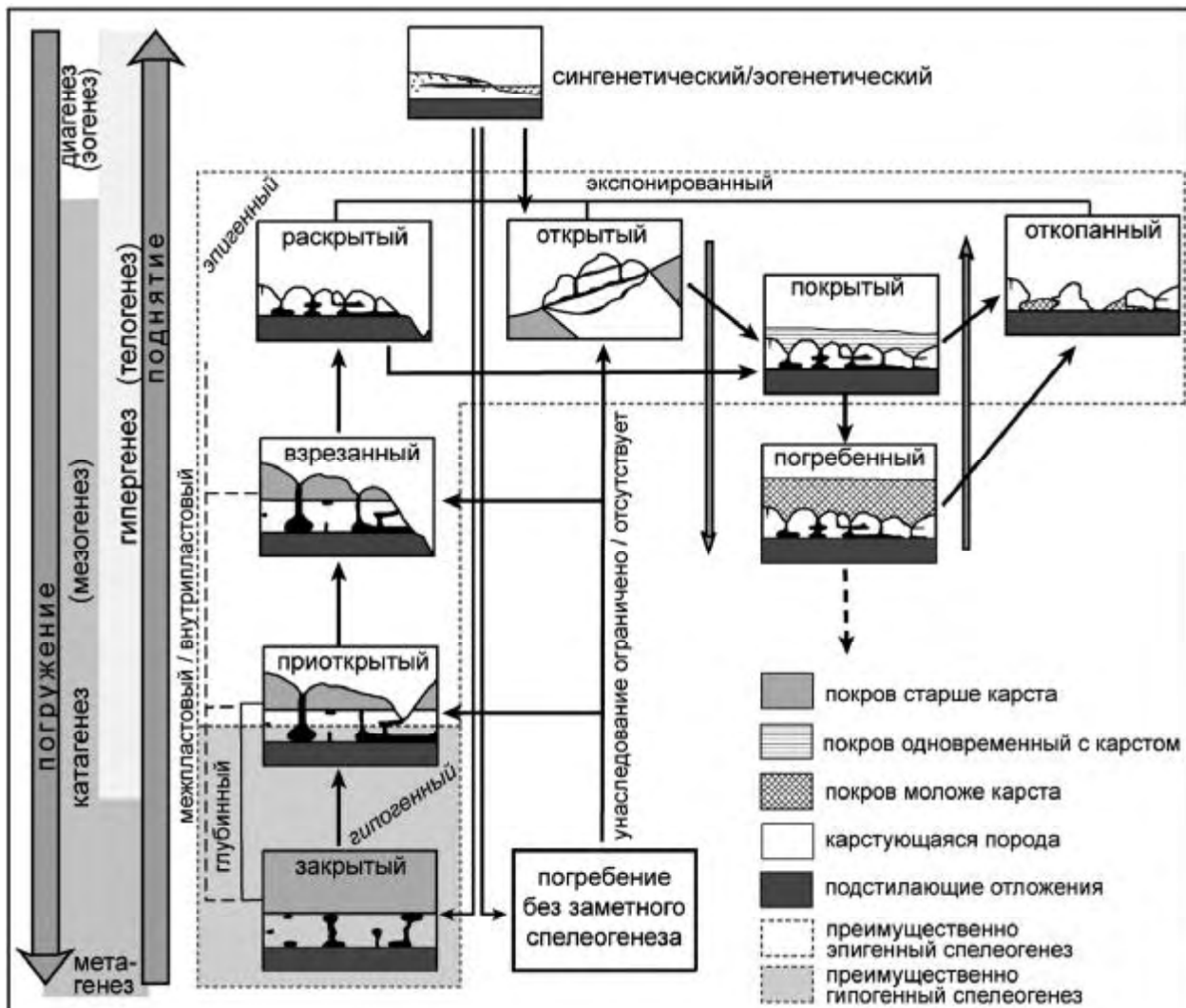


Рис. 2. Эволюционная классификация типов карста (по А. В. Klimchouk, 1996, с дополнениями)

ные типы карста: *приоткрытый* (*subjacent*), *взрезанный* (*entrenched*) и *раскрытый* (*denuded*). В неблагоприятных условиях (малоинтенсивный недостаточно длительный водообмен, преобладание геохимического режима цементации) существенного закарстования в условиях погребения может не произойти вообще, а развитие карста может начаться лишь после частичного (приоткрытый и взрезанный карст) или полного экспонирования пород на поверхность. Последняя ситуация характеризует тип *открытого карста* (*open karst*), развивающегося исключительно под воздействием поверхностных факторов. Раскрытый и открытый карст развиваются в условиях экспонирования растворимых пород на поверхность, но различаются по своей эволюционной истории и наличию карстовых форм, унаследованных от предшествующих стадий.

Развитие покрова на экспонированных карстующихся породах, который формируется сингенетично с закарстованием, создает *покрытый карст* (*covered karst*) (в понимании Р. А. Цыкина, 1985). Повторные циклы погребения уже закарстованных пород под более молодые (чем карст) осадки создают обстановки *погребенного карста* (*buried karst*). Новое экспонирование погребенного карста создает *откопанный карст* (*exhumed karst*).

Формальными лито(карсто)стратиграфическими и геоморфологическими критериями различия типов карста основной эволюционной линии являются следующие.

В *закрытом карсте* его проявления на поверхности не выражены, за исключением отдельных провальных форм, но процесс может развиваться под перекрывающими толщами с образованием полостей и карс-



товой проницаемости. В *приоткрытом карсте*, к которому относятся территории со слабопроницаемым покровом, частично вскрытым эрозией, проявления выражены на поверхности в виде провально-просадочных и поглощающих форм, перфорирующих покров, а также форм восходящей разгрузки. Во *врезанном карсте* карстующаяся толща остается на большей части территории под покровом некарстующихся слабопроницаемых пород, но полностью врезана и в значительной степени сдренирована глубокими эрозионными врезами. Карст выражен на поверхности в виде провальных и поглощающих форм, перфорирующих покров, а также в формах склоновых обнажений. В *раскрытом карсте* некарстующиеся перекрывающие толщи практически полностью удалены денудацией и на растворимых породах развиваются полноценные карстовые ландшафты. Характерной особенностью карстовых ландшафтов в полностью или частично раскрытом карсте является подавляющее преобладание замкнутых форм, а также недоразвитость эрозионных систем и гидросети вследствие развитого дренирования подземными системами стока.

Начиная со стадии приоткрытого карста, карстовые системы в возрастающей степени взаимодействуют с поверхностными условиями и факторами, в связи с чем радикально изменяются граничные условия водообмена и развития карстовых систем. Их развитие становится одним из ведущих факторов рельефообразования и формирования гидрологических особенностей территорий.

Факторы и процессы карстообразования в закрытых гидрогеологических структурах (водонапорных системах) существенно отличны от таковых в гидрогеологически раскрытых обстановках, тогда как приоткрытые и врезанные структуры являются переходными от закрытого карста к раскрытому. Наибольшее значение имеют тип геогидродинамической системы (включающий условия питания подземных вод данной области гидролитосферы), интенсивность водообмена и геогидрохимические условия. Все эти факторы зависимы от глубины залегания формаций и степени гидрогеологической раскрытости. Соответственно раз-

личаются механизмы спелеогенеза и структуры карстовых систем, формирующихся в различных типах карста (Климчук, 2008, 2009; Speleogenesis: Evolution of Karst Aquifers, 2000).

Поскольку выделяемые типы отражают стадии развития карста в контексте тектонической и геоморфологической эволюции регионов, территории с различными типами карста часто образуют смежные зоны, положение и развитие которых контролируются дифференцированными неотектоническими движениями.

### Генетические типы карста

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

Генетические типы карста предлагается выделять по происхождению структур каналовой проницаемости — типам спелеогенеза. Кардинальные различия в условиях питания и циркуляции подземных вод в закрытых и открытых 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 различными спелеогенетическими механизмами и приводят к формированию различных структур пустотности и каналовой проницаемости (Klimchouk, 2007, 2009б).

*Гипогенный карст* формируется в условиях водонапорных систем вследствие восходящего движения вод через слои и толщи растворимых пород. Он генетически не связан с поверхностью и местным поверхностным питанием и может развиваться на различных, в том числе 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 карстообразованием. В гипогенном спелеогенезе действуют механизмы подавления обратной связи между расходом и скоростью роста каналов, т. е. подавляется тенденция к избирательному развитию каналов, характерная для эпигенного спелеогенеза (Климчук, 2006, 2008; Klimchouk, 2000, 2003, 2007; Rehr et al., 2008), что может приводить к формированию первазийной пустотности при наличии соответствующих структурных предпосылок и равномерного площадного питания. Карстовая пустотность гипогенного происхождения может намного превышать таковую в гидрогеологически открытом карсте (примерно в 5 раз в плане и на порядок в объеме), но 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, 2009a, 2009b). Основное гидрогеологическое значение гипогенного спелеогенеза состоит в развитии (усилении) вертикальной гидравлической связности 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 эволюции карстового рельефа. Механизм эпигенного спелеогенеза заключается в сильной обратной связи между расходом в формирующихся каналах и скоростью их роста, что приводит к выраженной избирательности спелеогенного развития и формированию преимущественно древовидных полостных структур, обеспечивающих возрастание концентрации стока в направлении гидравлического градиента. Проницаемость закарстованных пород отличается крайне высокой неоднородностью и анизотропией. Типичные каналовые системы эпигенного происхождения демонстрируют невысокую площадную плотность (в сред-

нем 16 км/км<sup>2</sup>) и небольшие площадные (6,4%) и объемные (0,4%) показатели карстовой пустотности, но проводят практически весь сток, часто на большие расстояния (Климчук, 2008). В зрелых карстовых системах средние скорости карстовых вод измеряются сотнями и тысячами м/сутки, а движение вод почти всегда турбулентно. Режим источников отличается большими вариациями расходов.

Эволюционные и генетические типы карста коррелируют между собой следующим образом. Сингенетический/эогенетический карст в молодых диагенетически незрелых осадках является эпигенным, хотя механизм спелеогенеза в прибрежных и островных обстановках отличается своеобразием, связанным с действием в зоне смешения пресных и морских вод (Mylroie, Catew, 2000). Закрытый карст является исключительно гипогенным. В приоткрытом карсте могут действовать как гипогенный, так и эпигенный спелеогенез, но гипогенный спелеогенез часто доминирует. Взрезанный и раскрытый карсты характеризуются подавляющим доминированием эпигенного спелеогенеза, но содержат унаследованные гипогенные компоненты, которые могут перерабатываться эпигенным процессом или становиться реликтовыми. В обоих этих типах карста могут встречаться и активные гипогенные системы, находящиеся на фазе вырождения. Открытый карст характеризуется исключительно эпигенным спелеогенезом.

### **Дальнейшее развитие эволюционной типологии карста**

В рамках предложенной классификационной схемы типы карста рассматриваются как последовательные стадии его эволюции, между которыми 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, производные от определенных комбинаций: 1) структурных предпосылок водообмена, 2) режимов водообмена, 3) условий питания и конфигурации контуров питания-

разгрузки, 4) химического и газового состава подземных вод, 5) степени наследования карстовых структур от предшествующих стадий. Это позволяет использовать данную классификацию для решения широкого круга научных и практических проблем, связанных с карстом. В частности, ее правомерность и эффективность апробированы использованием в качестве концептуальной основы в организации фундаментальной международной монографии по спелеогенезу (*Speleogenesis: Evolution of Karst Aquifers*, 2000), а также в разработке европейского подхода к оценке провально-просадочной опасности гипсового карста (проект EC ROSES) (Klimchouk, 2005; Younger et al., 2005).

Предложенная схема является каркасом, в рамках которого должно осуществляться дальнейшее выделение типологических категорий карста (подтипов, вариантов) для более полного отражения его природного разнообразия. При этом могут использоваться различные критерии, существенные для исследования и отражения вариативности карста в пределах того или иного типа, группы типов или всей классификационной схемы. Так, ко всей классификационной схеме применимо выделение подтипов по литологии карстующихся толщ, по основным гидрогеологическим структурам (артезианские бассейны и адбассейны, гидрогеологические массивы и адмассивы; Пиннекер, 1977), по тектоническим (геодинамическим) режимам. Типы карста основной эволюционной ветви могут подразделяться по гидрогеохимическим обстановкам, а определенные литологические подтипы — по действующим химическим процессам растворения. В группе типов глубинного карста целесообразно выделение подтипов по условиям питания и разгрузки по отношению к смежным в разрезе толщам, а также по взаимодействию элементарных гидрогеологических структур карстующейся и смежных толщ. В группе типов экспонированного карста (а также, вероятно, в типе взрезанного карста) целесообразно выделение подтипов по климатическим и геоморфологическим основаниям. Эти вопросы требуют дальнейшей разработки.

## **Заключение**

Эволюционная типология карста основана на рассмотрении геологической эволюции тела карстующихся пород (пласта, формации) и водообменной системы, отражающей такие базовые закономерности геологического развития, как направленность и цикличность.

Различные стадии постседиментационного преобразования пород и развития геогидродинамических систем характеризуются определенными 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 в значительной степени обусловлена процессами тектонической и геоморфологической эволюции, которые определяют изменение граничных условий водообмена и спелеогенеза.

Таким образом, в рамках предложенной классификации типы карста отражают последовательные стадии его эволюции, между которыми 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 и др.), что позволяет использовать данную классификацию для решения широкого круга научных и практических проблем, связанных с карстом.

Генетические типы карста выделяются по происхождению структур каналовой проницаемости — типам спелеогенеза (гипогенному и эпигенному). Эволюционные типы карста не всегда однозначно указывают на его происхождение и могут включать реликтовые карстовые системы различного генезиса. Тем не менее они хорошо увязы-

ваются с генетическими типами, поскольку интегрально характеризуют обстановки спелеогенеза, тем самым указывая на доминантные спелеогенетические механизмы, которые актуализируются в данных обстановках. Кроме того, положение эволюционных типов карста в ряду закономерного развития указывает на возможное унаследование структур пустотности и проницаемости от предшествующих стадий карстовой эволюции.

1. *Андрейчук В. Н.* О подходах к изучению карста // *Спелеология и карстология*. — 2010. — № 3. — С. 5—10.
2. *Вернадский В. И.* Избранные сочинения. Т. 4. Кн.2. — М.: Изд-во АН СССР, 1960.
3. *Водообмен* в геологических структурах Украины. Методы изучения водообмена / Шестопалов В. М., Ситников А. Б., Лялько В. И. др. — Киев: Наук. думка, 1988. — 272 с.
4. *Глухов И. Г.* Гидрогеологические признаки типов карста Горного Крыма // *Новости карстологии и спелеологии*. — М., 1961. — № 2. — С. 17—21.
5. *Дублянская Г. Н., Дублянский В. Н.* Картографирование, районирование и инженерно-геологическая оценка закарстованных территорий. — Новосибирск: Изд-во СО РАН, 1992. — 144 с.
6. *Дублянский В. Н., Дублянская Г. Н.* Карстование. Ч. 1. Общее карстование. — Пермь: Изд-во Перм. ун-та, 2004. — 306 с.
7. *Зайцев И. К., Толстихин Н. И.* Классификация подземных вод и породной основы для гидрогеологического картирования и районирования // *Проблемы гидрогеологического картирования и районирования*. — Л., 1971. — С. 3—15.
8. *Зайцев И. К., Толстихин Н. И.* Закономерности распространения и формирования минеральных (промышленных и лечебных) подземных вод на территории СССР. — М.: Недра, 1972. — 279 с.
9. *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.
10. *Карцев А. А.* Гидрогеология нефтяных и газовых месторождений. — М.: Недра, 1972. — 280 с.
11. *Климчук А. Б.* Карстообразование в артезианских условиях: Концепция поперечного спелеогенеза // *Геол. журн.* — 2006. — № 2-3. — С. 181—191.
12. *Климчук А. Б.* Особенности и проблемы гидрогеологии карста: спелеогенетический подход // *Спелеология и карстология*. — 2008. — № 1. — С. 23—46.
13. *Климчук А. Б.* Эпикарст: гидрогеология, морфогенез и эволюция. — Симферополь: УИСК-Сонат, 2009. — 112 с.
14. *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.
15. *Пиннекер Е. В.* Проблемы региональной гидрогеологии (закономерности распространения и формирования подземных вод). — М.: Наука, 1977.
16. *Тимофеев Д. А., Дублянский В. Н., Кикнадзе Т. З.* Терминология карста. — М.: Наука, 1991. — 259 с.
17. *Цыкин Р. А.* Отложения и полезные ископаемые карста. — Новосибирск: Наука, 1985. — 166 с.
18. *Цыкин Р. А., Цыкина Л. Ж.* Карст восточной части Алтае-Саянской складчатой области и связанные с ним полезные ископаемые. — Новосибирск: Наука, 1978. — 104 с.
19. *Шварцев С. Л.* Общая гидрогеология. — М.: Недра, 1996. — 423 с.
20. *Choquette P. W., Pray L. C.* Geologic nomenclature and classification of porosity in sedimentary carbonates // *Am. Assoc. of Petrol. Geol. Bulletin*. — 1970. — № 54. — P. 207—250.
21. *Ford D. C., Williams P. W.* Karst hydrogeology and geomorphology. — Chichester: John Wiley and Sons, 2007. — 565 p.
22. *Groundwater as a Geomorphic Agent / Ed. LaFleur, R. G.* — Boston: Allen and Unwin, 1984. — 390 p.
23. *Huntoon P. W.* Is it appropriate to apply porous media groundwater circulation models to karstic aquifers? // *Groundwater models for resources analysis and management (Ed. Aly I.E.—K.)*. — Boca Raton: Lewis Publishers, 1995. — P. 339—358.
24. *Klimchouk A. B.* The typology of gypsum karst according to its geological and geomorphological evolution / *Gypsum karst of the world (Ed. Klimchouk A. B., Lowe, D., Cooper A., Sauro U.)*. — Intern. Speleology, Theme Issue, 25 (3-4), 1996. — 307 p.
25. *Klimchouk A. B.* Speleogenesis under deep-seated and confined settings // *Speleogenesis:*

- Evolution of karst aquifers (Ed. Klimchouk A. B., Ford D. C., Palmer A. N., Dreybrodt W.). — Huntsville: Nat. Speleol. Soc. 2000. — P. 312—336.
26. *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. — P. 1—18.
  27. *Klimchouk A. B.* Subsidence hazards in different types of karst: Evolutionary and speleogenetic approach // *Environmental Geology*. — 2005. — Vol. 48, № 3. — P. 287—296.
  28. *Klimchouk A. B.* Hypogene speleogenesis: Hydrogeological and morphogenetic perspective. — Carlsbad: National Cave and Karst Research Institute, 2007. — 106 p.
  29. *Klimchouk A.* Morphogenesis of hypogenic caves // *Geomorphology*. — 2009a. — № 106. — P. 100—117.
  30. *Klimchouk A. B.* Principal features of hypogene speleogenesis // *Hypogene Speleogenesis and Karst Hydrogeology of Artesian Basins* (Ed. Klimchouk A. B., Ford D.C.). — Simferopol: Ukrainian Institute of Speleology and Karstology, 2009b. — P. 7—16.
  31. *Klimchouk A. B., Ford D.* Types of karst and evolution of hydrogeologic setting // *Speleogenesis: Evolution of karst aquifers* (Ed. Klimchouk A. B., Ford D. C., Palmer A. N., Dreybrodt W.). — Huntsville: Nat. Speleol. Soc. 2000. — P. 45—53.
  32. *Klimchouk A. B., Ford D. C.* Lithological and structural controls of dissolutional cave development // *Speleogenesis: Evolution of karst aquifers* (Ed. Klimchouk A. B., Ford D. C., Palmer A. N., Dreybrodt W.). — Huntsville: Nat. Speleol. Soc., 2000. — P. 54—64.
  33. *Myroie J. E., Carew J. L.* Speleogenesis in coastal and oceanic settings // *Speleogenesis: Evolution of karst aquifers* (Ed. Klimchouk A. B., Ford D. C., Palmer A. N., Dreybrodt W.). — Huntsville: Nat. Speleol. Soc. 2000. — P. 226—233.
  34. *Palmer A. N.* Cave geology. — Dayton: Cave Books, 2007. — 454 p.
  35. *Quinlan J. F.* Types of karst, with emphasis on cover beds in their classification and development / PhD Thesis, Univ. of Texas at Austin, 1978.
  36. *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.
  37. *Sharp J. M., Kyle J. R.* The role of ground-water processes in the formation of ore deposits // *The geology of north america, hydrogeology* (Ed. W. Back J.S.R., P.R. Seaber). — Boulder, 1988. — P. 2.
  38. *Speleogenesis: Evolution of Karst Aquifers* / Ed. Klimchouk A. B., Ford D. C., Palmer A. N., Dreybrodt W. — Huntsville: Nat. Speleol. Soc., 2000. — 527 p.
  39. *Toth J.* Hydraulic continuity in large sedimentary basins // *Hydrogeology J.*, 1995. — № 3 (4). — P. 4—15.
  40. *Toth J.* Groundwater as a geologic agent: An overview of the causes, processes, and manifestations // *Ibid.* — 1999. — № 7. — P. 1—14.
  41. *Younger P. L., Lamont-Black J., Gandy C. J.* "Risk of Subsidence due to Evaporite Solution" (ROSES) — Introduction to a Special Issue of *Environmental Geology* // *Environmental Geology*. — 2005. — № 48. — P. 285—286.

Укр. ин-т спелеологии  
и карстологии МОН и НАН Украины,  
Симферополь  
E-mail: klim@speleogenesis.info

Статья поступила  
10.06.10