



Acta Geographica Silesiana

20/1–2 (61–62)

Wydział Nauk Przyrodniczych
Uniwersytet Śląski
Sosnowiec 2026

Rada Redakcyjna (Editorial board):

Tadeusz SZCZYPEK – *Uniwersytet Śląski, Sosnowiec* – redaktor naczelny (Editor-in Chief)

Wacław ANDREJCZUK – *Akademia Górnośląska im. Wojciecha Korfańskiego, Katowice* – redaktor tematyczny – geografia fizyczna (thematic editor – physical geography)

Jolanta PEŁKA-GOŚCINIAK – *Uniwersytet Śląski, Sosnowiec* – redaktor językowy (language editor)

Ivan I. PIROZHNIK – *Uniwersytet Pomorski, Słupsk* – redaktor językowy (language editor)

Oimahmad RAHMONOV – *Uniwersytet Śląski, Sosnowiec* – redaktor tematyczny – ekologia (thematic editor – ecology)

Jerzy RUNGE – *Uniwersytet Śląski, Sosnowiec* – redaktor statystyczny (statistical editor)

Maria TKOCZ – *Akademia Górnośląska im. Wojciecha Korfańskiego, Katowice* – redaktor tematyczny – geografia społeczno-ekonomiczna (thematic editor – socio-economic geography)

Rada Naukowa (Associate editors)

Żanna ATUTOWA – *Instytut Geografii im. W. B. Soczawy SO RAN, Irkuck (Rosja)*

Mirzohamdam E. CHOŁBIEGOW – *Tadżycki Państwowy Uniwersytet Medyczny im. Awicenny, Duszanbe (Tadżykistan)*

Radosław DOBROWOLSKI – *Uniwersytet Marii Curie-Skłodowskiej, Lublin*

Romeo EFTIMI – *Albańska Służba Geologiczna, Tirana (Albania)*

Jacek JANIA – *Uniwersytet Śląski, Sosnowiec*

Karel KIRCHNER – *Instytut Geoniki Akademii Nauk Republiki Czeskiej, Brno (Czechy)*

Marzena LAMPARSKA – *Uniwersytet Śląski, Sosnowiec*

Regina MORKŪNAITĖ – *Centrum Badań Przyrodniczych, Instytut Geologii i Geografii, Wilno (Litwa)*

Bimba-Cyrien B. NAMZAŁOW – *Buriacki Uniwersytet Państwowy, Ulan-Ude, Rosja*

Nadieżda A. OZIEROWA – *Instytut Historii Nauk Przyrodniczych i Techniki im. S.I. Wawilowa RAN, Moskwa (Rosja)*

Magdalena RATAJCZAK-SZCZERBA – *Uniwersytet im. A. Mickiewicza, Poznań*

Bogdan RIDUSZ – *Narodowy Uniwersytet Czerniowiecki im. J. Fiedżkowicza, Czerniowce (Ukraina)*

Fiodor A. ROMANIENKO – *Moskiewski Uniwersytet Państwowy im. M. W. Łomonosowa, Moskwa (Rosja)*

József SZABÓ – *Uniwersytet Debreczyński, Debreczyn (Węgry)*

Zdeněk SZCZYRBA – *Uniwersytet Palackiego, Olomuniec (Czechy)*

Borys P. WŁASOW – *Białoruski Uniwersytet Państwowy, Mińsk (Białoruś)*

Recenzenci (Reviewers):

Rasosław Dobrowolski, Natalia M. Erman, Marzena Lamparska, Andrzej Richling, Martyna Rzętała, Wiera M. Sawienkowa

Copyright © 2026

by Wydział Nauk Przyrodniczych Uniwersytetu Śląskiego

by Authors

Wydawca:

Wydział Nauk Przyrodniczych Uniwersytetu Śląskiego

ul. Będzińska 60, 41-200 Sosnowiec

ISSN 1897–5100

Elektroniczna wersja czasopisma jest dostępna pod adresem: <http://www.ags.wnp.us.edu.pl>

Electronic version of journal – <http://www.ags.wnp.us.edu.pl>

Za wiarygodność informacji przedstawionych w artykułach odpowiadają Autorzy.

Poglądy redakcji nie zawsze muszą być zgodne z opiniami Autorów.

За достоверность сведений, изложенных в статьях, ответственность несут авторы.

Мнение редакции может не совпадать с мнением авторов материалов.

Authors have responsibility for credibility of information set out in the articles.

Editorial opinion can be out of phase with opinion of the authors.

Spis treści
Оглавление
Contents

Wiaczesław A n d r e j c z u k : Organizacja krajobrazu krasowego – Organisation of the karst landscape (<i>Организация карстового ландшафта</i>).....	5
Wiaczesław A n d r e j c z u k , Tadeusz S z c z y p e k , Wojciech P u c h e j d a , Bruno Josef M e r t a : „Góry Cukierkowe” w Azerbejdżanie – interesujący obiekt geologiczny i turystyczny (<i>„Леденцовые горы” в Азербайджане — интересный геологический и туристический объект; “Candy Cane Mountains” in Azerbaijan – an interesting geological and tourist site</i>).....	95
Надежда А. О з е р о в а : Из истории изучения атмосферы Земли в период до начала Первой мировой войны (<i>Z historii badań atmosfery ziemskiej w okresie do I wojny światowej; From the history of research of the Earth's atmosphere in the period before the outbreak of the First World War</i>).....	113

Wiaczesław Andrejczuk

Akademia Górnośląska im. Wojciecha Korfańtego w Katowicach, ul. Harcerzy Września 3, 40-659 Katowice,
Polska; e-mail: wiaczeslaw.andrejczuk@gwsh.com (ORCID 0000-0002-9656-4542)

Organizacja krajobrazu krasowego/Organization of the karst landscape

Struktura artykułu

WSTĘP	7
DEFINICJE I METODOLOGIA	9
Kras	9
Metodologia całościowa w badaniach krasologicznych	10
Krajobraz	14
Kras w ujęciu synergetycznym.....	15
Krajobraz krasowy jako stadium samoorganizacji megasystemu krasowego.....	16
KRAJOBRAZ KRASOWY JAKO SYSTEM	21
Struktura krajobrazu krasowego jako systemu	21
Wertykalna struktura geokomponentowa	22
Elementy pionowej struktury – geokomponenty	22
Powiązania materialno-energetyczne geokomponentów	28
Aspekty paradynamiczne i paragenetyczne pionowej struktury krajobrazów krasowych	28
Horyzontalna struktura kompleksowa (morfologiczna).....	29
Elementy struktury horyzontalnej – geokompleksy	29
Powiązania materialno-energetyczne pomiędzy geokompleksami.....	32
Aspekty paradynamiczne i paragenetyczne poziomej struktury krajobrazów krasowych	33
Sprzężenie wertykalnej i horyzontalnej struktury krajobrazów krasowych.....	34
Związki krajobrazu krasowego z otoczeniem	35
Funkcjonowanie i rozwój krajobrazu krasowego	37
Funkcjonowanie	37
Dynamika i stabilność	38
Specyfika rozwoju (samorozwoju) i ewolucji	40
ZASADY OCHRONY KRAJOBRAZÓW KRASOWYCH	45
Problem ochrony krasu i jaskiń	45
Zasady ochrony	45
Sytuacje problemowe.....	47

Structure of paper

PREFACE.....	50
DEFINITIONS AND METHODOLOGY.....	51
Karst.....	51
Comprehensive methodology in karst research.....	52
Landscape.....	55
Karst landscape as a stage of self-organization of karst megasystem.....	58
KARST LANDSCAPE AS A SYSTEM.....	63
The structure of the karst landscape as a system.....	63
Vertical structure.....	64
Elements of vertical structure – geo-components.....	64
Material and energy relations of geo-components.....	70
Paradynamic and paragenetic aspects of the vertical structure of karst landscapes.....	71
Horizontal complex (morphological) structure.....	71
Elements of the horizontal structure – geocomplexes	71
Material and energy connections between geo-complexes.....	74
Paradynamic and paragenetic aspects of the horizontal structure of the karst landscape.....	75
Conjugacy of vertical and horizontal structures of karst landscapes.....	77
Relationships between the karst landscape and its surrounding.....	77
Functioning and development of the karst landscape.....	79
Functioning.....	79
Dynamics and stabilization.....	80
Specificity of the development (self-development) and evolution.....	82
PRINCIPLES OF KARST LANDSCAPE PRESERVATION.....	87
Problems of karst and caves preservation.....	87
The principles of preservation.....	87
Problematic situations.....	88
LITERATURA – REFERENCES	92

Структура статьи

	польский / английский
ВВЕДЕНИЕ	7 / 50
ОПРЕДЕЛЕНИЯ И МЕТОДОЛОГИЯ	9 / 51
Карст.....	9 / 51
Целостная методология в карстологических исследованиях	10 / 522
Ландшафт.....	14 / 15
Синергетический подход к изучению карста	15 / 56
Карстовый ландшафт как стадия самоорганизации карстовой мегасистемы.....	16 / 58
КАРСТОВЫЙ ЛАНДШАФТ КАК СИСТЕМА	21 / 63
Структура карстового ландшафта как системы	21 / 63
Вертикальная геокомпонентная структура	22 / 64

Элементы вертикальной структуры – геокомпоненты.....	22 / 64
Материально-энергетические связи геокомпонентов	28 / 70
Парадинамические и парагенетические аспекты вертикальной структуры карстовых ландшафтов	28 / 71
Горизонтальная (морфологическая) структура.....	
Элементы горизонтальной структуры – геокомплексы	29 / 71
Материально-энергетические связи геокомплексов.....	32 / 74
Парадинамические и парагенетические аспекты горизонтальной структуры карстовых ландшафтов	33 / 75
Сопряжение вертикальной и горизонтальной структур карстовых ландшафтов	34 / 77
Связи карстового ландшафта с окружением	35 / 77
Функционирование и развитие карстового ландшафта	37 / 79
Функционирование	37 / 79
Динамика и устойчивость.....	38 / 80
Специфика развития (саморазвития) и устойчивость.....	40 / 82
ПРИНЦИПЫ ОХРАНЫ КАРСТОВЫХ ЛАНДШАФТОВ	45 / 87
Проблема охраны карста и пещер	45 / 87
Принципы охраны	45 / 87
Проблемные ситуации.....	47 / 88
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	92.

Słowa kluczowe: kras, krajobraz, krajobraz krasowy, geosystem, samoorganizacja

Key words: karst, landscape, karst landscape, geosystem, selforganization

Ключевые слова: карст, ландшафт, карстовый ландшафт, геосистема, самоорганизация

WSTĘP

Obszary krasowe (krajobrazy) są bardzo specyficzne. Różnią się one od innych obszarów charakterystyczną rzeźbą, stanowiącą odrębny typ genetyczny, szczególnym reżimem wodnym i siecią hydrograficzną (lub jej brakiem), swoistymi rodzajami gleb (na przykład *redziny*), ekosystemami o odmiennym składzie gatunkowym flory i fauny, a także swoistym charakterem morfologicznych i fizjologicznych przystosowań organizmów do specyficznych (krasowych, jaskiniowych) warunków środowiskowych.

Wyraźnie zaznaczająca się odmienność obszarów krasowych związana jest, jak dobrze wiadomo, ze szczególnym procesem

zachodzącym w skorupie ziemskiej i na jej powierzchni – rozpuszczaniem przez krążące wody określonej grupy podatnych na rozpuszczanie skał (tzw. skał krasowięjących). Proces ten w swej istocie ma naturę hydrologiczną (hydrogeologiczną), ponieważ dotyczy oddziaływania wód na skały i zachodzi głównie pod ziemią. W miarę hydrologicznego „dojrzewania” masywu skalnego, proces rozpuszczania stopniowo – ewolucyjnie przekształca się w *proces krasowy*, który z kolei „powołuje do życia” szereg innych – towarzyszących i pochodnych procesów (erozja, zapadanie się powierzchni ziemi, obwały, osuwiska itp.), stając się *systemem procesów*. Działając wspólnie pod ziemią i na jej powierzchni procesy te kształtują rzeźbę, a co

za tym idzie – cały krajobraz, którego komponenty, zarówno abiotyczne (skały, wody, powietrze), jak i biotyczne (rośliny, zwierzęta) czy antropogeniczne (człowiek), wzajemnie dostosowując się tworzą specyficzny i złożony system środowiskowy – **krajobraz krasowy** (KK).

System ten (geosystem krasowy) cechuje swoista *organizacja*, wynikająca z ewolucji samego procesu polegającego na *samoorganizacji* (stopniowy rozwój sieci kanałów, formowanie się próżni podziemnych itd.). Skutkiem (jak zresztą i przyczyną – na późniejszych etapach rozwoju) ewolucyjnej samoorganizacji jest wy-

kształcenie specyficznej *przestrzennej* i *funkcjonalnej struktury* systemu krasowego (powiązań i wzajemnych oddziaływań elementów), stanowiącej istotę jego organizacji w dojrzałych stadiach rozwoju.

Specyfika krajobrazu krasowego najbardziej szczegółowo może być wyjaśniona i pokazana za pomocą *paradygmatu systemowego*. Wiąże się to z przedstawieniem KK, jako złożonego systemu przyrodniczego o charakterystycznym składzie budujących go elementów, ich specyficznym ułożeniu przestrzennym (strukturze) i sposobie wzajemnego oddziaływania (funkcjonowania).

DEFINICJE I METODOLOGIA

Kras

Zazwyczaj *kras* jest rozumiany zbiorczo: jako określenie kompleksu specyficznych *procesów, zjawisk i form*, występujących w obrębie obszarów zbudowanych z tzw. skał krasowięjących i będących skutkiem trwałego oddziaływania będących w obiegu wód (atmosferycznych, powierzchniowych i podziemnych) na skały. Skupia się w tym pojęciu kilka aspektów tworzących ciąg genetyczny: procesualny → fenomenologiczny → morfologiczny, ze wspólnym mianownikiem w postaci określonego terytorium.

W sensie *procesualnym (geodynamicznym)* kras jest *systemem procesów*, wśród których wiodącą rolę – „dyrygenta” całej „orkiestry geodynamicznej” – odgrywa chemiczny proces rozpuszczania skał w cyklu obiegowym wody w przypowierzchniowej strefie litosfery¹. Proces rozpuszczania stanowi siłę napędową rozwoju systemu krasowego, a postępując, uruchamia też inne procesy geodynamiczne: zarówno denudacyjne (erozja, procesy grawitacyjne, w tym zapadliskowe i stokowe), jak i akumulacyjne (powstawanie residuum rozpuszczania skał, wypełnienie próżni podziemnych osadami i utworami mineralnymi i in.).

W sensie *fenomenologicznym*, procesom krasowym towarzyszą różnego rodzaju charakterystyczne *zjawiska*, często niespotykane poza obszarami krasowymi (zanikanie rzek pod ziemią, duże wypływy wód podziemnych na powierzchnię, zapadanie się gruntu itp.).

W sensie *geomorfologicznym*, skutkiem procesów krasowych są liczne specyficzne *formy rzeźby*, powstające pod ziemią (kawerny, kanały, próżnie, jaskinie, systemy jaskiniowe)

oraz na jej powierzchni (żłobki, leje, depresje, doliny krasowe, ostańce krasowe itp.).

Kras jest jednocześnie produktem ewolucyjnym specyficznych warunków środowiskowych, jak i kreatorem specyficznego środowiska przyrodniczego. W pierwszym przypadku mamy do czynienia z wieloma czynnikami (geologicznymi, hydrogeologicznymi, geomorfologicznymi, klimatycznymi, biotycznymi itp.) uczestniczącymi w procesie rozwojowym krasu, w drugim – z szeregiem skutków jego oddziaływania na podłoże geologiczne, wody powierzchniowe i podziemne, gleby itp., czyli na komponenty krajobrazu. Na tym polega wieloaspektowość krasu i z tym są związane różne akcenty stawiane w delfinacjach krasu przez przedstawicieli poszczególnych dyscyplin z zakresu nauk o Ziemi.

Geolodzy widzą w krasie przede wszystkim rodzaj skał (masywów, formacji), ulegających specyficznym przeobrażeniom pod wpływem rozpuszczającej działalności wód krążących w masywach. Rozpatrują go zarówno, jako jeden z mechanizmów ich destrukcji, jak i tworzenia się (krasolitogeneza), w tym formowania się specyficznych surowców mineralnych (tzw. złóż krasowych).

Hydrogeolodzy zwracają uwagę przeważnie na specyficzne warunki krążenia wód w krasowych masywach skalnych (czyli ich reżim) oraz na formowanie się ich zasobów w tzw. *kolektorach krasowych*.

Geomorfolodzy z kolei podkreślają specyfikę rzeźby (*odmienny typ*), rozwijającej się w obszarach krasowych.

Geografowie, patrząc na kras najbardziej kompleksowo i wieloaspektowo, rozpatrują go jako *swoisty typ środowiska przyrodniczego*, powstającego na skutek „systemointegrującego” oddziaływania krasu na wszystkie elementy środowiska: podłoże skalne, wody, rzeźbę, życie organiczne, glebę, itd. Wskutek rozwoju krasu, *krajobraz niekrasowy* stopniowo przeobraża się w *krajobraz krasowy*, czyli obszar o specyficznym charakterze rzeźby, stosunków wodnych, warunków mikroklimatycznych, flory i fauny oraz warunków życia człowieka.

¹ Górna przypowierzchniowa część litosfery, w której obrębie woda dzięki niskim temperaturom jest w stanie ciekłym i znajduje się w obiegu, czasami nazywana jest *hydrolitosferą*.

Odpowiednio do badanych (wspomnianych i pominiętych) aspektów, w nauce o krasie (*krasologii*) wyróżniane są różne działy tematyczne, np.: *geologia krasu*, *hydrologia* (w tym *hydrogeologia*) *krasu*, *geomorfologia krasu*, *geochemia krasu* itp. Wspomniane działy krasologii są dyscyplinami komponentowymi, badającymi przede wszystkim składniki środowiska krasowego. W ich arsenale metodycznym dominują więc metody analityczne, celujące w coraz głębsze poznawanie składowych systemu krasowego. Badają one różne strony ogólnie pojmowanego systemu krasowego i w ten sposób reprezentują sobą różne aspekty badań krasologicznych (geologiczne, hydrologiczne, geomorfologiczne, biologiczne, geochemiczne itp.), lecz ze względu na jednostronny charakter, nie mogą stanowić adekwatnej (holistycznej) metodologii do badań krajobrazu krasowego, jako systemu przyrodniczego w całości. Spojrzenie i badanie całościowe reprezentować może tylko określone (kompleksowe, systemowe) *podejście naukowe* do problemu.

Metodologia całościowa w badaniach krasologicznych

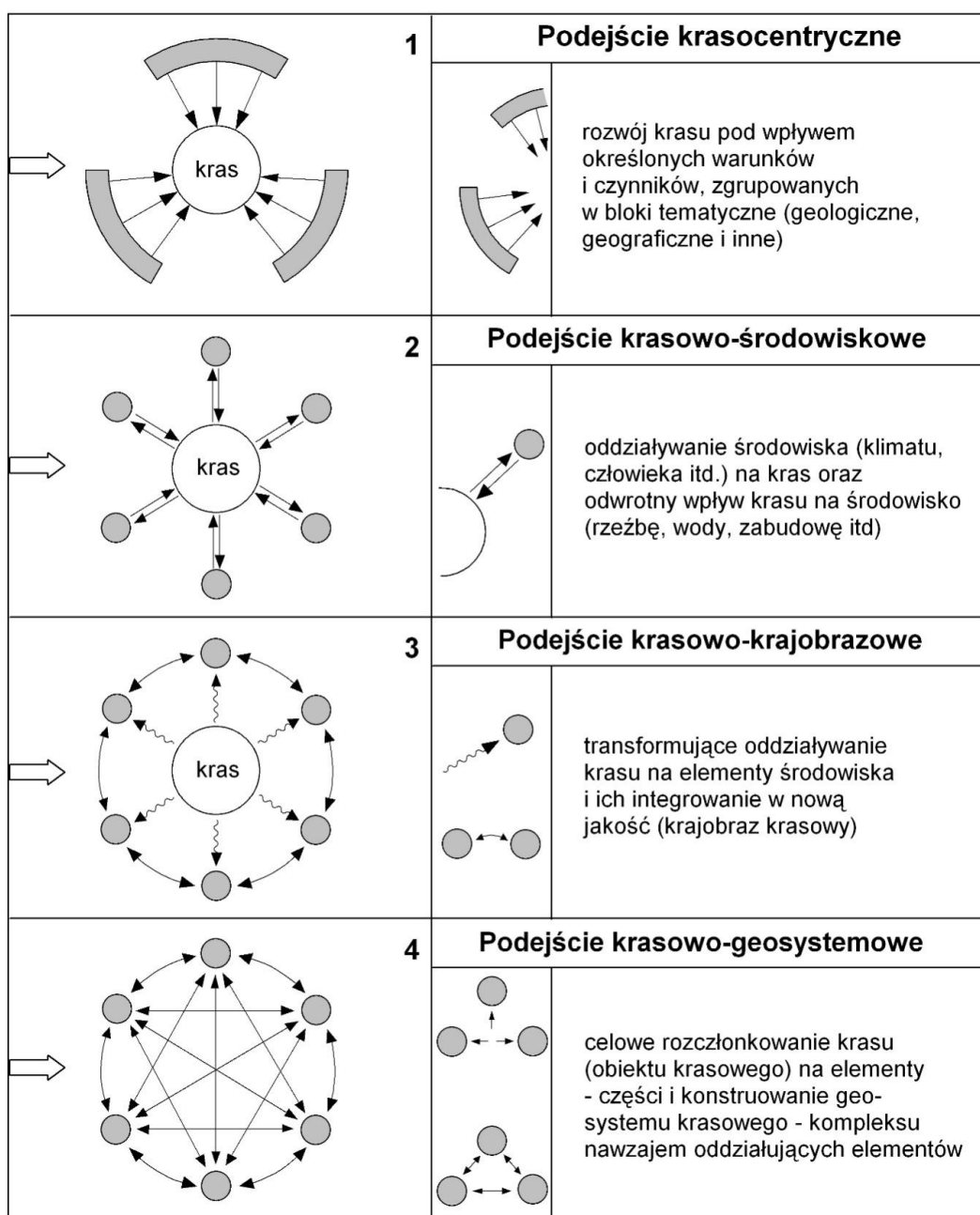
Podejście naukowe, jako kategoria naukowo-poznawcza, implikuje pewną całościową wizję badanej rzeczywistości oraz odpowiednią organizację procesu badawczego. Jest zatem usytuowane nie w empirycznym (aspekt badawczy), a w metodologicznym (sposób badania przez określoną wizję) polu nauki. Termin „podejście” ma status ogólnonaukowy i jest narzędziem uniwersalnym (wspomnijmy o podejściach: *kompleksowym*, *systemowym*, *zasadzie antropicznej* i in.). Z reguły, podejścia jako takie są stosowane do obszarów badanej rzeczywistości (tematycznych, przestrzennych lub historycznych), mających oznaki względnej całościowości, strukturalności i złożonej organizacji (środowisko przyrodnicze, państwo, zbiorowisko organizmów, epoka renesansu, krajobraz itp.), co wymusza na badaczu ko-

nieczność adekwatnej strukturyzacji procesu poznawczego, właśnie stanowiącej istotę podejścia jako takiego. Dlatego stosowanie tych lub innych podejść w badaniach krasologicznych uwarunkowane jest całościowym spojrzeniem na kras jako na pewnego rodzaju *organizację*. Może to być, na przykład, kras jako zbiór genetycznie i przestrzennie powiązanych procesów i zjawisk, środowisko krasowe (konkretny obszar krasowy wraz z zamieszkującym go człowiekiem), krajobraz krasowy, masyw krasowy itp. Tylko w stosunku do pewnej organizacji (krasowej) możemy stosować takie pojęcie metodologiczne oraz narzędzie badawcze jak *podejście*.

Obecnie w krasologii najczęściej są realizowane 4 główne podejścia: krasocentryczne, krasowo-środowiskowe, krasowo-krajobrazowe oraz krasowo-geosystemowe (ANDREY-CHOUK, 2010) (rys. 1).

Podejście krasocentryczne

Reprezentuje tematyczną wersję podejścia *centrycznego*, sugerującego rozpatrywanie poznawanej (badanej) rzeczywistości (obiektu, zjawiska, procesu, obszaru) jako pewnej organizacji, funkcjonującej w warunkach ścisłego uzależnienia (genetycznego) od pewnych czynników (rys. 1-1). W ramach danego podejścia kras jest rozpatrywany jak pochodna zbiorczego oddziaływania szeregu czynników i warunków środowiskowych, czyli obecności skał krasowiejących, krążących w masywie wód, szczelinowatości skał, agresywności wody, warunków drenażu i wielu innych, bardziej szczegółowych (litologia i struktura skał krasowiejących, ilość opadów, temperatura wód, itp.), wpływających na przebieg procesu krasowienia lub na fizjonomię obszaru krasowego. Klasyczne przykłady takiego podejścia znajdujemy, między innymi, w radzieckiej literaturze krasologicznej z lat 50.–70. ubiegłego wieku (prace F. Sawarenskiego, D. Sokołowa, niektóre prace G. Maksymo-



Rys. 1. Główne podejścia holistyczne w badaniach krasowych (wg: ANDREYCHOUK, 2010)

wicza, W. Dublińskiego, A. Czikiszewa, R. Tsykina i wielu innych).

W pracach wspomnianych autorów zostały szeroko omówione tzw. zagadnienia „warunków i czynników rozwoju krasu”². Dys-

kutowano na temat spektrum czynników krasotwórczych: które z czynników są ważniejsze (niezbędne, decydujące), a które mniej ważne itd., w stosunku do centralnego pojęcia krasu, czasem nawet bez względu na rozbieżności w definiowaniu samego krasu. Podejście to ujawniało się w charakterze prowadzonych badań krasologicznych, w strukturze opracowań monograficznych na temat krasu tych lub innych obszarów, w prezentacji materiału w podręcznikach itd. Podejście to jest również stosowane obecnie, szczególnie w przypad-

² Za najbardziej rozbudowany przykład służyć może monografia Dmitrija Sokołowa *Osnownyje uslowija i faktory razwitiya karsta (Podstawowe warunki i czynniki rozwoju krasu)*, 1962.

kach prowadzenia kompleksowych badań krasologicznych na określonym terenie, jak również w pracach ogólnych na temat krasu.

Podejście krasowo-środowiskowe

Jest inną wersją podejścia centrycznego, czyli sugeruje rozpatrywanie relacji pomiędzy obiektem a jego otoczeniem (środowiskiem) (rys. 1-2). Podejście to jest obecnie szeroko stosowane w badaniach geoekologicznych (podejście *ekologiczne* lub *ekocentryczne*, *ekosystemowe*), w badaniach nad relacjami człowieka z naturą (*antropocentryczne*) itd., czyli wówczas, kiedy bada się wpływ środowiska na obiekt (naturę, człowieka, organizm itp.) i na odwrót: oddziaływanie obiektu na swoje otoczenie. W nawiązaniu do krasologii, podejście to było (od czasów J. Cwijića – ЦВИЈИЋ Ј., 1991) realizowane na szeroką skalę w badaniach krasologicznych przede wszystkim w zakresie geograficznym, kiedy kras rozpatrywano jako środowisko życia człowieka, łącznie z kwestiami *determinizmu krasowego*. Podejście to znalazło szerokie zastosowanie w krajach basenu Morza Śródziemnego, gdzie problemy krasu zawsze były wiązane z wodą i jej wykorzystaniem.

Podejście krasowo-środowiskowe (a szczególnie jego przeciwne skrzydło – oddziaływanie obiektu na kras) „ożywiło się” w ostatnich dziesięcioleciach w związku z aktywizacją gospodarczego oddziaływania człowieka na kras (na środowisko krasowe – tzw. kras technogeniczny, aktywizowany itp.) i towarzyszącymi mu następstwami, czasami katastrofalnymi (procesy zapadliskowe, osiadania terenu itd.).

Podejście krasowo-krajobrazowe

Jest szczególnym (krasowym) przypadkiem *podejścia krajobrazowego* (w rozumieniu krajobrazu szkoły wschodniej – jako pewnej terytorialnej, procesualnej i fizjonomicznej całości przyrodniczej). Podejście krajobrazowe sugeruje rozpatrywanie tego lub innego obszaru jako tworu całościowego, którego specyfika fizjonomiczna jest determinowana przez określone spektrum zachodzących w jego obrębie

procesów przyrodniczych kształtujących jego wygląd (obraz) (procesy wulkaniczne – krajobraz wulkaniczny, eoliczne – krajobraz pustynny, krasowe – krajobraz krasowy itp.). Wydaje się również, że ścisłość wewnętrznych powiązań komponentów (podłoża skalnego, wód, gleb, klimatu, bioty i in.) w tak pojmowanym krajobrazie (rys. 1-3), ze względu na jego procesualną specyfikę, jest wyższa od powiązań zewnętrznych krajobrazu (z otoczeniem). Wyrazem tego jest m. in. specyfika fizjonomiczna obszaru krajobrazowego. Uważa się również, że w kształtowaniu tego lub innego typu genetycznego krajobrazu zasadnicze znaczenie ma tzw. wiodący proces lub warunek, który integruje i podporządkuje przebieg innych procesów, ukierunkowuje rozwój krajobrazu i determinuje jego osobliwości. Taki warunek czy proces stanowić mogą: klimat (formowanie się krajobrazów pustynnych, polarnych), tektonika (krajobrazy dolin ryftowych), erozja i procesy osuwiskowe itp. Takim czynnikiem wiodącym, rozwojowym może być również występowanie na obszarze skał krasowiejących i krasu, który w trakcie rozwoju stopniowo podporządkowuje inne procesy i coraz głębiej przeobraża krajobraz, kształtując specyficzny (petrogeniczny, litogeniczny) jego typ – krasowy.

Podejście krasowo-krajobrazowe, w ujęciu opisanym powyżej, reprezentowane jest przeważnie w pracach badaczy wschodniej szkoły nauki o krajobrazie (i odpowiednio krasologów), np.: N. GVOZDETSKYI (1972, 1979), A. CHIKISHEV (1982), L. VOROPAI, V. ANDREYCHOUK, (1985), V. ANDREYCHOUK, M. PROSKURNYAK (1993), V. ANDREYCHOUK, L. VOROPAI (1993), M. PROSKURNYAK, V. ANDREYCHOUK (1998, 1999), V. ANDREYCHOUK (2007). Podejście to wydaje się być bardzo pożyteczne przy wyjaśnianiu ewolucji obszarów krasowych (formowania się krajobrazu) oraz dla objaśnienia specyfiki ich środowiska przyrodniczego. Jest korzystne również przy rozpatrywaniu kwestii gospodarowania w obrębie obszarów krasowych oraz ich ochrony.

Podejście krasowo-geosystemowe

Jest szczególnym przypadkiem *podejścia systemowego*, umożliwiającego rozpatrywanie badanego obiektu (zjawiska, obszaru) jako systemu, odpowiednią organizację procesu badawczego (algorytmu badawczego), a często również stosowanie specjalnych metod numerycznych (analizy systemowej, teorii grafów i in.) (rys. 1-4). Przy podejściu systemowym obiekt jest przedstawiany jako zbiór elementów i powiązań między nimi, a samo badanie skupia się przede wszystkim na zagadnieniach interakcji pomiędzy elementami, ponieważ właśnie interakcje determinują całościowe (systemopochodne) właściwości systemu.

Badania systemowe (jak i cała metodologia systemowa) coraz szerzej (już od kilku dziesięcioleci) są stosowane we wszystkich dziedzinach współczesnej nauki, w tym też w naukach przyrodniczych: biologii, ekologii, w mniejszym stopniu w geologii i geografii. Oprócz wielu innych zalet natury badawczej, podejście systemowe jest korzystne też dlatego, że pozwala na dość łatwą formalizację obiektu badawczego (funkcjonalnych powiązań jego elementów), co otwiera drogę do korzystania w szerokim zakresie z metod ilościowych oraz modelowania. Przy podejściu systemowym możliwe jest najbardziej pełne i stosowne zbadanie obiektu, ponieważ przy jego zastosowaniu ujawniają się nie tylko właściwości obiektu, pochodne od właściwości jego składników (elementów), ale i właściwości indukowane poprzez interakcje elementów (właściwości strukturo-pochodne czyli całościowe, systemowe). Te ostatnie właśnie są najważniejsze przy planowaniu tych lub innych działań w środowisku, w krajobrazie, ponieważ pozwalają na dostrzeżenie trendów rozwojowych i otwierają możliwości prognozowania zmian. Dlatego systemowe wizje i badania środowiska są obecnie najbardziej perspektywiczną i skuteczną metodologią.

Niestety, w badaniach krasologicznych podejście systemowe nie jest jeszcze szeroko stosowane. Jest to związane, z jednej strony, z dość wąskim zakresem badań krasowych na ogół-

nym tle badań przyrodniczych, z drugiej zaś – z brakiem wyraźnie sformułowanych koncepcji systemowych w krasie (systemowych wizji krasu). Pewien wyjątek stanowić mogą badania speleologiczne krążenia wód w masywach krasowych (krasowe systemy wodonośne realizujące cykl: zasilanie – tranzyt – odpływ). Chodzi przede wszystkim o ustalenie hydrologicznych (i nie tylko) powiązań obiektów (jaskiń, źródeł) i obszarów. W przypadku stosowania metod śledzenia przepływu wód ma miejsce sytuacja badawcza „czarnej lub szarej skrzynki”, kiedy wewnątrz masywu jest niedostępne (lub dostępne częściowo) i o budowie wewnętrznej systemu krasowego oraz procesach w nim zachodzących można sądzić na podstawie parametrów „wejścia” i „wyjścia” systemu. W przypadku, kiedy możemy speleologicznie „towarzyszyć” cyrkulacji wód w masywie krasowym, badając od wewnątrz ogniwa systemu krasowego – od wejścia do wyjścia – mówimy o sytuacji badawczej „białej skrzynki”.

Podejście systemowe może występować w kilku konfiguracjach metodologicznych, jak również różnorodne mogą być kreowane przez to podejście systemy (geosystemy) – *modele badawcze*. Inwariantem pozostaje jednak przedstawienie i badanie obiektu jako systemu. Podejście to bez wątpienia jest bardzo perspektywiczne w badaniach krasu, ponieważ obiekty krasowe (jaskinie, krasowe systemy wodonośne itp.) oraz obszary (masywy krasowe, krajobrazy) wyróżniają się złożonością swej budowy oraz dużym zróżnicowaniem procesów w nich zachodzących. A podejście systemowe, jak wiadomo, reprezentuje sobą konceptualne narzędzie do badania złożonych obiektów i zjawisk rzeczywistości (systemów).

Oczywiście, podane przykłady całościowych (a nie analitycznych, częściowych itp.) podejść do badań krasu są w znacznej mierze umowne. Nie jest jednakowa ich „waga metodologiczna”, a ich lista wcale nie wyczerpuje innych potencjalnych podejść. Tym niemniej, pozwalają one, zdaniem autora, na ustalenie „współrzędnych” rozmieszczenia całości-

wych badań krasologicznych w polu metodologii naukowej, co jest ważne przy wyborze strategii badań, a w przypadku danego opracowania – dla sformułowania podejścia autora do badanej kwestii – ujawnienia systemowej natury oraz specyficznej organizacji krajobrazu krasowego.

Krajobraz

W przyrodniczej literaturze naukowej istnieje wiele pojmowań i definicji *krajobrazu* jako takiego. Aby uporządkować to zagadnienie, geografowie wyróżniają różne nurty i podejścia w definiowaniu tego pojęcia, będącego ze swej natury bardzo złożonym i wieloaspektowym. W takiej sytuacji jedynym wyjściem dla badacza krajobrazu jest określenie przez niego – już na samym wstępie – przyjętego rozumienia pojęcia i uściślenie sensu, który mu się przypisuje.

Uogólniając, a nawet upraszczając sprawę należy zaznaczyć, że istnieje pewna różnica w postrzeganiu i definiowaniu krajobrazu pomiędzy badaczami ze Wschodu (Europy Wschodniej i krajów byłego ZSRR) a geografami z Zachodu. Na Wschodzie, w pierwszej połowie XX wieku pojęcie to w znacznej mierze uległo „mutacjom” w stosunku do pierwotnego znaczenia, jako *wyglądu obszaru, fizjonomii regionu, typu terenu* itp. Zmiany polegały na wkładaniu w to pojęcie coraz więcej genetycznego sensu (czynniki kształtowania i genetyczne typy krajobrazu, struktura, hierarchia i klasyfikacja jednostek krajobrazowych). Z pojęcia przede wszystkim fizjonomicznego (forma), krajobraz zrobił się pojęciem bardziej genetycznym (treść). Zmieniła się również jego „geometria”: z falistej dwuwymiarowej „powierzchni” krajobraz został przekształcony w trójwymiarowe objętościowe „ciało”. Z czasem w ciełe tym dostrzeżono pewną organizację i stało się ono tworem holistycznym – geokompleksem, geosystemem itd., badanym odpowiednimi metodami tzw. geografii kompleksowej. Większość badaczy

na Wschodzie w ten właśnie sposób nadal pojmuje krajobraz.

Na Zachodzie pojęcie to również było i jest używane w różnym znaczeniu, nie wykraczając jednak poza obszar pewnego fizjonomicznego inwariantu. Krajobraz nie był też traktowany przez badaczy zachodnich zbyt konkretnie i rygorystycznie. Pytania o genezę były rozpatrywane przede wszystkim w kontekście jego powierzchni i jej cech, czyli morfologii (geomorfologii) i wypełnienia przestrzeni (kształtu, rysunku, pokrycia terenów, ich zagospodarowania i porządkowania, w tym estetycznego itp.). Zauważyć należy, że w ostatniej dekadzie występuje tendencja do zbliżenia i wzajemnego przenikania bardziej rygorystycznego (genetycznego, geokomplexowego itd.) wschodniego oraz bardziej elastycznego (fizjonomicznego, morfologicznego itd.) zachodniego pojmowania krajobrazu.

W niniejszym opracowaniu, autor będzie się trzymał podejścia wschodniego – bardziej „objętościowego”, genetycznego i kompleksowego. Takie rozumienie krajobrazu, jako pewnego całościowego systemu przyrodniczego, daje więcej możliwości zastosowania holistycznego podejścia i ujawnienia (w kategoriach systemologii) złożonej natury krajobrazu krasowego, jego organizacji. Za wejściowy koncept służyć mogą podane niżej sformułowania.

Krajobraz to *przyrodniczy³ terytorialnie zwarty, fizjonomicznie swoisty i funkcjonalnie całościowy system, składający się z przestrzennie powiązanych i oddziałujących na siebie nawzajem elementów – podłoża skalnego, rzeźby, wód powierzchniowych i podziemnych, klimatu, flory i fauny oraz gleb. Będąc utworem strukturalnie i funkcjonalnie całościowym, krajobraz cechuje się posiadaniem właściwości emergentnych, co się ujawnia w jego dynamice (ma zdolności samoregulacyjne) oraz ewolucji (procesy samorozwoju). Krajobraz cechuje swoista fizjonomia przestrzeni (widok, obraz, pejzaż), która na mapie uwidocznia się w postaci określonego rysunku-wzoru. W obrębie*

³Przyrodniczo-antropogeniczny w przypadku krajobrazu kulturowego.

całego krajobrazu występują mniejsze, hierarchicznie zorganizowane i regularnie ułożone charakterystyczne jednostki terytorialne, które tworzą indywidualną kompozycję krajobrazową (mozaikę, pattern).

Krajobraz reprezentuje sobą twór o określonych wymiarach terytorialnych (zwykle od kilkuset do kilku tysięcy km²) o charakterystycznej i złożonej strukturze wewnętrznej. Swoją drogą, stanowi on organiczną część większych tworów terytorialnych (jednostek fizycznogeograficznych wyższej rangi funkcjonalno-przestrzennej). Wymiarzy (granice) terytorialne systemu krajobrazowego odpowiadają areałowi, w którego obrębie krajobraz zachowuje swoje charakterystyczne cechy fizjonomiczne. Typowość cech wynika z jednorodności budowy geologicznej, charakterystycznych form rzeźby i sposobów ich wzajemnego ułożenia, rysunku sieci hydrograficznej, pokrycia roślinnością oraz zachodzących w obrębie krajobrazu charakterystycznych dla niego procesów (przede wszystkim geomorfologicznych). Każdy krajobraz cechuje się indywidualnym „kodem kreskowym” kształtujących go sił i procesów.

Kras w ujęciu synergetycznym

Jak wcześniej wspomniano, istniejące definicje krasu zazwyczaj nawiązują do jednego z trzech jego aspektów: procesualnego (kras jako monolub kompleksowy proces), fenomenologicznego (kras jako zjawisko lub zbiór specyficznych zjawisk) i geomorfologicznego (terytorialnego: kras jako obszar lub rzeźba z charakterystycznym zbiorem oznak). Tak jak i w przypadku pojęcia krajobrazu, obserwuje się pewne różnice w podejściach do definiowania krasu przez krasologów wschodnioeuropejskich oraz zachodnioeuropejskich i amerykańskich. Dla szkoły radzieckiej charakterystyczne było pojmowanie krasu jako procesu czy zjawiska lub jedności procesu i zjawiska (w tym form) – z koncentracją uwagi na aspekcie procesualnym. W literaturze zachodniej dominuje rozumienie krasu jako obszaru ze szczególnymi formami i hydrologią – z akcentem na aspekt terytorialno-fenomenologiczny, etymologicz-

nie bliższy samego źródła pojęcia (Wyżyna Kras).

A. KLIMCHOUK i V. ANDREYCHOUK (2010) proponują jeszcze inne – systemowe podejście do definicji krasu, opierające się na ideach synergetyki i nierównoważonej termodynamiki I. Prigożyna, dotyczących samoorganizacji w systemach i formowania się struktur dyssypatywnych. Kras jest rozpatrywany przez pryzmat samorozwoju struktur przepuszczalności w skałach krasowiejących w trakcie interakcji pomiędzy wodą a skałą (wodonoścem i masywem itp.). Istotą rozwoju i ewolucji krasu jest etapowa samoorganizacja struktury przepuszczalności (sieci kanałów), przejawiająca się w inicjacji, koncentrowaniu i integrowaniu się podziemnego spływu oraz kardynalnej intensyfikacji obiegu wody w masywie krasowym. Kras jest definiowany, jako „wodoobiegowy geosystem w obrębie określonej części hydrolitosfery, którego powstawanie i progresywna ewolucja cechują się samoorganizacją struktury przepuszczalności wraz z formowaniem się integrowanych systemów kanałów, wskutek oddziaływania specyficznego mechanizmu speleogenezy, bazującego na dodatnim sprzężeniu zwrotnym pomiędzy obiegiem wody a rozpuszczaniem”.⁴

Zgodnie z definicją, kras to progresywna ewolucja geosystemu (z przepuszczalnym, podatnym na rozpuszczanie środowiskiem skalnym), wprawiana w ruch obiegiem wody oraz speleogenicznymi mechanizmami samoorganizacji struktury przepuszczalności. *Progresywna* ewolucja jest rozumiana jako proces powstawania i rozwoju nowych dyssypatywnych struktur (wzrost strukturalnej złożoności systemu), a *regresywna* – jako proces ich niszczenia i rozpadania się (redukcja złożoności strukturalnej). W cyklu rozwojowym krasu (mega-

⁴ W postaci niejawnej, zasady tego podejścia do definiowania krasu były wcześniej stosowane przez P. HUNTONA (1995), A. Klimczuka i D. FORDA (KLIMCHOUK, FORD, 2010), A. Klimczuka (KLIMCHOUK, 2010). Na tych zasadach opierała się również fundamentalna monografia: KLIMCHOUK et al. (2000): *Speleogenesis: Evolution of Karst Aquifers*. Huntsville: National Speleological Society.

systemu krasowego)⁵ progresywny ewolucyjny trend z czasem ustępuje miejsca regresywnemu, ale ten proces transformacyjny – powstawania (integrowania się) i degradacji (rozpadania się) struktur – jest rozciągnięty w czasie, pokrywający się i złożony.

Geosystemowe, ewolucyjno-synergetyczne pojmowanie krasu stwarza znakomite podstawy konceptualno-teoretyczne do zrozumienia istoty krajobrazu krasowego, jego lokalizacji na tle ewolucji megasystemu krasowego oraz stworzenia *systemowej (geosystemowej) koncepcji krajobrazu krasowego*.

Krajobraz krasowy jako stadium samoorganizacji megasystemu krasowego

Synergetyczno-rozwojowy model systemu przyrodniczego zakłada, że w swoim rozwoju system przechodzi przez określone *jakościowe stadia rozwojowe*, którym towarzyszy stopniowy wzrost jego wewnętrznej złożoności strukturalnej. Komplikowanie się struktury systemu jest rezultatem pojawienia się nowej okoliczności rozwojowej (czynnika), radykalnie zmieniającej (często przyspieszającej) rozwój systemu i wprowadzającej go w nowy strukturalny (energetyczny) stan, stwarzając jednocześnie warunki (tzw. warunki graniczne) do zachowania (utrwalenia) tego stanu. Moment pojawienia się czynnika „rewolucyjnego” w rozwoju systemu jest określany w synergetyce jako „punkt bifurkacji”. Punkty bifurkacji

wyznaczają granice jakościowych stanów (stadiów) rozwojowych systemu.

Stopniowy – od bifurkacji do bifurkacji – jakościowy wzrost złożoności strukturalnej systemu stanowi istotę jego progresywnej ewolucji. Wzrost ten ma jednak swoje czasowe, przestrzenne, strukturalne itp. ograniczenia, uzależnione od wielkości i rodzaju systemu oraz od czynników ewolucyjnych. W trakcie rozwoju systemu, aż do pewnej kulminacji rozwojowej, pojawiają się (namnażają się) nowe elementy i czynniki, a wraz z nimi powiązania⁶. Wśród nich jednak coraz większą rolę zaczynają odgrywać powiązania, działające na zasadzie ujemnych sprzężeń zwrotnych, ograniczające rozwój systemu i prowadzące do jego stopniowej degradacji, czyli obniżenia złożoności strukturalnej. Stanowi to istotę regresywnej ewolucji systemu, która kończy się jego śmiercią (jako pewnej organizacji).

Jak ten ogólny model rozwojowy przekłada się na kras i krajobraz krasowy? W rozwoju megasystemu krasowego⁷ wyróżnić można kilka etapów – megastadiów, oddzielanych od siebie wydarzeniami o zasadniczym znaczeniu (bifurkacjami) (rys. 2).

Pierwsze stadium to stadium *pre-krasu* (lub *wczesnej speleogenezy*). W tym stadium megasystem krasowy jeszcze nie ma jakości krasowej jako takiej. Jest to stadium embrionalne, w którym pierwotne struktury przepuszczalności (szczeliny i pory) „dojrzewają” hydrodynamicznie. Dojrzewanie to polega na oddziaływaniu zawartej w porach i szczelinach wody na podatny na rozpuszczanie substrat skalny,

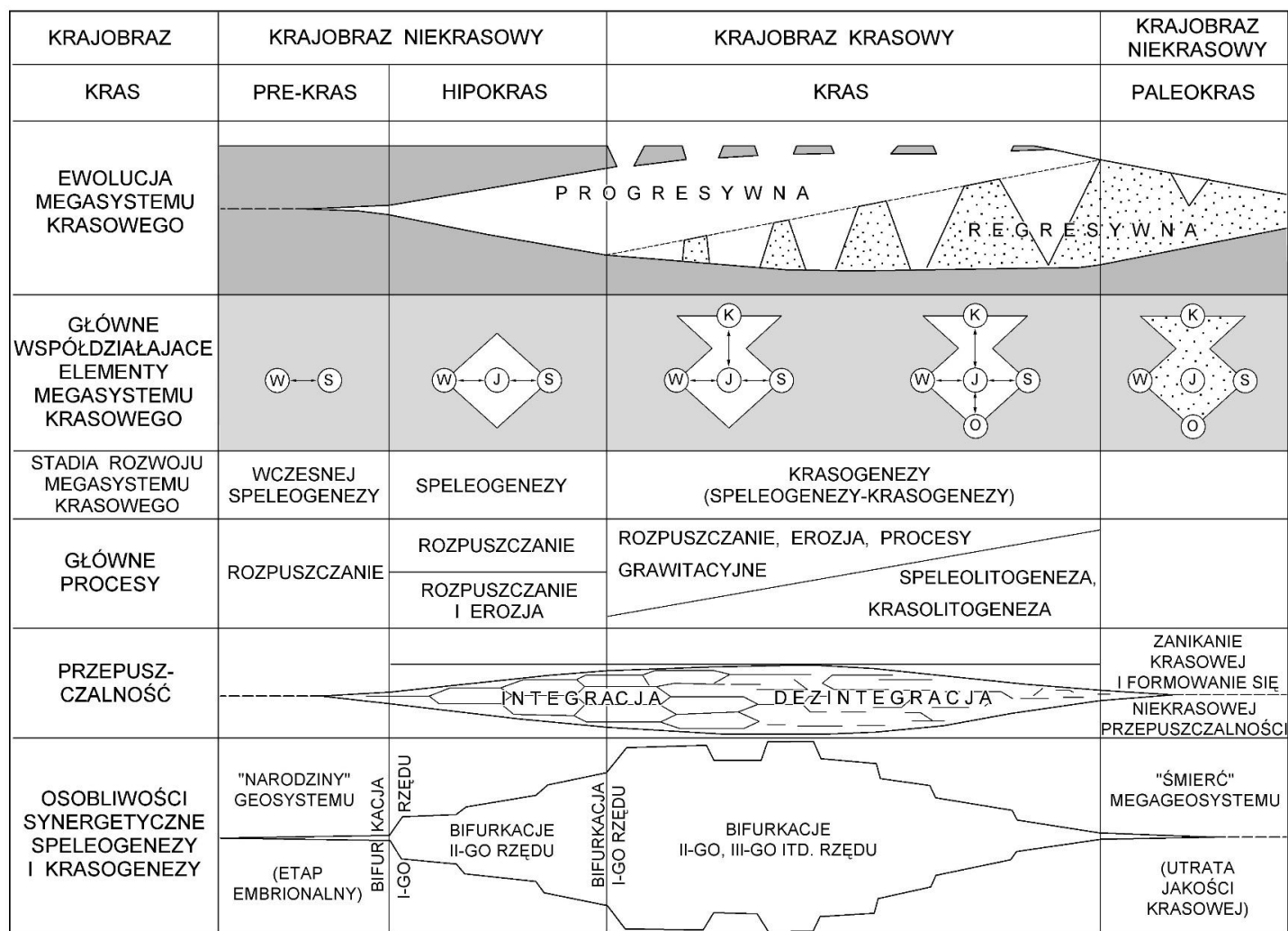
⁵ Pod pojęciem *megasystemu krasowego* rozumie się obszar krasowy, w którego obrębie „rodzi się”, rozwija i ewolucyjnie zanika kras, realizując pewien cykl krasowy. Kras jest pojmowany jako złożony geosystem krasowy całego obszaru, który funkcjonuje i rozwija się zgodnie z zasadami synergetyki, przechodząc przez kolejne stadia rozwoju (formowania się i wzrastania złożoności struktur) oraz degradacji (rozpadania się struktur i redukcji złożoności) systemu. Jest to termin umowny, wprowadzony w celu ułatwienia stylistycznego przekazu i nie pretenduje do statusu terminu naukowego.

⁶ Przy wzroście arytmetycznym liczby elementów w systemie, liczba powiązań pomiędzy elementami systemu rośnie wykładniczo.

⁷ W aspekcie przestrzennym megasystem krasowy w niniejszej pracy nawiązuje do „objętościowego ciała skalnego”, części hydrolitosfery, zbudowanej ze skał podatnych na rozpuszczanie, w której obrębie, przy odpowiednich warunkach, może rozwinąć się kras jako system o specyficznym obiegu wody w obrębie tego ciała. Rzutowany na powierzchnię lub geologicznie wyeksponowany górny fragment ciała stanowi potencjalny lub realny areal powierzchniowy występowania krasu.

wskutek czego zachodzi bardzo powolne, trwające dziesiątki tysięcy (i więcej) lat, ale nieustanne rozszerzanie się szczelin, kształtowanie się protokanałów wraz z ich stopniową integracją hydrodynamiczną w inicjalne sieci. Siłą napędową i głównym mechanizmem rozwoju protokanałów jest dodatnie sprzężenie

zwrotne pomiędzy szybkością rozwoju przestrzeni szczelinowo-porowej a wzrostem przepływu. Na tym etapie głównymi elementami systemu (jeszcze nie krasowego) są: woda (agresywna) i skała (krasowiejąca), a głównym procesem – rozpuszczanie (rys. 2).



Rys. 2. Rozwój megasystemu krasowego w kategoriach synergetyki (wg: KLIMCHOUK, ANDREYCHOUK, 2010):
W – woda, S – skała, J – próżnia podziemna, K – krajobraz – środowisko zewnętrzne, O – osady

Osiągnięcie przez protokanały takiego stopnia rozwarcia, przy którym obszar tzw. szybkiej kinetyki rozpuszczania występuje na całej jego długości, oznacza krytyczny moment w ich ewolucji, który otrzymał nazwę „moment przerwania”. Od tego momentu woda (roztwór) przepływa przez cały protokanał, pozostając nienasyconą, w związku z czym radykalnie zmienia się dynamika

wzrostu (przyśpieszenie) tej oraz innych zmiennych. Szybkość wzrostu i przepływu wody zwiększa się o kilka rzędów, z kolei napór w rosnącym kanale maleje, powodując przebudowę warunków granicznych i aktywizację procesu integracyjnego (łączenia się protokanałów w sieci). Protokanały przekształcają się w kanały, co oznacza „narodziny” nowej jakości systemu – krasowej. Rozwojowy punkt prze-

rwania jest pierwszą (i pierwszorzędną) bifurkacją w rozwoju megasystemu krasowego i momentem narodzin krasu (KLIMCHOUK, ANDREYCHOUK, 2010).

Szybki rozwój kanałów krasowych, dywersyfikacja mechanizmów rozwojowych (np. pojawienie się w częściach systemu oprócz laminarnego, także turbulencyjnego ruchu wód, a co za tym idzie – erozji) prowadzi do integracji kanałów, zwiększenia ich rozmiarów, czyli do formowania się systemów krasowych – kanałów i próżni. W tym stadium w grę wchodzi i staje się ważnym (najważniejszym) czynnikiem rozwoju całego megasystemu krasowego nowy jego element – *podziemna próżnia*, czyli pusta przestrzeń (symbol c na rys. 2). Element ten staje się nie tylko pośrednikiem pomiędzy oddziałującymi na siebie wodą i skałą, ale również skutkiem ich interakcji (zwiększenie objętości) oraz przyczyną dalszego rozwoju systemu (przyspieszenie wskutek dodatkowego sprzężenia zwrotnego pomiędzy objętością – powierzchnią sumaryczną kontaktu wody i skały – a przepływem). Ponieważ w stadium tym mamy do czynienia ze *speleogenezą* (rozwojem kanałów i próżni), zachodzącą pod ziemią – na pewnej głębokości, w „oderwaniu” od powierzchni terenu, etap ten w rozwoju krasu (czy stan krasu) możemy umownie nazywać *hypokrasowym*⁸.

W trakcie rozwoju systemu krasowego (wzrostu złożoności jego struktury) zachodzą różnego rodzaju bifurkacje, wpływające w ten lub inny sposób na jego rozwój (np. zmiana naporowych warunków ruchu wody na swobodny przepływ), ale nie zmieniające zasadniczo jego trendu (bifurkacje drugorzędne). Dopiero w momencie otwarcia się systemu na zewnątrz (połączenia z powierzchnią), w roz-

woju megasystemu zaczyna się nowe – właśnie *krasowe* – stadium (rys. 2). Jest to druga zasadnicza (rangi pierwszorzędnej) bifurkacja rozwojowa, po której życie systemu zaczyna się bardzo komplikować. Otwarcie się na wielorakie i agresywne czynniki środowiska zewnętrznego powoduje zasadnicze zmiany w jego strukturze i funkcjonowaniu. Na rysunku jest to pokazane przez dołączenie do modelu systemu krasowego elementu K, czyli czynnika krajobrazowo-środowiskowego.

Oddziaływanie czynników zewnętrznych z jednej strony progresywnie komplikuje strukturę systemu (np., wskutek przechwycenia spływu powierzchniowego, wzrostu objętości próżni podziemnych), z drugiej zaś inicjuje występowanie procesów i sprzężeń zwrotnych, ograniczających progresywny rozwój (takich, jak zawalenie się stropu jaskiń i powstawanie zapadlisk, wypełnienie kanałów naciekami itp.), czyli znamionuje zjawiska regresywnej ewolucji – degradacji struktur przepuszczalności i struktury całego systemu (rys. 2).

W kontekście przyszłych (w następnych paragrafach) rozważań nad krajobrazem krasowym, wkroczenie megasystemu w to trzecie stadium oznacza narodziny *krajobrazu krasowego*. Bo nie tylko czynniki zewnętrzne zaczynają oddziaływać na rozwój struktur przepuszczalności pod ziemią, ale i same kanały i próżnie podziemne (które wskutek rozwarcia korozyjnego stają się jaskiniami) w nie mniejszym stopniu (a raczej zdecydowanie większym) zaczynają oddziaływać na krajobraz, stopniowo go transformując (bifurkacje 2, 3 itp. rzędów) w nową jakość – *krajobraz krasowy*. Krasowy proces rozwoju struktur przepuszczalności staje się w ten sposób czynnikiem rzeźbotwórczym, a poprzez włączanie w obiegi procesualne elementów naziemnych – wód, roślinności, gleby itp. – procesem *krajobrazotwórczym*.

Po nabyciu „nowego członka zespołu” – zewnętrznego środowiska naziemnego, megasystem krasowy niezwykle się komplikuje. Wiodącym mechanizmem w jego rozwoju stają się różnorakie interakcje pomiędzy powierz-

⁸Określenie *hypokrasu* jako stadium rozwoju megasystemu krasowego jest nieco szersze od jego będącego w obiegu pojmowania jako krasu, rozwijającego się w warunkach odizolowania od czynników powierzchniowych, najczęściej pod wpływem ascencyjnego przepływu wód pod ciśnieniem (KLIMCHOUK, 2007). W obu jednak przypadkach pozostaje wspólny mianownik – brak powiązań z powierzchnią ziemi.

chnią i podziemiem, integrujące go w bardzo złożony system przyrodniczy o piętrowej strukturze i reprezentujący nowy stan rozwojowy megasystemu krasowego. Stan ten lub stadium może być synonimicznie do krasowego określane jako *stadium krajobrazu krasowego*, pojmowanego całościowo jako system składający się z dwu części – podziemnej i naziemnej (rys. 2).

W tym stadium w rozwoju megasystemu krasowego biorą udział liczne procesy, zachodzące zarówno na powierzchni, jak i pod ziemią, uzależnione od dziesiątek i setek czynników zewnętrznych i wewnętrznych. Pomiedzy elementami systemu wraz z ich niezliczonymi powiązaniem kształtują się różne relacje, działające zarazem (czasami jednocześnie) na korzyść jego progresywnego i regresywnego rozwoju. Z obfitości powiązań (oddziaływań) wynika obfitość występowania różnego rodzaju bifurkacji niskich rzędów, determinujących rozwój poszczególnych ogniw całego systemu.

Jako przykłady drugo- lub trzeciorzędnych bifurkacji w rozwoju systemu służyć mogą: przechwycenie powierzchniowego cieku wodnego przez ponor, powstanie zapadliska i formowanie się zlewni z odprowadzaniem opadowych wód pod ziemię, kolmatacja kanału wadycznego naciekami, zejście potoku podziemnego na niższy poziom i in.

Wiele z bifurkacji, szczególnie tych związanych z przechwyceniem spływu powierzchniowego, prowadzi do wzrostu wewnętrznego zróżnicowania strukturalnego systemu, natomiast inne, szczególnie te związane z procesami grawitacyjnymi i wypełnieniem kanałów i próżni przez osady, do jego destrukcji (destrukuryzacji)⁹. Z czasem destruktywnych

bifurkacji przybywa, powodują one zanik powiązań funkcjonalnych pomiędzy poszczególnymi elementami przestrzennymi systemu i prowadzą do jego degradacji. Co ciekawe, degradacja struktur przepuszczalności, uformowanych ewolucyjnie w krasowiejącym substracie geologicznym (serii skalnej, masywie krasowym itp.) oznacza aktywny rozwój (progresywną ewolucję) w podsystemie geomorfologicznym. Rozwój powierzchniowej rzeźby krasowej jest w znaczącym stopniu odzwierciedleniem degradacji podziemnych struktur, stąd się bierze przesunięcie w czasie destrukcji podziemnej i naziemnej części krajobrazu krasowego na krasowym etapie rozwoju megasystemu krasowego. Na przykład, niepowtarzalne, fascynujące krajobrazy ostańcowego krasu tropikalnego, uważane za kwintesencję rzeźby krasowej, to właśnie piękny zewnętrzny twór zdegradowanego podziemia. Dalszego niszczenia megasystemu krasowego, czyli jego ostatniego bastionu – powierzchniowej rzeźby krasowej, dokonują już zewnętrzne czynniki środowiskowe. Po zniszczeniu (planacji) ostatnich elementów rzeźby krasowej (o ile kras się nie „przeniósł się” na niższe poziomy – w głąb) następuje „śmierć” megasystemu krasowego, czyli utrata przez obszar czy krajobraz jakości krasowej.

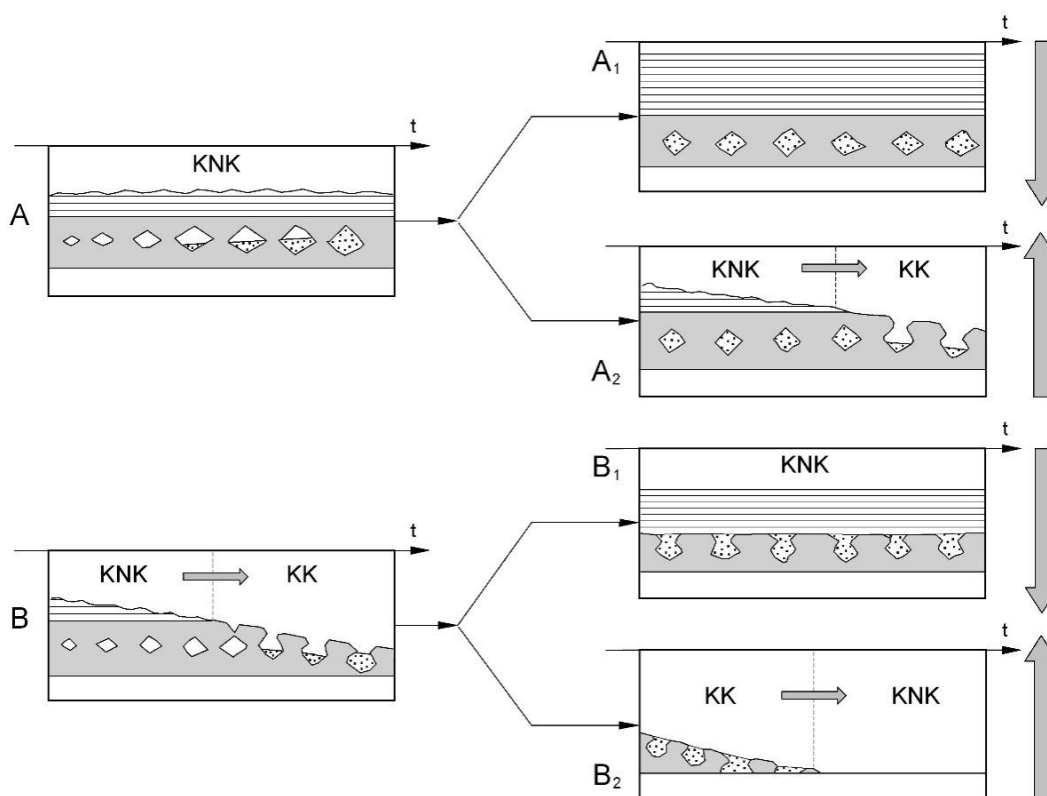
Należy zauważyć, że przejście krasu lub krajobrazu krasowego w nową niekrasową (lub paleokrasową – patrz niżej) jakość, czyli jego ostateczna degradacja, ma charakter przejściowy, ewolucyjny. Pomiedzy tymi stanami krasu (stadiami) nie ma wyraźnej granicy i nie stoi za tym żadna zasadnicza (czyli pierwszorzędna) bifurkacja, jak to ma miejsce w innych stadiach. Bifurkacje jako takie są nieodzownym elementem progresywnej ewolucji, przy czym ich rola (pierwszo-, drugo- czy trzeciorzędna) jest wyższa na początkowych etapach rozwoju systemu, kiedy nie ma w nim jeszcze zbyt dużej liczby oddziałujących na siebie nawzajem elementów i powiązań. Z czasem, w miarę wzrostu złożoności systemu, liczba bifurkacji w nim zwiększa się, a ich rola w rozwoju systemu proporcjonalnie maleje.

⁹Rozwój procesów akumulacyjnych oznacza pojawienie się w strukturze systemu kolejnego elementu – osadów (grawitacyjnych, wodno-mechanicznych, chemogenicznych, biogenicznych itp.) (S na rys. 2). Oznacza to również, że w grę stopniowo włącza się jeszcze jeden czynnik rozwojowy, którego rola w rozwoju systemu (tym razem jego degradacji) będzie nieustannie wzrastać.

Na pewnym etapie (w naszym przypadku – dojrzałego krajobrazu krasowego) na tle lawinowego wzrostu bifurkacji obserwuje się ich rozproszenie przestrzenne (lokalizacja) po ogniwach megasystemu krasowego i odpowiednio – obniżenie ich statusu czynnikowego w stosunku do całego systemu.

Stadium krasowe (właściwe krasowe czy krajobrazu krasowego – rys. 2) nie jest etapem obowiązkowym w rozwoju megasystemu krasowego. Z powodu zmiany znaku ruchów tek-

tonicznych – z dodatnich (elewacje) na ujemne, może nie dojść do drugiej zasadniczej bifurkacji, czyli otwarcia się próżni i kanałów na zewnątrz. Wtedy system krasowy – wypełniając się częściowo czy całkowicie osadami – ewoluuje w stronę stanu (stadium) paleokrasowego (rys. 3, scenariusz A1). Przy kolejnej zmianie kierunku ruchów tektonicznych (na dodatnie) może dojść jednak do krasowienia odziedziczonego i osiągnięcia przez megasystem stanu krajobrazu krasowego (rys. 3, scenariusz A2).



Rys. 3. Niektóre potencjalne scenariusze ewolucji megasystemu krasowego w zależności od znaku ruchów tektonicznych (KK – krajobraz krasowy, KNK – krajobraz niekarstowy)

Od znaku ruchów tektonicznych zależy dalsza ewolucja również megasystemu „spełnionego”, czyli systemu, w którego ewolucji miał miejsce etap krasowy (krajobrazu krasowego) (rys. 3-B). Przy ich zmianie na ujemne (obniżające) nastąpić może pogrzebanie resztek krasu pod warstwami osadów kontynentalnych lub morskich (scenariusz B1), z kolei trwanie ruchów wypiętrzających może doprowadzić do całkowitego zniszczenia reliktyw obumarłego systemu krasowego i jego zniknięcia z przekroju geologicznego (scenariusz B2).

Rzeczywistość ewolucyjna jest jednak o wiele bardziej złożona, a przedstawione scenariusze reprezentują wyłącznie kilka wybranych uproszczonych przykładów.

W dalszych rozważaniach, zgłębiających istotę krajobrazu krasowego, skupimy się wyłącznie na scenariuszu B i spróbujemy zbadać „anatomicznie” megasystem krasowy, znajdujący się w swoim kulminacyjnym stanie ewolucyjnym – krajobrazu krasowego.

KRAJOBRAZ KRASOWY JAKO SYSTEM

Jak pokazano powyżej, na etapie właściwym krasowym lub krajobrazu krasowego, rozumianego szeroko – wraz z podziemiem go kształtującym, megasystem krasowy staje się – ze względu na ogromną rolę czynników zewnętrznych – *systemem binarnym*, składającym się z części podziemnej (środowiska geologicznego) i naziemnej (środowiska geograficznego), integrujących się w krajobraz krasowy (środowisko krasowe). Akcent dynamiczno-rozwojowy całego megasystemu lokuje się w płaszczyźnie interakcji pomiędzy częściami binarnego systemu krasowego. Skupmy się więc na wewnętrznych aspektach tego systemu – strukturalnych, funkcjonalnych i rozwojowych. O krajobrazie krasowym będziemy mówić jako o genetycznej jedności dwu jego części (geosystemie), naświetlając jego osobliwości na tle krajobrazów niekrasowych.

W paragrafie tym również przeniesiony zostanie akcent systemowy z jednego obiektu systemowego (ewolucyjnego megasystemu krasowego) na inny (krajobraz krasowy jako system). Natura podejścia systemowego, i to jest jego ważną zaletą, pozwala na takie przeakcentowanie. Każdy bowiem obiekt może być przedstawiony i badany jako system i to pozwala na lepsze zrozumienie i pokazanie jego istoty. Konieczne staje się w tym przypadku rozpatrywanie obiektu w kategoriach systemowych (całościowości, struktury, powiązań itp.).

Struktura krajobrazu krasowego jako systemu

Krajobraz krasowy (KK) cechuje się obecnością nietypowego dla zdecydowanej większości innych krajobrazów fenomenu – dużych podziemnych kanałów i próżni, w tym jaskiń¹⁰.

¹⁰ Jaskinie to podziemne próżnie o wymiarach dostępnych dla człowieka, w sposób naturalny (ewolucyjnie)

W trakcie ewolucji systemu krasowego elementy te przekształcają się we względnie autonomiczne – z fizjonomicznego, przestrzennego oraz funkcjonalnego punktu widzenia utwory przyrodnicze – *geokompleksy podziemne (ekosystemy itp.)*¹¹.

Część podziemna KK jest ściśle związana z naziemną. Są one dwoma *sprzężonymi funkcjonalnie i genetycznie częściami jednego krajobrazu krasowego* i stanowią najważniejszą osobliwość jego strukturalnej organizacji. Nawiązując do systemowej metodologii czy terminologii, części naziemną i podziemną KK uważać należy za jego główne *strukturalne podsystemy*. Sprzężone funkcjonowanie w geosystemie krajobrazu krasowego dwóch podsystemów (naziemnego ↔ podziemnego) determinuje najważniejsze właściwości całego krajobrazu.

Krajobrazy krasowe wyróżniają się swoją przestrzenią rozwojową. W związku z obecnością jaskiń, niekiedy bardzo głębokich (1–2 km i więcej), którymi to czynniki powierzchniowe (wody, tlen, osady, organika, mikroorganizmy itp.) przenikają w głąb ziemi, dolna granica KK obniża się znacząco niżej, aniżeli w krajobrazach niekrasowych, gdzie ona wynosi zaledwie kilkadziesiąt metrów od powierzchni ziemi i na ogół jest zbieżna z dolną granicą strefy wietrzenia. W odróżnieniu od bardziej „płaskich” krajobrazów niekrasowych, KK cechują się „objętościowością”.

W strukturze krajobrazu krasowego wyróżnić można dwie składowe: strukturę pionową

lub sztuczny (przez człowieka) połączony z powierzchnią Ziemi.

¹¹ Niektórzy krasolodzy-geografowie nazywają jaskinie *podziemnymi krajobrazami* wyróżniającymi się szczególną topografią (morfologią), własną siecią hydrograficzną, specyficznym podziemnym klimatem (mikro- lub mezoklimatem) oraz swoistym światem organizmów jaskiniowych (GVOZDETSKIY, 1954; CZIKISHEV, 1979; GERGEDAVA, 1983). Ciekawe opracowania w zakresie kompleksowej natury świata jaskiniowego znaleźć można w literaturze słowackiej, opisującej jaskinie, jako podziemne geosystemy (JAKAL, 1986; BELLA, 2008).

(geokomponentową – piętrową) oraz poziomą (geokompleksową – morfologiczną).

Wertykalna struktura geokomponentowa

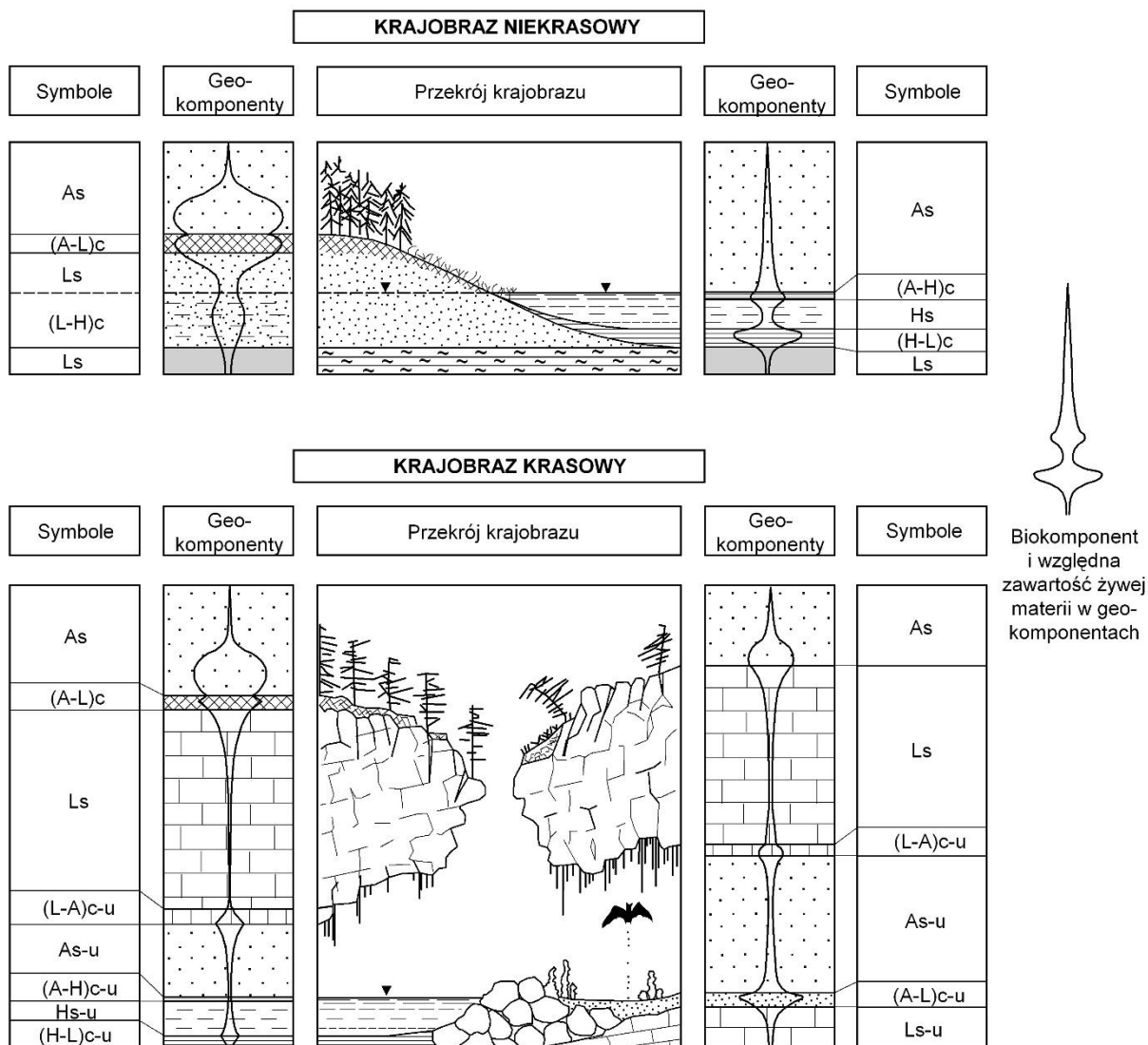
Elementy pionowej struktury – geokomponenty

Geokomponentową strukturę krajobrazu niekrasowego tworzą pionowo (warstwowo) układające się – zgodnie ze swoimi fizycznymi właściwościami (stanami skupienia i gęstością materii) – geokomponenty: *masywne* i *mieszane*. Geokomponenty masywne to *agregatowo-jednorodne* utwory materialne (geomasy), takie jak: skały (komponent twardy czyli *litokomponent*), wody (ciekły czyli *hydrokomponent*) i powietrze (gazowy czyli *atmokomponent*). Geokomponenty mieszane z kolei, to utwory *agregatowo-niejednorodne*, występujące w miejscach kontaktu i wzajemnego przenikania się komponentów masowo-jednorodnych. Są to tzw. komponenty *kontaktowe* (ANDREYCHOUK, VOROPAI, 1993; ANDREYCHOUK, 2010), takie jak: gleba (*pedokomponent* – na kontakcie atmo- i litokomponentu), osady denne akwenów (*bottokomponent* – na kontakcie hydro- i litokomponentu), horyzonty wodonośne (*aqui-komponent* – nasycone wodą warstwy przekroju geologicznego), przypowierzchniowe warstwy wody w zbiornikach i akwenach (tzw. „warstwy aktywne” – na kontakcie atmo- i hydrokomponentu, wzbogacone w tlen, naświetlone przez promieniowanie słoneczne, z falowym mieszaniem wód itp.) i inne (rys. 4). Życie, jako odrębny rodzaj geomas, czyli *biokomponent*, występuje (koncentruje się) w różnym stopniu i w różnej postaci (zwierzęta, rośliny, mikroorganizmy, martwa masa organiczna) w każdym z geokomponentów, zarówno w masywnych (*abiotycznych* – skałach, wodzie i powietrzu), jak i mieszanych (rys. 4), przy czym geokomponenty kontaktowe są zazwyczaj o wiele bardziej wzbogacone w biomasę (zarówno żywą, jak i martwą) aniżeli masywne. To wpływa na właściwości tych

komponentów, stają się one utworami *abiotycznymi*. W przypadku aktywnych interakcji pomiędzy ich częściami nieorganiczną i organiczną dochodzi nawet do tworzenia się nowej (integralnej) jakości geomas o bardzo specyficznym charakterze i właściwościach (np. gleba).

Pionowa struktura geokomponentowa krajobrazów krasowych jest bardziej złożona niż krajobrazów niekrasowych (rys. 4). Obecność próżni podziemnych czyni pionową strukturę KK piętrową, powtarzającą się. Ponieważ próżnie podziemne czy jaskinie są z natury swojej geokompleksami, w KK mamy do czynienia nie ze zwykłym wzrostem liczby elementów (geokomponentów) w systemie, lecz ze zwiększeniem liczby geokompleksów, czyli ze zmianą jakościową, dotyczącą jego organizacji. Wymusza to wprowadzenie do schematu pionowej organizacji systemu KK jeszcze jednego – *podsystemowego poziomu* hierarchicznego (poziom organizacyjny pomiędzy elementem a systemem). Obecność dwóch podsystemów – powierzchniowego (naziemnego, górnego) i podziemnego (dolnego), zasadniczo odróżnia pionową strukturę KK od wertykalnej struktury krajobrazów niekrasowych.

W piętrze dolnym KK (w podsystemie podziemnym) również występują masywne (atmo-, hydro, lito- i bio-) oraz mieszane (lito-atmo, hydro-atmo, lito-hydro itp.) geokomponenty, ale w wersji podziemnej. Właściwości podziemnych geokomponentów są nieco inne, niż tych z piętra górnego. Zatem, komponent *gazowy* (powietrze jaskiniowe, podziemna atmosfera, *Amu* – rys. 4) zwykle zawiera więcej (od kilku do kilkuset razy) CO₂, metanu, siarkowodoru, radonu i innych gazów, niż atmosfera powierzchniowa. W przypadku utrudnionej wymiany powietrza z zewnętrzną atmosferą, jaskinie, szczególnie duże, labiryntowe, stają się dla potoków gazowych z wnętrza ziemi swoistymi pułapkami. Wilgotność względna powietrza jaskiniowego często jest równa lub bliska 100%. Morfologia niektórych jaskiń sprawia, że nie ma w nich prawie ruchu powietrza, co rzadko się zdarza na powierzchni.



Rys. 4. Wertykalna geokomponentowa struktura krajobrazu krasowego i niekrasowego:
 Geokomponenty agregatowo-jednorodne (masywne): As – atmokomponent – atmosferyczny (gazowy); Ls – litokomponent – skalny (twardy); Hs – hydrokomponent – wodny (płynny); As-u – atmokomponent – podziemny, Hs-u – hydrokomponent – podziemny, Ls-u – litokomponent – podziemny; Geokomponenty agregatowo-zróżnicowane (mieszane, kontaktowe): (A-L)c – gleba; (L-H)c – wodonosiec; (A-H)c – przypowierzchniowa (aktywna) warstwa akwenów; (L-A)c-u – zwietrzała warstwa skalna stropu i ścian jaskini; (A-L)c-u – przypowierzchniowa warstwa osadów jaskiniowych; (A-H)c-u – przypowierzchniowa (aktywna) warstwa jaskiniowych akwenów; (H-L)c-u – osady denne jaskiniowych akwenów

Hydrokomponent podziemny (Hmu) z kolei jest wzbogacony w rozpuszczone substancje mineralne ze względu na dłuższy, aniżeli w przypadku wód powierzchniowych, czas interakcji wód ze skałą krasowiejącą. W krajobrazach niekrasowych mineralizacja wód o wielkości 2–3 g/dm³ lub więcej występuje zazwyczaj na głębokościach 1–3 km, oczywiście zdecydowanie poniżej dolnej granicy syste-

mu krajobrazowego. Natomiast, np. w krajobrazie krasu siarczanowego taka mineralizacja cechuje już nawet wody powierzchniowe. W krajobrazach krasu solnego z kolei, mineralizacja wód osiąga kilkadziesiąt, a nawet kilkaset g/dm³. Wody krasowe dolnego piętra KK często wyróżniają się bardziej urozmaiconym składem chemicznym oraz bardziej zróżnicowanym środowiskiem geochemicznym, w tym

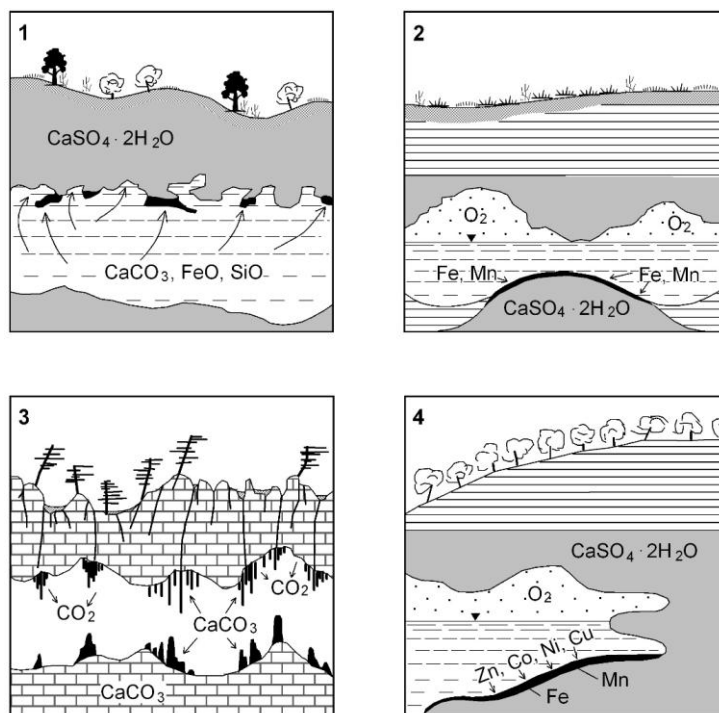
występowaniem warunków redukcyjnych, co na powierzchni zdarza się dość rzadko.

Inny charakter i właściwości ma pod ziemią również *litokomponent* (podłoże skalne krajobrazu czyli skała krasowiejąca – *Lmu*). Procesy cementacji, rekrytalizacji, dolomityzacji-dedolomityzacji, metasomatoza, hydratacja i inne w znacznej mierze zmieniają strukturę, teksturę i litologię skał, a powstające w nich próżnie krasowe deformują konfiguracyjnie i różnicują natężenie pól geofizycznych w masywach krasowych. Procesy speleolitoogenezy powodują geochemiczną redystrybucję pierwiastków i związków chemicznych. Serie skał krasowiejących, zawierające próżnie podziemne, często przepełniają inkluzje krasolitowe oraz potężne masy brekcji krasowych, materiału rezydualnego i skał niekrasowych pochodzenia grawitacyjnego (zapadliskowego).

Zawartość biomasy (biokomponent – *Bmu*) w podsystemie podziemnym KK jest względnie niewielka, szczególnie w porównaniu z podsystemem naziemnym w krajobrazach niekrasowych. W literaturze prawie nie spotykamy ilościowych oszacowań biomasy, cechującej próżnie krasowe czy jaskinie. Jednakże w jas-

kinia tropikalnych może ona być znacząca, zwłaszcza w przypadku włączenia w kalkulacje odchodów organizmów (np. guano). W każdym razie, materii organicznej w piętrze podziemnym KK jest nieporównywalnie więcej, niż w zwykłym podłożu skalnym (szczelinach i porach) krajobrazów niekrasowych.

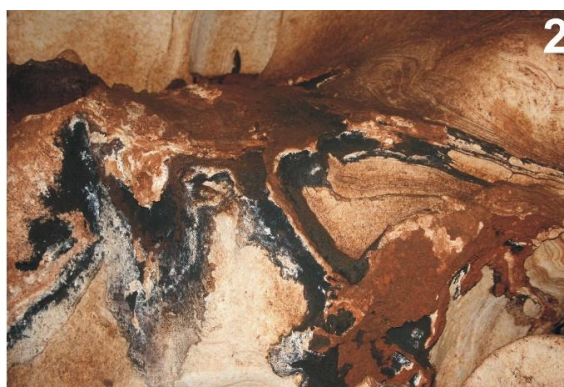
Geokomponenty *mieszane* (kontaktowe, abio-biotyczne) podziemnego podsystemu KK są jeszcze bardziej specyficzne aniżeli masywne. Na przykład, zwietrzała warstwa skalna ścian jaskini czy przypowierzchniowa warstwa osadów jaskiniowych znacząco różnią się składem i właściwościami od analogicznych utworów powierzchniowych (np. gleb). Ale, tak jak i w podsystemie powierzchniowym KK, lokalizują się one na kontakcie komponentów mono-masowych, charakteryzują się wzajemnym przenikaniem i wzajemnym oddziaływaniem budujących je substancji, formowaniem się charakterystycznych barier geochemicznych (**rys. 5**) i są środowiskami gromadzenia się materii organicznej (żywej i martwej). Nisze korozyjne w stropie jaskiń (*L-A*)_{cu} służą jako siedliska nietoperzy, często są zamieszkiwane przez owady (przede wszystkim pajęczaki).



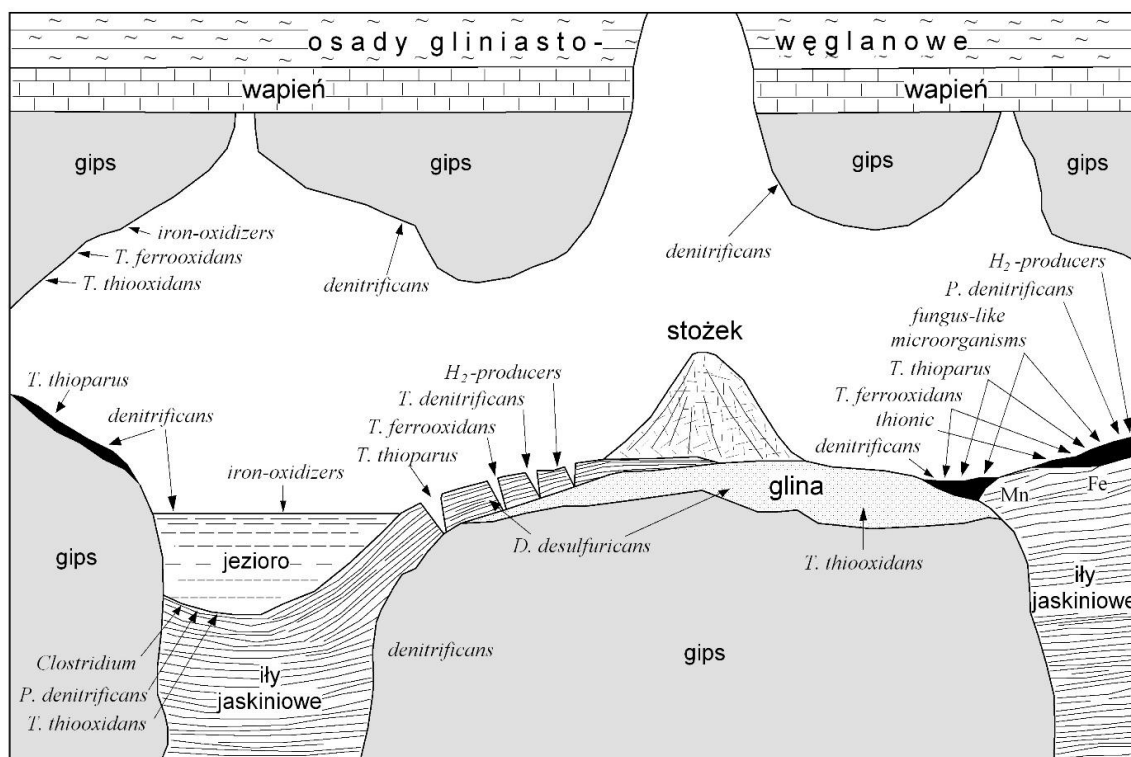
Rys. 5. Wybrane przykłady barier geochemicznych w podziemnej części krajobrazu krasowego:
1 – rozpuszczalna, 2 – tlenowa, 3 – termogazodynamiczna, 4 – sorpcyjna

Sama powierzchnia skalna stropu i ścian często jest zwietrzała, bardziej porowata, skorodowana lub pokryta skorupą mineralną, wzbogaconą w związki chemiczne, co jest spowodowane utlenieniem minerałów i pierwiastków, zawartych w skale, agresywnym oddziaływaniem substancji organicznych i gazów itp. (fot. 1). W tej strefie wody infiltracyjne często chemicznie deponują osady, tutaj też odbywa się krystalizacja lub rekrystalizacja minerałów, powstaje kondensat wodny. Z po-

wodu wzajemnego przenikania środowisk i substancji (tlen, woda, organika itp.) na powierzchni oraz w środku warstwy kontaktowej koncentrują się różnego rodzaju mikroorganizmy, których działalność również przyczynia się do zmian jakościowych zachodzących w tej warstwie (rys. 6). W obecności światła, np. sztucznego, na pożywnym substracie skalnym intensywnie rozwijają się algi, grzyby, a nawet roślinność (tzw. *lampenflora* – fot. 2).



Fot. 1. Organiczno-mineralne (1) i węglanowo-żelazisto-manganowe (2) naskorupienia mineralne na stropie (1) i ścianach (2) jaskini (Jaskinia Dawadung, Tajlandia, fot. W. Andrejczuk)



Rys. 6. Rozpowszechnienie bazowych gatunków i grup mikroorganizmów w Jaskini Zoluszka (Bukowina, Ukraina) (wg: ANDREYCHOUK, KLIMCHOUK, 2001). Życie mikroorganizmów koncentruje się na powierzchni osadów i ścian jaskiniowych, czyli nawiązuje do geokomponentów kontaktowych.

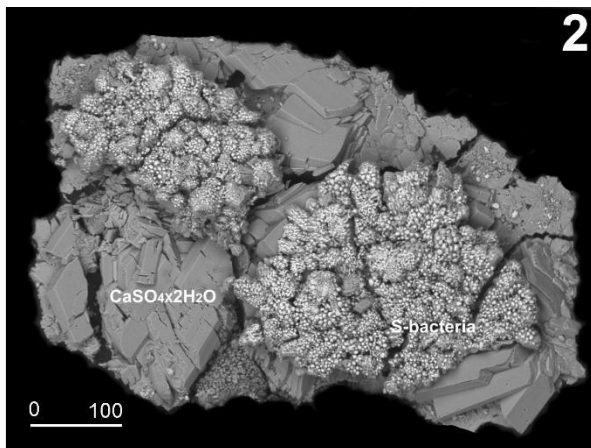
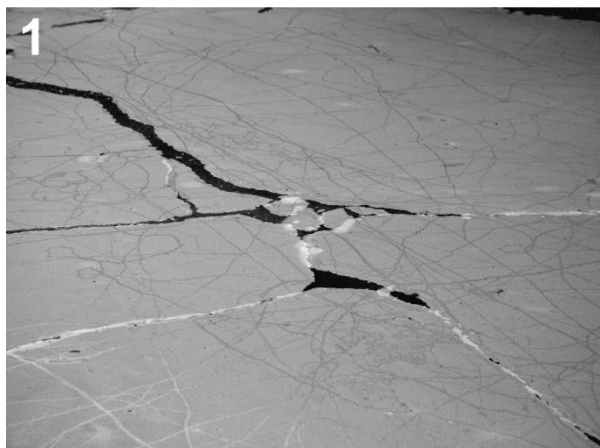


Fot. 2. Paprotka rosnąca w jaskini dzięki sztucznemu oświetleniu podłoża i ścian. Laos, jaskinia w okolicach Wan Wieng (fot. W. Andrejczuk)

Powierzchniowa warstwa osadów jaskiniowych (A-L)cu jest również bogatsza w życie od podścielającej ją warstwy. W niej gromadzą się rozkładające się resztki organizmów jaskiniowych oraz organizmów wniesionych do jaskini z powierzchni przez wody, powietrze lub grawitacyjnie, jak również odchody życiowe (ekskrementy) organizmów żyjących w jaskini. Gromadzący się materiał organiczny tworzy znakomity biosubstrat do rozwoju mikroorganizmów i owadów, tworzących podstawę jaskiniowej piramidy ekologicznej powiązań troficznych. Kwasy organiczne z odchodów przeobrażają chemicznie występy skalne dna jaskiń, czemu często towarzyszy powstawanie specyficznych, częściowo biogenicznych minerałów (głównie z grupy fosforanów). Tutaj również koncentruje się działalność mikroorganizmów utylizujących organikę, a czasami też produkujących specyficzne związki chemiczne (odchody metaboliczne bakterii chemosyntezujących). Na powierzchni osadów jaskiniowych napotkać można nawet drobne rośliny, wyrastające (tylko do stadium embrionalnego) z nasion, które dostały się do jaskini z wodą, wiatrem czy na butach speleologów. Na resztkach organiki oraz śmieciach, zostawio-

nych w jaskini przez człowieka, dobrze rozwija się mikroflora i pleśń, pokrywająca niekiedy dziesiątki m² powierzchni, czemu sprzyja duża wilgotność i stabilność mikroklimatu jaskiniowego.

Za geokomponent kontaktowy podziemnego podsystemu KK (A-H)cu może być uważana również przypowierzchniowa warstwa wody większych jezior jaskiniowych. Ogólnie znana jest wyraźna stratyfikacja właściwości fizyczno-chemicznych wód akwenów podziemnych, przy czym warstwa górna wody prawie zawsze wyróżnia się podwyższoną zawartością substancji rozpuszczonych. Wskutek parowania wody, osiadania z powietrza cząstek aerozoli i zaburzenia równowagi hydrochemicznej, na powierzchni wody dochodzi do wytrącania się filmu mineralnego. Formują się tutaj specyficzne bariery geochemiczne (na drodze migracji pierwiastków chemicznych), takie jak: mechaniczna, ewaporacyjna i tlenowa, na których dochodzi do wytrącania się związków chemicznych, powstawania przejściowych lub tymczasowych faz mineralnych (rys. 5). W warstwie powierzchniowej (filmie) koncentruje się również życie bakterii (fot. 3).



Fot. 3. Film mineralno-organiczny (gips + bakterie siarkowe) na powierzchni wody. Ascensyjne źródło wód termalnych w Macedonii, okolice Debar (fot. W. Andrejczuk):

1 – cienka skorupka gipsowa pływająca na powierzchni wody, 2 – fragment skorupki z widocznymi na niej pod mikroskopem elektronowym kryształami gipsu i bakteriami siarkowymi (skala w mikronach)

Z osadem dennym podziemnych akwenów¹² – (H-A)cu związane jest życie wielu organizmów zamieszkujących wody podziemne – wiłłonogów, obunogów i innych. Tu też ma miejsce gromadzenie się organiki (co prawda, w nieznaczej mierze), powstają bariery geochemiczne z osadzania się związków mineralnych (rys. 5) oraz obserwuje się podwyższoną aktywność życiową mikroorganizmów (por. rys. 6).

Generalnie jednak, świat organiczny podsystemu podziemnego KK jest znacznie uboższy od powierzchniowego. Pewien wyjątek mogą stanowić krajobrazy krasowe pustyni, gdzie w bardziej wilgotnych (od warunków na powierzchni) jaskiniach koncentruje się dość różnorodna fauna owadów, gadów, gryzoni itp.

W strukturze geokomponentowej KK, na obecnym etapie rozwoju epigeosfery¹³, coraz częściej zaznacza swoją obecność człowiek wraz z produktami swej działalności gospodarczej (techniką oraz elementami infrastruktury). Stanowi on jakościowo nowy element systemu, który formuje własne relacje i powiązania z innymi elementami systemu KK i przez to zaczyna coraz aktywniej oddziaływać na krajobraz (najczęściej destrukcyjnie). Podobnie jak biokomponent, ten nowy element nie ma ścisłej lokalizacji w strukturze pionowej systemu, lecz może występować w różnym „natężeniu” w jego wszystkich warstwach.

A zatem, pionowa struktura KK, w odróżnieniu od „zwykłej” geokomponentowej struktury krajobrazów niekrasowych, ma charakter piętrowy, przy czym piętrowość dotyczy nie tylko wydłużenia w głąb (wzrostu ilościowego) wertykalnego „spektrum” geokomponen-

¹² Do tej grupy podziemnych geokomponentów Mieszanych zaliczamy również wodonośce krasowe. Wody podziemne wypełniające szczeliny i próżnie krasowe zazwyczaj są wzbogacone w rozpuszczone związki mineralne i organiczne, również koloidalne. Przy zmianie warunków geochemicznych, np. redukcyjnych na tlenowe, dochodzi do ich wytrącania na ścianach próżni i szczelin. Przykładowo, po wytrąceniu się z wody związków żelaza i manganu, ściany pokrywają się czarną lub żółtą patyną, co dobrze widać w kamieniołomach, w których sztucznie obniżono poziom wód.

¹³ Termin *epigeosfera* lub powłoka geograficzna jest używany przez geografów fizycznych oraz ekologów krajobrazu w krajach Europy Wschodniej. Terminem tym określa się kilkunastokilometrową przypowierzchniową strefę przestrzenną, w której zachodzi aktywny obieg materii i energii pomiędzy litosferą, hydrosferą i atmosferą (*abiosfera*) i w której występuje życie. Po zintegrowaniu z życiem, które też jest włączone w obieg, *abiosfera* tworzy *biosferę*, a *biosfera* z człowiekiem – *antroposferę* (*noosferę*, *technosferę* itp.).

tów, ale jakościowo różnicuje cały system, nadając mu również geokompleksowy, a raczej multikompleksowy (binarny) charakter. Geokomponentowy, a jednocześnie geokompleksowy charakter, to osobliwość struktury właściwych krajobrazów krasowych. W kategoriach systemologii oznacza to, że w danym przypadku mamy do czynienia z wyższym poziomem organizacji całego systemu, w którym elementy są zorganizowane w podsystemy, a podsystemy tworzą system (krajobrazowy). Okoliczność ta ma kluczowe znaczenie w formowaniu się holistycznych właściwości KK oraz dla zrozumienia specyfiki jego funkcjonowania, dynamiki, samoregulacji, stabilności, samorozwoju i ewolucji jako specyficznego systemu przyrodniczego.

Powiązania materialno-energetyczne geokomponentów

Obecność próżni jaskiniowych sprawia, że krajobraz krasowy jest o wiele głębszy – w bezpośrednim znaczeniu tego słowa – od zwykłego krajobrazu. Biorąc pod uwagę fakt, że systemy jaskiniowe „schodzą” na głębokość kilkuset metrów, a nawet 1–2 km od powierzchni ziemi, miąższość krajobrazu krasowego kilkakrotnie przekracza miąższość krajobrazu niekrasowego, nadając KK większą trójwymiarowość, „rozciągając” go w pionie i różnicując zachodzące w nim procesy geodynamiczne. Fakt zwiększenia przestrzeni krajobrazowej kosztem wektora pionowego wielokrotnie potęguje w KK działanie sił (czynnika) grawitacji.

Swoistość przekroju pionowego KK: znaczne wydłużenie w głąb, powtarzające się spektrum geokomponentów, obecność podsystemu podziemnego determinują specyfikę wzajemnego materialnego i energetycznego oddziaływania jego komponentów. Oddziaływania te (powiązania elementów systemu) realizują się w postaci potoków materialno-energetycznych (oraz informacyjnych) pomiędzy nimi.

Wymienione cechy przekroju pionowego KK determinują osobliwości *wertykalnych międzykomponentowych powiązań* (potoków materii i energii) w nim występujących. Po pierwsze, ich znaczenie w ogólnej strukturze powiązań elementów KK jest zdecydowanie wyższe aniżeli w krajobrazach niekrasowych. Po drugie, zdecydowanie częściej niż w niekrasowych krajobrazach występuje wschodzący (do góry) kierunek ich działań. Dobrze znane są, na przykład, sezonowe zmiany wymiany powietrza pomiędzy podziemną a naziemną częścią KK, wysokoamplitudowe wahania poziomu wód w akwenach jaskiniowych i wodonościach krasowych (dziesiątki, a w górach nawet setki metrów). Po trzecie, w pionowych potokach KK, w nieporównywalnie większym stopniu, aniżeli w krajobrazach niekrasowych, występuje transport materiału twardego (z potokami wody, a szczególnie wskutek procesów zapadania się stropu próżni podziemnych). Jeszcze jedną osobliwością powiązań pionowych komponentów w KK jest ruch mas wodnych w postaci swobodnie płynących potoków (jak na powierzchni), przybierających w jaskiniach i studniach formę kaskad i wodospadów. Na ogół, rozszerzone spektrum geokomponentów w KK powoduje też zdecydowanie większą, aniżeli w krajobrazach niekrasowych ogólną ilość ich powiązań.

Aspekty paradynamiczne i paragenetyczne pionowej struktury krajobrazów krasowych

Wertykalne potoki materialno-energetyczne KK łączą w całość krajobrazową zarówno warstwowo ułożone geokomponenty, jak i podsystemy (naziemny i podziemny) przez nie tworzone. Potoki te mają nie tylko *paradynamiczny* (wzajemne oddziaływanie), ale przede wszystkim, *paragenetyczny* charakter, polegający na tym, że powierzchniowy i podziemny podsystem krajobrazu rozwijają się (w miarę ewolucji systemu) w sposób coraz bardziej sprzężony, w kierunku uściślenia powiązań i wzajemnego uzależnienia. Na przykład, po-

wstałe nad próżnią podziemną zapadlisko kształtuje wokół siebie niewielką zlewnię – lej krasowy. Zbierając wody opadowe oraz gruntowe i sprowadzając je pod ziemię, lej sprzyja powiększeniu drenującej go próżni podziemnej. Obecność podziemnego drenażu i odprowadzenie w głąb materiału ze spływu powierzchniowego sprzyja z kolei zwiększeniu powierzchni zlewni (zmyw powierzchniowy). W ten sposób pomiędzy podziemnym a powierzchniowym elementem krajobrazu kształtuje się dodatnie sprzężenie zwrotne (wzajemna stymulacja) i powstaje *dynamiczna parageneza*. I na odwrót: kolmatacja ponoru w dnie leja krasowego przez materiał glebowy prowadzi do zaniku interakcji elementów, co odbija się funkcjonalnie i fizjonomicznie na podziemnych i naziemnych elementach krasowego systemu paragenetycznego. Oczywiście, na poziomie całego krajobrazu (a nie jego poszczególnych elementów), procesy interakcji pomiędzy podsystemem naziemnym i podziemnym są o wiele bardziej złożone, różnicują się powierzchniowo i wektorowo, niemniej jednak zachowują swój paragenetyczny charakter.

Ponieważ wertykalne potoki nie tylko przenikają przez geokomponenty KK, scalając je strukturalnie, ale i łączą ze sobą jego naziemną i podziemną części (podsystemy, geokompleksy), możemy mówić, że pionowe powiązania w KK mają charakter nie tylko międzykomponentowy, ale i międzykompleksowy. To oznacza, między innymi, że podziemna i naziemna część KK tworzą swoisty paradygmatyczny, a przede wszystkim paragenetyczny geosystem, którego nie mają krajobrazy niekrasowe o wyłącznie geokomponentowej strukturze pionowej i międzykomponentowym charakterze pionowych powiązań materialno-energetycznych.

Opisane wyżej właściwości wertykalnej struktury KK pozwalają uznać ją za specyficzną i zaliczyć do odrębnego *szczególnego typu* ułożenia geokomponentów wertykalnej struktury krajobrazów.

Horyzontalna struktura kompleksowa (morfologiczna)

Elementy struktury horyzontalnej – geokompleksy

Strukturę horyzontalną krajobrazu krasowego, jak i innych krajobrazów, tworzą całościowe topologiczne wewnątrzkrajobrazowe jednostki przestrzenne – geokompleksy. Są to hierarchicznie zorganizowane twory różnej wielkości tworzące geokompleksową mozaikę krajobrazu. Najprostszą „cegiełką” strukturalną poziomej struktury krajobrazu jest *facja* – homogeniczny fragment powierzchni o określonych granicach, nawiązujący do pewnego elementu rzeźby, w którego obrębie jest zachowana jednorodność podłoża skalnego (geotop), mikroklimatu (klimatop), gleby (pedotop) oraz roślinności (biotop), czyli jednorodny układ komponentów wertykalnej struktury. Facja to elementarny geokompleks, najmniejsza jednostka strukturalna, zrzeszająca geokomponenty w całość¹⁴. Facje składają się na jednostki wyższego szczebla taksonomicznego – tzw. *uroczyska*. Przykładami uroczysk mogą być stary lej krasowy o nachylonych zboczach i płaskim dnie, tworzących odrębne facje (zbocza i dna) lub ostaniec krasowy o stromych, skalistych ścianach (facja) i zaokrąglonym, porośniętym roślinnością, skrasowiałym wierzchołku (facja). Uroczyska składają się na *teren* – obszary o regularnym występowaniu kilku typów uroczysk, np., szeroka terasa zalewowa dużej rzeki z uroczyskami okresowo zalewanych płaskich powierzchni (łąk) oraz stale zawodnionych starorzeczy (jezior). W kraście przykładami terenów mogą być: skrasowiała spłaszczona powierzchnia wododziałowa usiana lejami krasowymi różnej wielkości (uroczyskami), polje krasowe z uroczyskami zboczy, dna, koryt tranzytowych lub zanikających rzek, lejów krasowych itd. Z terenów, jako z największych wewnątrzkrajobrazowych

¹⁴Odpowiednikiem facji w ekologii jest *ekotop* lub *biogeocenoza*.

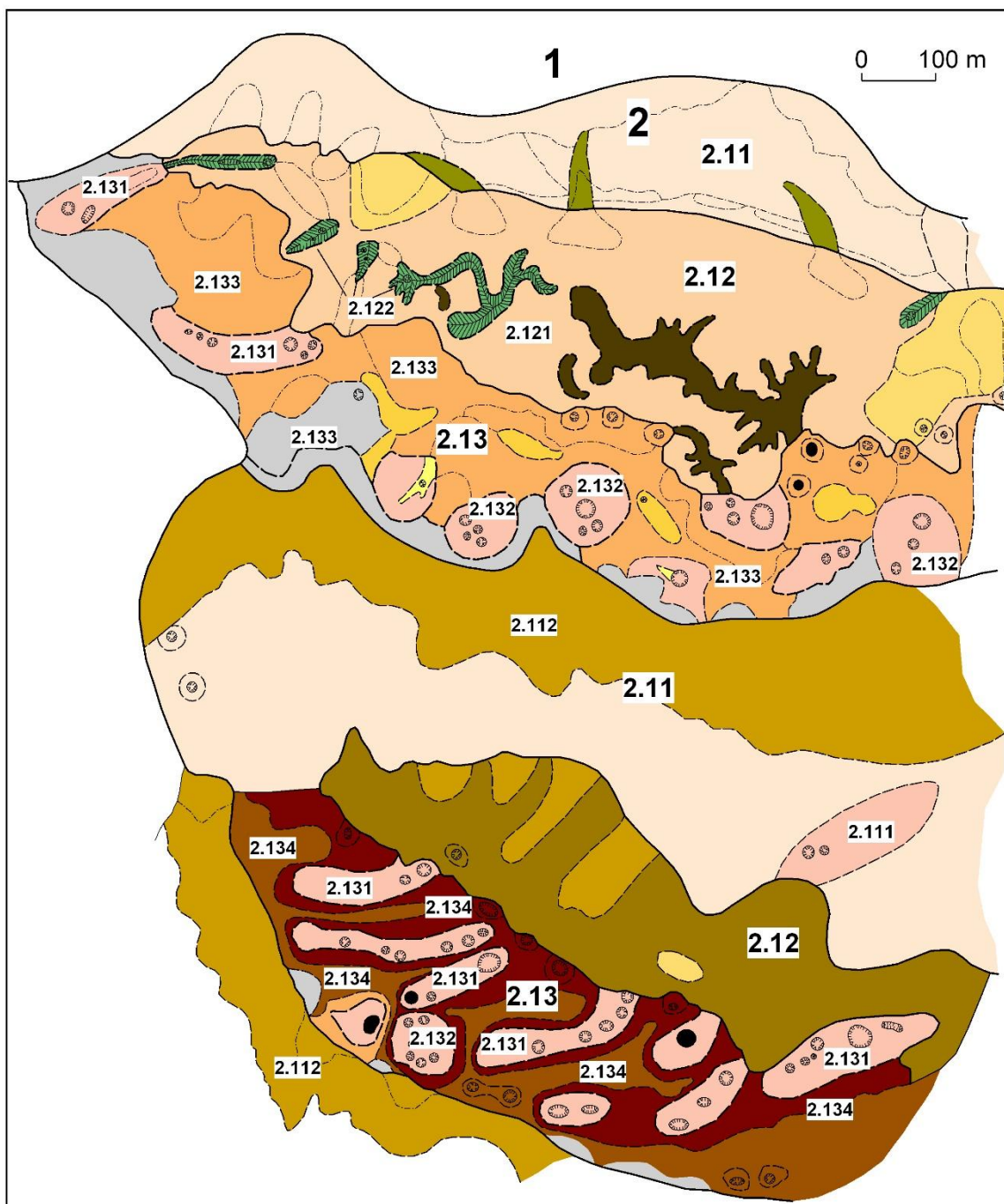
geokompleksowych jednostek topologicznych, składa się już sam krajobraz¹⁵. Geokompleksowe jednostki każdego poziomu to przede wszystkim swoiste geomorfologiczne zespoły przyrodnicze oraz „orkiestry” geodynamiczne, w których rolę dyrygenta odgrywa rzeźba, jej zróżnicowanie oraz procesy ją kształtujące i przez nią indukowane. Rzeźba (morfologia terenu) różnicuje warunki ekologiczne (nasłonecznienie, wilgotność i in.), decydujące o charakterze bioty (flory, fauny), gleb i w ten sposób o charakterze całego geokompleksu tej lub innej rangi. Geokompleksowa przestrzena (terytorialna) struktura krajobrazu nazywana jest często *morfologiczną* (rys. 7).

Trójpoziomowa (facja→uroczysko→teren) topologiczna organizacja krajobrazu stanowi jego mniej lub bardziej uniwersalny (dla wszystkich krajobrazów) szkielet taksonomiczny. Jednak w krajobrazach o bardziej zróżnicowanej strukturze wewnętrznej trójstopniowa hierarchia nie pozwala na adekwatne odwierciedlenie realnej struktury (morfologii) krajobrazu i wymaga wprowadzenia dodatkowych poziomów (jednostek) hierarchicznych, np., *zwienna* – *ogniwa* (VIDINA, 1970), *poduroczyska* (pomiędzy facją a uroczyskiem), *złożonego uroczyska*, *podterenu* (VOROPAI, ANDREYCHOUK, 1985), a w górach – *stryi* (pomiędzy uroczyskiem a terenem) (MILLER, 1974) itp. Problem ten zazwyczaj ujawnia się przy kartowaniu krajobrazów. Na ogół zróżnicowanie morfologicznej struktury krajobrazu jest uzależnione od zróżnicowania rzeźby, przede wszystkim charakteru (stopnia, głębokości, gęstości itp.) rozczłonkowania obszaru krajobrazowego. Dlatego krajobrazy wyżynne czy górskie mają bardziej złożoną strukturę niż równinne, a tym bardziej nizinne.

Kartowanie geokompleksowe (krajobrazowe) struktury krajobrazów krasowych w większości przypadków wykazuje konieczność stosowania bardziej szczegółowej skali taksonomicznej, ponieważ cechują się one bardziej złożoną strukturą wewnętrzną (organizacją przestrzenną). Z doświadczeń autora w kartowaniu KK wynika, że na ogół krajobraz krasowy tego samego typu geomorfologicznego co niekrasowy (nizinny, równinny, wyżynny czy górski) ma bardziej złożoną strukturę od krajobrazu niekrasowego – co najmniej o jeden strukturalny poziom taksonomiczny. Niektóre krasowe krajobrazy równin są tak samo „pstre” i złożone (lub nawet bardziej!) jak niekrasowe krajobrazy górskie. Wynika to z obecności w krajobrazach krasowych (w ich rzeźbie) nie tylko liniowych form erozyjnych, lecz również licznych form krasowych (lejów, kotlin, ślepych dolin, ostańców skalnych itp.). Sama dodatkowa obecność tych form (potencjalnych geokompleksów), ich zróżnicowane relacje przestrzenne oraz interakcje z formami liniowymi w znacznej mierze komplikują strukturę wewnętrzną KK. Głównym „winowajcą” komplikowania powierzchniowej (geokompleksowej, morfologicznej) struktury KK jest jego podziemny podsystem, „walczący” z powierzchniowym o materię i energię (przede wszystkim wodę).

Przestrzenna struktura KK jest nie tylko bardziej złożona od struktury krajobrazów niekrasowych, ale posiada specyficzne, charakterystyczne dla niej *cechy morfologiczne*. Chodzi przede wszystkim o wyraźną dominację (w dojrzałym KK) form koncentrycznych – okrągłych, owalnych, zarówno wklęsłych (leje, kotliny, polja), jak i wypukłych (pagóry i ostańce)

¹⁵ Facja – to najmniejsza *homogeniczna* (jednorodna) jednostka krajobrazowa, natomiast jednostki wyższych rzędów – uroczyska, tereny itd. należą do utworów *heterogenicznych* (o niejednorodnej strukturze wewnętrznej) i nazywane są *geochorami*.



Rys. 7. Fragment mapy krajobrazu (struktura morfologiczna) krasowego Płaskowyzu Kyrktay (Grzbiet Zerawszański, Uzbekistan):

jednostki krajobrazowe: 1 – erozyjne (przeważnie) stoki masywu krasowego, 2 – krajobraz skrasowiałego płaskowyzu. Przykłady hierarchicznie ustrukturyzowanych elementów krajobrazu krasowego: 2.11, 2.12 – jednostki poziomu terenowego, 2.132 – jednostka poziomu uroczyskowego

różnej wielkości¹⁶. Najczęściej formy koncentryczne tworzą zamknięte arealy, w których obrębie kształtują się odrębne geokompleksy.

Obecność czy dominacja koncentrycznych form tworzy specyficzny *rysunek* (planowy, morfologiczny) KK, odróżniający go od przeważnie liniowo orientowanych elementów krajobrazów niekrasowych, kształtowanych przez powierzchniowe cieki (krajobraz erozyjny), lodowce (krajobraz drumlinowy) czy nawet wiatr (jardangi w krajobrazie pustynnym). Oczywiście, w strukturze KK również występują formy liniowe, nawiązujące do dolin rzecznych, skarp erozyjnych czy uskokowych itp. Ich liczba w krajobrazie w stosunku do form koncentrycznych maleje jednak w miarę rozwoju ewolucyjnego KK. Wraz z wysokością położenia KK (im wyżej – tym mniej, ze względu na przyjaźniejsze warunki zanikania wód pod ziemię) oraz ze zmniejszeniem miąższości pokrywających podłoże krasowe osadów niekrasowych, zmniejsza się również liczba form liniowych, co także sprzyja zanikaniu powierzchniowej sieci wodnej, degradacji zlewni form erozyjnych. Stosunek form liniowych i koncentrycznych w krajobrazie krasowym jest wskaźnikiem integralnym i odzwierciedla szereg aspektów rozwojowych KK. Przechwytywanie przez próżnię podziemne potoków na powierzchni doprowadza do degradacji form liniowych i wykształcenia względnie autonomicznych (w sensie geodynamicznym) form koncentrycznych, na których podstawie formują

¹⁶ Dominacja form wklęsłych czy wypukłych jest uzależniona w znacznej mierze od warunków klimatycznych oraz wieku krasu. W krajobrazach krasowych obszarów tropikalnych – z dużą ilością opadów i długim cyklem rozwojowym w klimatycznie niezmiennych (przez miliony lat) warunkach – dominują formy wypukłe (pagórkowate, stożkowe i ostańcowe). Natomiast w krasie umiarkowanych szerokości geograficznych przeważają formy wklęsłe (leje, wanny, depresje). Krajobrazy krasowe obszarów o klimacie przejściowym (np. śródziemnomorskim) dysponują „mieszanką” form wklęsłych i wypukłych, a ich proporcje są uzależnione zarówno od czynników klimatycznych (nie tylko szerokościowych, ale też wysokościowych), jak również strukturalno-geologicznych.

się całościowe jednostki przyrodnicze – geokompleksy.

Reasumując, horyzontalna struktura KK z natury swej jest kompleksowa i hierarchiczna. Jej elementami są całościowe, hierarchicznie zorganizowane w przestrzeni krajobrazowej jednostki topologiczne różnej wielkości: od elementarnych homogenicznych (facjalnych) po złożone wieloskładnikowe utwory heterogeniczne.

Powiązania materialno-energetyczne pomiędzy geokompleksami

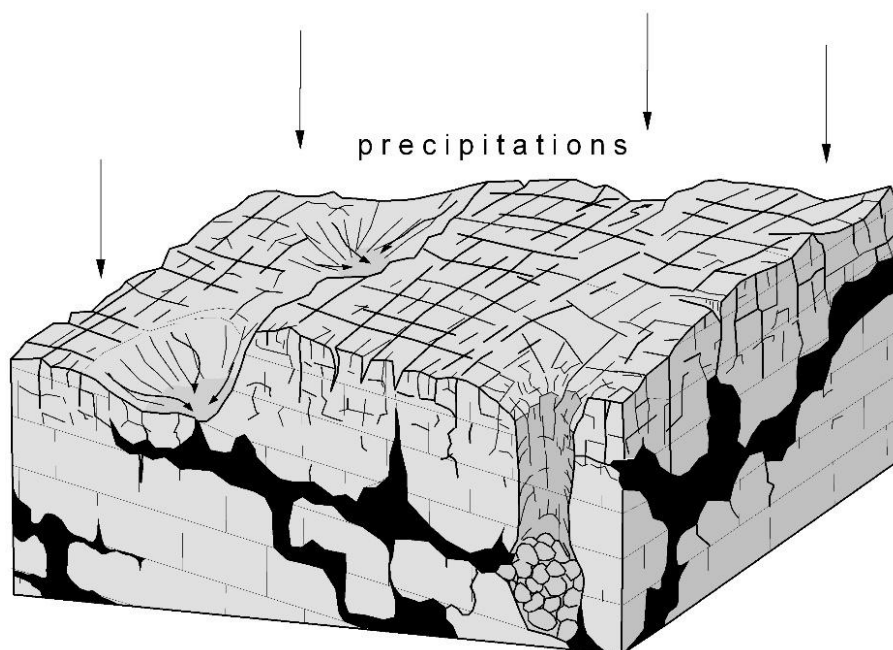
Horyzontalne powiązania geokompleksów w KK również różnią się od tych w krajobrazach niekrasowych. W obu przypadkach są one reprezentowane przez lateralne potoki materialne i energetyczne w postaci spływu liniowego i powierzchniowego, procesy stokowe, cyrkulację mas powietrznych, migracje organizmów itp. Ich główne kierunki są kontrolowane przez hipsometrię i rzeźbę powierzchni, wytwarzające „gradient grawitacyjny”, decydujący o przemieszczeniu gęstszych geomas (skał, wody, osadów), czynniki klimatotwórcze, wytwarzające gradienty termiczne i baryczne, uruchamiające masy powietrzne oraz czynniki ekologiczne, zmuszające do przemieszczenia się organizmów żywych (biomas).

Wyrażna specyfika rzeźby krasowej modyfikuje, komplikuje, a nawet narusza lateralną wymianę materialno-energetyczną pomiędzy poziomymi strukturalnymi elementami KK. W wielu przypadkach dochodzi do jej prawie całkowitego zanikania. Na przykład, w nagim (odkrytym) krasie wody meteoryczne spadające na skrasowiałą, szczelinowatą (pola żłobków krasowych) powierzchnię, praktycznie całkowicie infiltrują w głąb masywu, pozostawiając sąsiadujące ze sobą geokompleksy (facje, uroczyska) bez interakcji w płaszczyźnie lateralnej (rys. 8).

W krasie zakrytym, lateralną wymianę materialno-energetyczną pomiędzy geokompleksami w znacznej mierze zaburzają pomierzch-

niowe formy krasowe, które przechwytyją spływ, zarówno liniowy jak i powierzchniowy, lokalizując go w obrębie odrębnych geokom-

pleksów, często z „przekazywaniem” podsystemowi podziemnemu.



Rys. 8. Hipotetyczny fragment powierzchni skrasowiatego masywu z polami szczelinowych żłobków krasowych oraz lejkami z rozpuszczania. Wskutek bezpośredniego wsiąkania opadów w skrasowiaste „sito” skalne, oddziaływania lateralne pomiędzy elementami morfologicznymi krajobrazu są minimalne.

W ten sposób powstaje specyficzny *radialno-centryczny* (a nie liniowy, jak w krajobrazach niekrasowych) typ koniugacji materialno-energetycznej jednostek wewnątrz- krajobrazowych, często z podziemną utylizacją potencjalnych oddziaływań zewnętrznych na krajobraz. Mamy więc do czynienia z przestrzennym ograniczaniem poziomego wektora powiązań w strukturze KK, z rozdrobnieniem, lokalizowaniem się potoków w obrębie mniejszych jednostek strukturalnych, a na ogół z ich zamykaniem się i dążeniem do samoizolacji jednostkowej – w przeciwieństwie do krajobrazów niekrasowych, cechujących się otwartością dynamiczną swoich jednostek, ich wielopoziomowymi interakcjami i ogólną tendencją do wzrastania stopnia tranzytowości potoków międzykompleksowych (czyli wzrostu otwartości geosystemu). Nieco uogólniając i upraszczając można powiedzieć, że w KK występuje tendencja do zanikania horyzontalnych powiązań strukturalnych, ich dywersyfikacji, i w sumie – do geodynamicznego izolowania

się jednostek (geokompleksów), a w krajobrazach niekrasowych – do rozwoju powiązań lateralnych i coraz szerszego dynamicznego łączenia się jednostek.

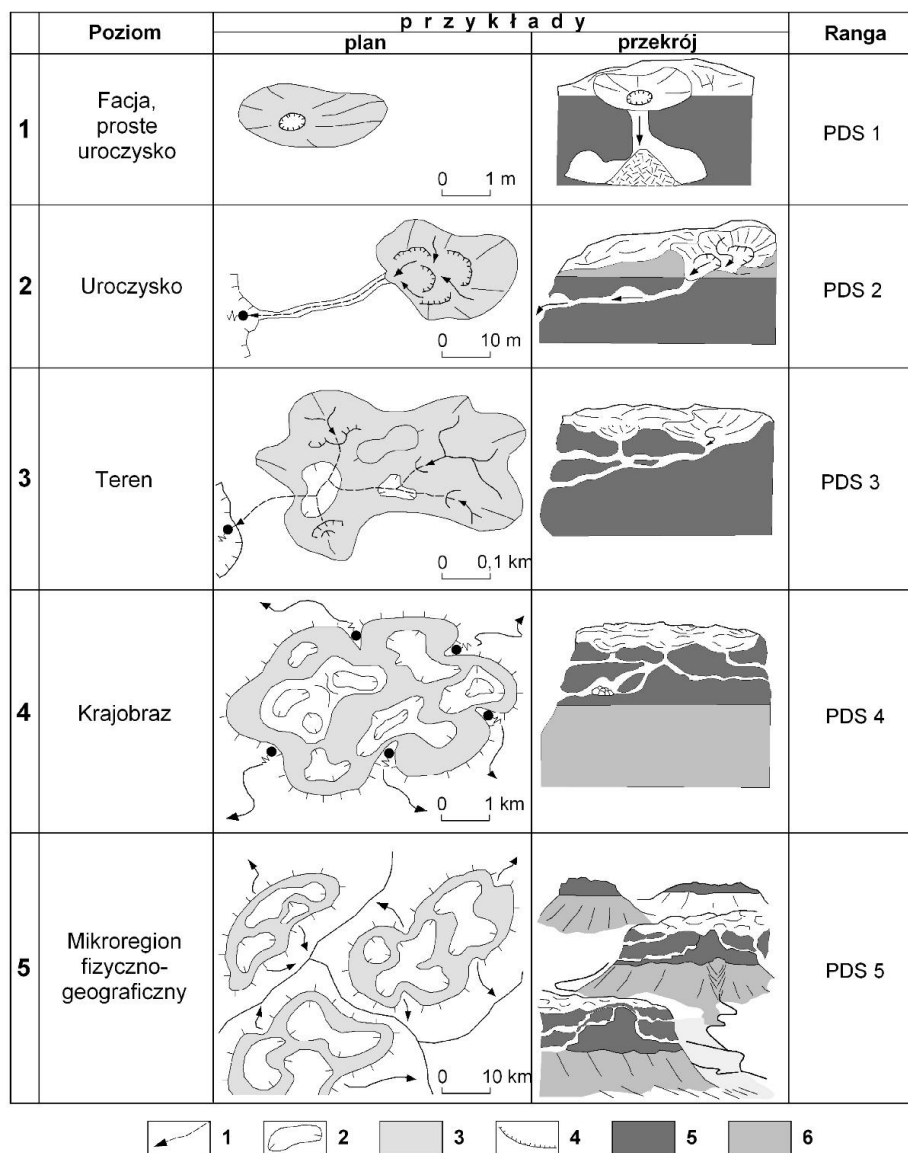
Ta okoliczność dotycząca specyfiki lateralnych powiązań strukturalnych w KK ma decydujące znaczenie w jego rozwoju oraz determinuje kształtowanie jego fizjonomii przyrodniczej.

Aspekty paradynamiczne i paragenetyczne poziomej struktury krajobrazów krasowych

Tak jak i w przypadku powiązań wertykalnych, lateralne potoki materialno-energetyczne w KK łączą jego elementy strukturalne (geokompleksy) w paradynamiczne i paragenetyczne całościowe utwory funkcjonalne. Przykładami takich układów (geosystemów) paradynamicznych lub paragenetycznych mogą być następujące pary: lej krasowy oraz jego otoczenie, ślepa dolina krasowa (z pono-

rem) i areal powierzchniowy, który ona drenuje itp. (rys. 9). Jedność funkcjonalna utworów paragenetycznych jest determinowana ukierunkowanymi potokami materialno-ener-

getycznymi, łączącymi dynamicznie elementarne homogeniczne jednostki geokompleksowe w heterogeniczne systemy paradynamiczne (paragenetyczne).



Rys. 9. Przykłady krasowych geosystemów paradynamicznych różnej rangi wielkości i organizacji:

1 – główne kierunku ruchu wód krasowych; 2 – leje i depresje krasowe; 3 – tereny różnej wielkości dynamicznie sprzężone za pośrednictwem spływu i drenażu krasowego; 4 – cieki wodne; 5 – seria (warstwa, formacja) skał krasowiejących; 6 – skały niekrasowiejące

Sprężenie wertykalnej i horyzontalnej struktury krajobrazów krasowych

Zatem, struktura krajobrazów krasowych, zarówno pionowa jak i pozioma, w pierwszym przypadku zasadniczo, a w drugim – znacząco, różni się od struktury krajobrazów nie-

krasowych. Cechują ją ściśle powiązania funkcjonalno-dynamiczne, w tym paradynamiczne i paragenetyczne, geokomponentów, geokompleksów oraz podsystemów.

Oczywiście, przedstawienie paradynamicznych (paragenetycznych) geosystemów KK odrębnie dla struktury wertykalnej i dla struktury horyzontalnej ma charakter nieco umow-

ny. W rzeczywistości funkcjonują one jako przestrzenna całość. Lej krasowy wraz ze zlewnią można rozpatrywać jako system paragenetyczny w strukturze lateralnej KK, ale też jako element powierzchniowy pionowego systemu paragenetycznego, którego drugim elementem jest próżnia podziemna (jaskinia) drenująca lej. Bardziej prawidłowe jest połączenie próżni podziemnej, leja nad nią oraz zlewni leja w jeden – integralny i „kompletny” – *krasowy naziemno-podziemny system paradydynamiczny (paragenetyczny)*, ponieważ wszystkie jego elementy funkcjonalne ściśle współdziałają i cechują się wzajemnym uzależnieniem genetycznym.

Również większe formy krasowe, np. duży lej krasowy z osuwiskami na zboczach lub ślepą dolinę krasową, kończącą się ponorem, należy rozpatrywać jako pomierzchniowe człony systemu paradydynamicznego, którego częścią podziemną jest system jaskiniowy kształtowany przez zanikający w ponorze potok. Dążąc tym tropem indukcyjnym, również sam krajobraz krasowy w całości można rozpatrywać w kategoriach mega-geosystemu paradydynamicznego (paragenetycznego), składającego się z dynamicznie i genetycznie sprzężonych części podziemnej i powierzchniowej.

Reasumując, specyfika systemowa krajobrazu krasowego jest determinowana szczególnie składem jego jednostek strukturalnych (wzbogacenie jednostkowe spektrum geokomponentowego i geokompleksowego) i osobliwościami przestrzennymi ich ułożenia (piętrowość), a także specyficznym – *krasowym* – sposobem ich wzajemnego oddziaływania (koniugacji), ujawniającego się w powstawaniu swoistego – krasowego typu geosystemowych utworów paradydynamicznych (paragenetycznych).

Związki krajobrazu krasowego z otoczeniem

Krajobrazy krasowe, a także niekrasowe, w ujęciu całościowym są otwartymi geosystemami dynamicznymi, związanymi wymia-

ną materialno-energetyczną ze swoim otoczeniem. Charakter relacji krajobrazów krasowych z krajobrazami sąsiadującymi jest w dużej mierze uzależniony od położenia hipsometrycznego KK w stosunku do obszarów otaczających. Na przykład, górowanie nad otoczeniem (położenie *autochtoniczne* w terminologii L. JAKUCS’A, 1979) sugeruje przeważnie jednokierunkowe (od strony KK) oddziaływanie krajobrazu na swoje otoczenie¹⁷. W takim przypadku otoczenie praktycznie nie wpływa na kształtowanie krajobrazu (z wyjątkiem czynnika klimatycznego) i w jego rozwoju decydujący udział mają procesy samorozwoju. Z kolei KK w dużej mierze determinuje procesy zachodzące w jego otoczeniu (np. nawadnianie obszarów przez źródła krasowe u podnóża masywów górskich).

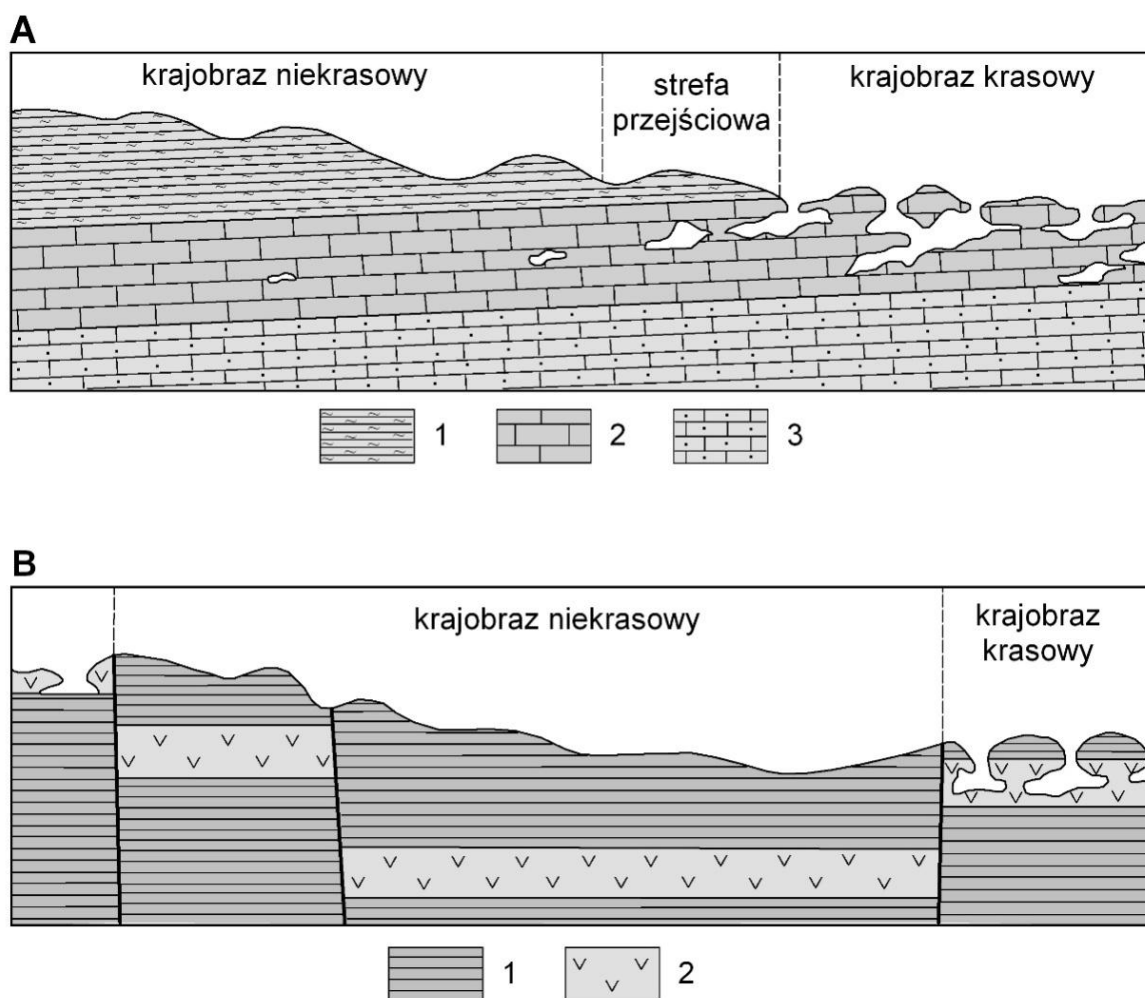
Przy *alogenicznym* usytuowaniu KK (na poziomie lub poniżej otoczenia – co zdarza się rzadko) KK staje się odbiornikiem oddziaływań zewnętrznych. Potoki materialno-energetyczne w dużej mierze, czasami decydująco, wpływają na kształtowanie KK, np. na charakter i stopień krasowienia. W przypadku położenia *tranzytowego*, krajobraz krasowy z jednej strony, przyjmuje ukierunkowane oddziaływanie wyżej położonych obszarów niekrasowych, z drugiej zaś – sam znacząco oddziałuje na krajobrazy położone niżej. Przy czym, potoki materialno-energetyczne, tranzytowo przenikające przez KK, ulegają znacznej transformacji, zarówno pod względem jakościowym (np., ilość wypływających wód), jak i jakościowym (ich skład chemiczny).

Granice pomiędzy krajobrazami krasowymi i niekrasowymi zazwyczaj są wyraźne, czasami nawet ostre. Jest to spowodowane przede wszystkim litologicznie uwarunkowanymi zasadniczymi różnicami morfologicznymi rzeźby krasowej i niekrasowej, decydującymi o fizjografii tych obszarów. Dość często gra-

¹⁷ Dobrym przykładem podobnych sytuacji mogą być wyżyny lub masywy górskie i płaskowyże krasowe, górujące nad otoczeniem. Często występują w regionie śródziemnomorskim.

nicom litologicznym serii skalnych, szczególnie w górach czy w obszarach występowania kuest, towarzyszą granice tektoniczne (uskoki). Wtedy granice między krajobrazami, podkreślone geomorfologicznie (skarpy plateau krasowych i kuest), mają charakter *liniowy* (rys. 10-B). Na obszarach równinnych lub wyżynnych o monoklinalnym zaleganiu serii

krasowiejących i ich „zanurzaniu się” pod osady niekrasowe, granica pomiędzy KK i KN zazwyczaj ma charakter przejściowy (rys. 10-A). Na planie przybiera ona postać *wijącej się krzywej*, odzwierciedlającej nierównomierną, erozyjnie uwarunkowaną zmianą miąższości pokrywy, izolującej serię krasową od powierzchni.



Rys. 10. Wybrane przykłady granic pomiędzy krajobrazem krasowym a niekrasowym:
A – niewyraźna, przejściowa granica (przypadek monoklinalnego zalegania serii krasowiejącej): 1 – utwory niekrasowiejące (terygeniczne) pokrywające serię krasowiejącą, 2 – skały krasowiejące, 3 – utwory niekrasowiejące (piaskowce), podścielające serię krasowiejącą; B – wyraźna, ostra granica (przypadek tektonicznego – uskoku – uwarunkowania głębokości zalegania skał krasowiejących); 1 – utwory niekrasowiejące, 2 – skały krasowiejące

Funkcjonowanie i rozwój krajobrazu krasowego

Funkcjonowanie

Funkcjonowanie każdego krajobrazu jako geosystemu to integralny, złożony, cykliczny, nieustanny, zsynchronizowany itp. proces wymiany materii, energii oraz informacji pomiędzy jego składnikami (geokomponentami, geokompleksami, podsystemami itp.). Funkcjonowanie krajobrazu krasowego jest niezwykle złożone. Tak jak w krajobrazach niekrasowych, jest ono determinowane strukturą całego geosystemu (liczbą elementów i charakterem ich powiązań) oraz procesami zachodzącymi zarówno w samym systemie, jak i w jego otoczeniu. Struktura KK jest jednak bardziej złożona od struktury KN. Ze względu na obecność podziemnego podsystemu z własnym zbiorem geokomponentów oraz objętościowość całego systemu, ogólna ilość wewnętrznych powiązań w KK, jak i w ogóle – cała jego funkcjonalna przestrzeń – jest kilkakrotnie większa, aniżeli w NK. Struktura KK wyróżnia się również dużym udziałem powiązań wewnętrznych, przede wszystkim pionowych.

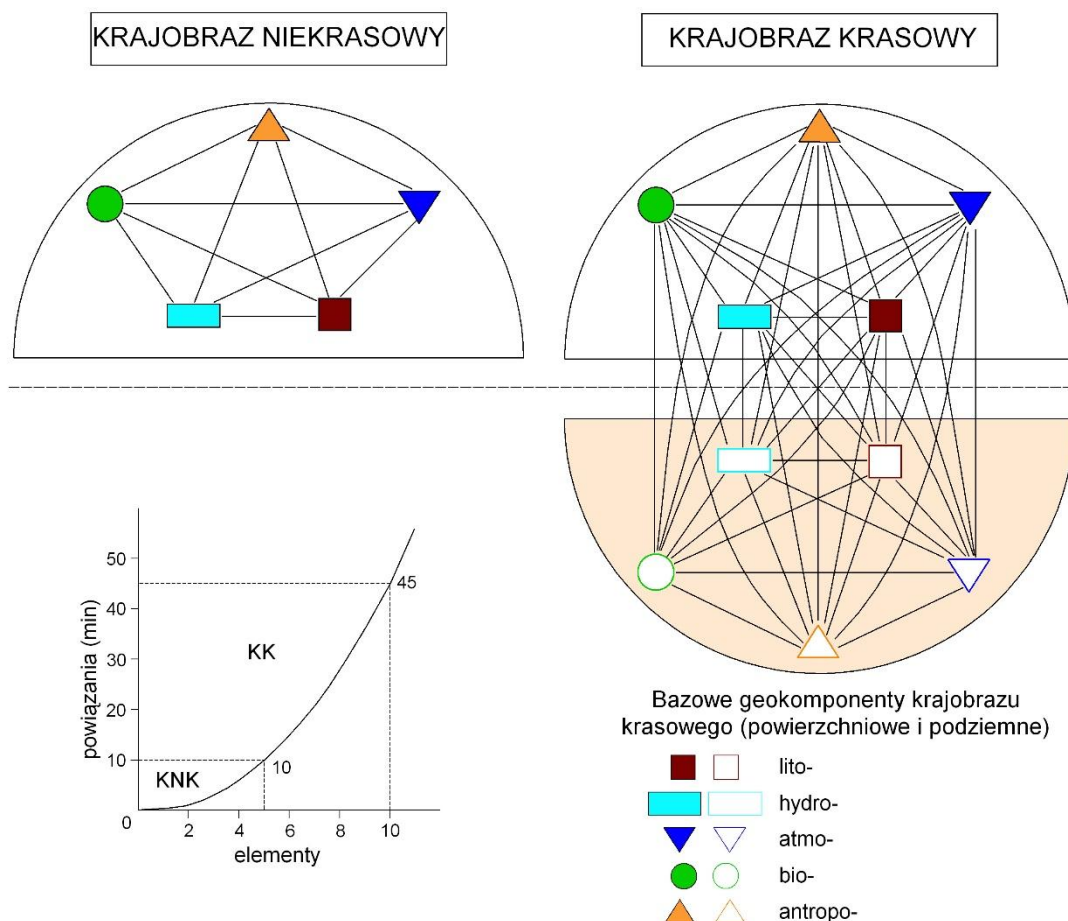
Główną osobliwością funkcjonalną KK, jego istotą, są *wzajemne oddziaływania (wymiana materii i energii) pomiędzy jego podsystemami: naziemnym a podziemnym*. Akurat w piętrowej (naziemno-podziemnej) strukturze KK tkwią najważniejsze przeciwieństwa fizyczno-energetyczne, uruchamiające obiegi materialno-energetyczne pomiędzy elementami jego obu podsystemów. Na przykład, rozwój próżni w podsystemie podziemnym powoduje powstawanie zapadlisk i ponorów przechwytyjących spływ w podsystemie naziemnym. Z kolei, zmiany na powierzchni (wylesienie terenu, kolmatacja ponorów) wpływają na przebieg procesów w podsystemie podziemnym (wypełnienie próżni materiałem ilastym lub na odwrót – wymywanie wypełniacza). Aktywność interakcji pomiędzy dwoma piętrami podsystemami KK uzależniona jest od ich roz-

piętości wysokościowej, aktywności neotektonicznej obszaru, typu krasu (litologicznego, morfogenetycznego, klimatycznego itp.), jego wieku oraz wielu innych czynników i okoliczności.

Strukturę funkcjonalną (model) krajobrazu krasowego przedstawia – na najwyższym z możliwych poziomów uogólnienia – rys. 11. Jest oczywiste, że proporcjonalnie do liczby elementów systemu krajobrazowego (w tym przypadku tylko genetycznych bloków elementów) wzrasta liczba funkcjonalnych powiązań między nimi, przy czym wzrost ten ma charakter wykładniczy. To jeszcze raz pokazuje, jak złożona jest funkcjonalna struktura KK w porównaniu z KN. Okoliczność ta musi być brana pod uwagę, zarówno przy badaniach KK, jak i przy realizowaniu różnych projektów gospodarczych w ich obrębie.

Złożoność strukturalna KK, jakościowe zróżnicowanie jego elementów i powiązań, wysoki potencjał energetyczny, determinowany piętrowością, sugerują wyższą aktywność funkcjonalną KK w porównaniu z KN, znajdującymi się w podobnych warunkach geomorfologicznych i klimatycznych.

Oprócz zróżnicowania jakościowo-substancjonalnego elementów KK (fizycznego, chemicznego, agregatowego), w jego funkcjonowaniu duże znaczenie mają różnice *przestrzennej lokalizacji* elementów strukturalnych w stosunku do zewnętrznych czynników transformujących i stabilizujących system krajobrazowy: system naziemny KK jest ściślej związany z „egzo-otoczeniem” KK, a podziemny – z jego „endo-otoczeniem”. Podsystem naziemny bezpośrednio przyjmuje oddziaływanie czynników środowiska zewnętrznego (promieniowanie słoneczne, opady, wpływy antropogeniczne), a podziemny – oddziaływanie czynników środowiska wewnętrznego (wahania wód podziemnych, zapadanie się stropu próżni podziemnych, akumulacja gazów itp.). Zatem każdy z podsystemów pełni do pewnego stopnia rolę *buforową* oraz *transformacyjną* – w stosunku do oddziaływań zewnętrznych (od góry i wewnętrznych (od dołu). To powo-



Rys. 11. Funkcjonalna struktura (modele ogólne) krajobrazów niekarstowego i karstowego wraz z wewnętrznymi powiązaniami ich elementów bazowych (geokomponentów masywnych). Różnica pomiędzy strukturami będzie jeszcze większa jeżeli weźmiemy pod uwagę geokomponenty niejednorodne (mieszane) oraz powiązania elementów struktur ze środowiskiem – otaczającym systemem.
KNK – krajobraz niekarstowy, KK – krajobraz karstowy.

duże pewne opóźnienia w reagowaniu podsystemu podziemnego na wydarzenia w podsystemie naziemnym i na odwrót, czyli mamy do czynienia z pewną *funkcjonalną asynchronizacją* wydarzeń w podsystemach strukturalnych KK. Klasycznym przykładem ilustrującym tę tezę może być reakcja krajobrazu karstowego na gwałtowne opady. Na początku oddziaływanie przyjmuje na siebie naziemny podsystem KK (filtracja wód opadowych przez strefę epikarstową, gromadzenie się wody w potokach przed ich zanikaniem w ponorach). Dopiero po kilku godzinach (czasami dniach) ma miejsce wyraźny wzrost poziomu wód pod ziemią lub ich koncentrowanie się w podziemnych rzekach, czyli w podsystemie podziemnym.

W ten sposób, oddziaływanie czynnika (opadowego) odbija się w całym systemie, lecz w mechanizmie reagowania na oddziaływanie czynnikowe podsystemy KK działają asynchronicznie. Zjawisko asynchroniczności podkreśla pewną *funkcjonalną autonomię* naziemnego i podziemnego podsystemu KK, co ma duże znaczenie w kształtowaniu się mechanizmów jego dynamiki i stabilizacji.

Dynamika i stabilność

Pod pojęciem *dynamiki krajobrazu* zwykle rozumie się, przede wszystkim, nieodwracalne zmiany występujące w nim pod wpływem zarówno czynników wewnętrznych (interakcje elementów), jak i zewnętrznych (interakcje krajobrazu z otoczeniem). Zmiany te nie na-

ruszają zasadniczo struktury krajobrazu i mogą mieć charakter częściowo (umownie) odwracalny. Zmiany nieodwracalne to te związane przeważnie z procesami geodynamicznymi (erozją, spływem powierzchniowym), szczególnie o przebiegu katastrofalnym, natomiast charakter umownie odwracalny mają zmiany cykliczne (dobowe, sezonowe itp.), albo zmiany regeneracyjne, związane z oddziaływaniem czynników naturalnych (pożary, powodzie) lub antropogenicznych (wypalanie lub wycinanie lasów, nawadnianie-osuszanie obszarów) itp. Jednak z upływem czasu, zachodzące w krajobrazie zmiany stają się coraz bardziej zauważalne (las wyrasta, wzrasta miąższość pokrywy glebowej, pogłębiają się doliny rzeczne, rozgałęziają się wąwozy itp.), szczególnie w przypadku występowania zjawisk katastrofalnych (osuwiska, obwały, duże powodzie, trzęsienia ziemi).

Krajobrazy krasowe cechuje na ogół *podwyższona dynamika* (zmiennosc), która jest bezpośrednim następstwem jego wysokiej aktywności funkcjonalnej, wynikającej z interakcji dwóch głównych podsystemów krajobrazu. W KK funkcjonuje jak gdyby druga, dodatkowa baza (czy różnopoziomowe bazy) erozyjno-denudacyjna, w postaci próżni podsystemu podziemnego. Podwaja (co najmniej!) ona aktywność procesów zachodzących w krajobrazie.

Dynamika KK jest wielokrotnie potęgowana również z tego powodu, że każdy system jaskiniowy, drenujący powierzchnię czy odrębna próżnia podziemna z zapadliskiem nad nią, stanowią swego rodzaju lokalną bazę erozyjną, co różnicuje terytorialnie tę Dynamikę oraz sprzyja lokalizowaniu się (Rozpraszaniu) i względnej autonomizacji zmian zachodzących w systemie krajobrazowym. Wszystko to nie oznacza jednak, że KK zmienia się fizjonomicznie (od zewnątrz) szybciej niż KN. W silnie skrasowiałych krajobrazach o rozwiniętym podsystemie podziemnym lub krajobrazach z odkrytym krasem, aktywne zmiany (wraz z wodą – głównym czynnikiem zmian) przemieszczają się pod ziemię.

Rozproszenie zmian w KK, związane z obecnością dużej ilości dynamicznie „niezależnych” elementów (lejów z ponorami, ślepych dolinek) czyni dynamikę krajobrazu w całości nieco bardziej równomierną przestrzennie w porównaniu z KN, gdzie najbardziej aktywne zmiany wyraźnie skupiają się w obrębie głębszych dolin rzecznych, pozostawiając oddzielające je powierzchnie wododziałowe w stanie pasywnej dynamiki w dłuższych odcinkach czasu.

Tak jak i w krajobrazach niekrasowych, stabilność KK uzależniona jest od powiązań materialno-energetycznych pomiędzy jego elementami (geokomponentami), ale i – co wyróżnia KK – pomiędzy podsystemami (podziemnym i naziemnym). W krajobrazie krasowym elementy podsystemu naziemnego są ściśle związane nie tylko ze sobą, ale i z odpowiednimi elementami podsystemu podziemnego, tworząc złożoną przestrzennie (*objętościową*) i czasowo (*metachroniczną*) strukturę dynamiczną. Złożoność strukturalna systemu, porównywalna ze złożonością jego otoczenia jest, jak wiadomo, warunkiem jego *stabilności*, czyli zdolności zachowywania stanu równowagi dynamicznej podczas oddziaływań zewnętrznych na system (lub powracaniu do niej). W krajobrazie krasowym warunek ten nie tylko jest spełniony, ale występuje nawet „z nawiązką” – ze względu na obecność podsystemu podziemnego oraz naziemno-podziemnych powiązań wewnątrzsystemowych.

Generalnie, złożoność strukturalna KK determinuje wyższy, w porównaniu z KN, poziom jego stabilności (jako całości)¹⁸, a specyfika struktury (piętrowość) – specyfikę mechanizmu(ów) stabilizacji. Oddziaływanie czyn-

¹⁸ Nie należy mylić stabilności krajobrazu z jego trwałością (w czasie) czy niezmiennością fizjonomiczną. Chodzi przede wszystkim o zdolność KK do zachowywania „na bieżąco” swego stanu i struktury w obliczu oddziaływań zewnętrznych, o mniejszą podatność na działanie czynników destruktywnych, mogących, na przykład, radykalnie zmienić krajobraz niekrasowy w czasie jednego oddziaływania, na przykład powodziowego.

ników zewnętrznych na system KK – od góry czy od dołu – jest zawsze buforowane przez naziemny lub podziemny jego podsystem, zmniejszający ich destruktywny wpływ (*buforowy* mechanizm stabilizowania KK). Dla podsystemu naziemnego buforem chroniącym go przed oddziaływaniami oddolnymi (np., wyziewami gazowymi, promieniowaniem) jest podsystem podziemny i na odwrót: podsystem podziemny chroniony jest przez naziemny przed oddziaływaniem czynników egzogenicznych (wahań temperatury, bezpośredniego wpływu promieniowania słonecznego, opadów deszczu, śniegu itp.).

Jednocześnie, strukturalna przepuszczalność (szczelinowatość, kawernistość, próżnie i kanały) oraz przestrzenne powiązania podsystemów KK (szczeliny, ponory, zapadliska, studnie, otwory jaskiń) determinują zdolność KK do pochłaniania i przepuszczania przez siebie szkodliwych oddziaływań (np. zanieczyszczenia) lub gromadzenia obcej materii – bez szczególnej szkody dla całego systemu. Wchłaniając zanieczyszczenia przez szczeliny i ponory, podsystem naziemny zachowuje, w odróżnieniu od KN, swoją czystość. Czasami odbywa się to kosztem zanieczyszczenia podsystemu podziemnego, ale częściej ten ostatni, wskutek wysokich zdolności przepuszczalnych swoich kolektorów, w dość krótkim czasie również uwalnia się od zanieczyszczających go substancji. Sprzyja temu zazwyczaj obfitość wody w kolektorach krasowych, będąca pochodną ich objętości oraz często turbulencyjnego charakteru ruchu wody pod ziemią (w podziemnych rzekach). Na tym polega *adaptacyjny* mechanizm stabilności KK w stosunku do oddziaływań zewnętrznych.

Oba podsystemy mogą również działać zespołowo na korzyść całego krajobrazu. Przykładem tego typu działań, a zarazem jeszcze jednego – *absorpcyjnego* – mechanizmu stabilizacji w KK mogą być powodzie w dolinach rzecznych. W krajobrazach niekrasowych niekiedy dochodzi do znacznego (5–10 m, a nawet więcej) wzrostu poziomu wody w rzekach, co nie tylko powoduje ogromne straty

gospodarcze, ale też intensywnie zmienia krajobraz naturalny (przebieg koryta, położenie wysp, erozja boczna, osuwiska itp.). Inaczej bywa w KK. Znane są przypadki z obszarów podgórskich i nie tylko, gdzie fala powodziowa, utworzona na obszarach niekrasowych, przy wtargnięciu na obszar krasowy ulega „gaszeniu” (obniżeniu), ze względu na przyjmowanie (absorpcję) wód przez próżnie krasowe i skrasowiałe szczeliny w skalistych zboczach dolin.

Specyfika rozwoju (samorozwoju) i ewolucji

Wiodąca rola wewnątrzsystemowych interakcji pomiędzy elementami (geokomponentami, podsystemami) krajobrazu krasowego, dominacja pionowego wektora oddziaływań i ograniczenie wektora poziomego (w tym – z otoczeniem) są podstawowymi przyczynami *autonomizacji* KK w trakcie jego rozwoju oraz dużego udziału procesów *samorozwoju* (*samoorganizacji*) w strukturze czynników rozwojowych KK.

W miarę rozwoju, w trakcie którego nieustannie wzrasta rola wewnątrzsystemowych naziemno-podziemnych interakcji jego elementów, krajobrazy krasowe coraz bardziej *odosobniają się funkcjonalnie* (obiegi wewnętrzne), co prowadzi w konsekwencji do ich *wyodrębnienia fizjonomicznego* na tle otoczenia. Zanikanie spływu powierzchniowego powoduje formowanie się krawędzi i skarp na jego obrzeżach. Masywy krasowe przybierają często kształty gór stołowych o skrasowiałej powierzchni (plateau krasowe). Powierzchnia ta nie ulega zbyt szybkiemu zniszczeniu denudacyjnemu z powodu natychmiastowego wchłaniania wód opadowych przez studnie i szczeliny. Cała energia mechaniczna wody zostaje zużyta dopiero pod ziemią, podczas koncentracji spływu poniżej buforowej strefy epikrasowej i łączenia się drobnych strumyków w burzliwe podziemne potoki „dziurawiące” wnętrze masywu. W ten sposób krajobraz krasowy jak gdyby konserwuje się od zewnątrz, zachowując swój niezmienny wy-

gląd zewnętrzny kosztem destrukcji wewnętrznej (formowania się kanałów i próżni). Geomorfologicznym następstwem tej okoliczności jest spowolnienie obniżenia powierzchni KK na tle otaczających obszarów, w których to właśnie powierzchnia przyjmuje na siebie całkowicie oddziaływanie czynników egzogenicznych, wskutek czego szybszej niszczy się i obniża. Niemniej jednak, intensywność zmian w KK (niewidocznych dla oka – pod ziemią) na ogół jest wyższa, ponieważ woda, będąca w krasie (i nie tylko) głównym czynnikiem krajobrazotwórczym niszczy skałę z podwójną siłą – zarówno chemicznie, jak i mechanicznie.

Ze względu na wiodącą rolę (w rozwoju i kształtowaniu wyglądu) oddziaływań wewnętrznych, krajobraz krasowy staje się mniej zależny, w porównaniu z KN, od swego egzosystemowego (strefowo-geograficznego, sektorowo-klimatycznego itp.) otoczenia. W jego obrębie rozwijają się specyficzne gleby i biocenozy (ekosystemy), znacznie odbiegające od prawidłowych strefowych. Dlatego często się mówi o *astrefowych* i innych „anomalnych” właściwościach KK, wyróżniających je przyrodniczo na tle stref roślinnych, glebowych itp. Na przykład, ze względu na podwyższoną suchotę powierzchni (podziemny drenaż), a często też wyższą temperaturę powierzchni skalnej, w obrębie KK rozwija się bardziej południowa (w porównaniu z otaczającymi formacjami) roślinność i gleby. To powoduje, że wśród krajobrazów tej lub innej strefy roślinnej, w miejscach występowania krasu pojawiają się enklawy i wyspy z reprezentantami roślin strefy bardziej południowej. Na obszarach krasowych roślinność bardziej południowych stref może przenikać na północ, deformując granice stref i tworząc wyspy w obrębie stref położonych bardziej na północ. Zjawisko to często obserwuje się na Równinie Wschodnioeuropejskiej (ANDREYCHOUK, 2007), Zagadnienie to ilustruje rys. 12.

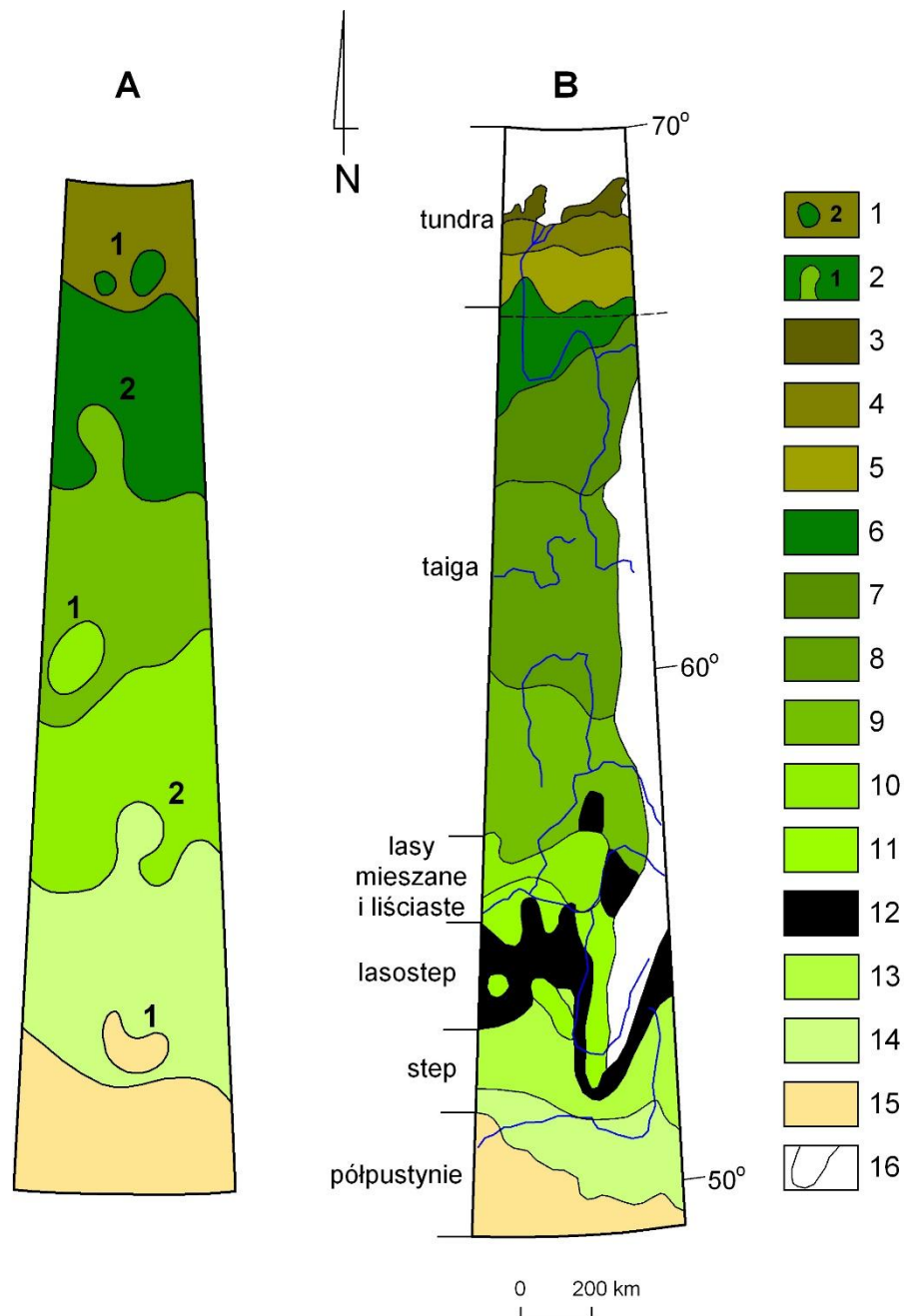
Ze względu na specyfikę środowiskową oraz „anomalne” właściwości, N. GVOZDETSKIY (1972, 1977) proponuje wyróżniać KK w posta-

ci szczególnego typu krajobrazów, których nie należy zaliczać do żadnego z wydzielanych *strefowych typów genetycznych*.

W krajobrazach krasowych znaczna ilość materiału włączonego w lokalne czy ogólnokrajobrazowe obiegi materii pozostaje w krajobrazie. Dotyczy to zarówno akumulacji powierzchniowej materiału (pokrywy rezydualne, trawertynowe tamy i kaskady), jak i podziemnej (chemogeniczne i mechaniczne wypełnienie próżni krasowych). Jest to słuszne, w różnej co prawda mierze, dla krajobrazów krasowych wszystkich stref klimatycznych, chociaż pod tym względem występują pewne różnice jakościowe pomiędzy akumulacją chemogeniczną w krajobrazach „ciepłych” i „zimnych”. W tych pierwszych materiał deponowany jest głównie poprzez wytrącanie wskutek degazacji czy odparowywania wody, w drugich – poprzez proces kriochemiczny (wymrażanie składnika mineralnego). Pozostawanie znacznej ilości materiału w krajobrazie jest jeszcze jedną cechą ewolucyjnorozwojową, odróżniającą KK od KN. Nie znaczy to jednak, że KK jest bardziej długowieczny od KN, a wskazuje jedynie na różnice jakościowe, polegające na transformacji w KK podłoża geologicznego, czego nie mamy w krajobrazach niekrasowych.

A zatem, w rozwoju krajobrazów krasowych duże znaczenie (zdecydowanie większe niż w przypadku krajobrazów niekrasowych) mają procesy samorozwoju, polegające na (i stanowiące ich istotę) interakcjach pomiędzy podsystemem podziemnym i naziemnym. Wpływ procesów samorozwoju (samoorganizacji) jest tak znaczący, że powoduje autonomizację, wyodrębnienie, „anomalizację” (jakkolwiek rozumianą) KK wśród innych krajobrazów.

Nie należy jednak marginalizować znaczenia zewnętrznych czynników rozwojowych, czyli kontroli rozwoju KK poprzez system nadrzędny (środowisko). Ich wpływ ma również duże znaczenie, chociaż jego następstwa uwidaczniają się w krajobrazie w perspektywie bardziej długotrwałej (ewolucyjnej).



Rys. 12. Przykład deformującego wpływu krasu na równoleżnikowy przebieg stref roślinnych (wycinek południkowy z mapy roślinności Równiny Wschodnioeuropejskiej wzdłuż zachodniego mega-stoku Uralu) (ANDREYCHOUK, 2007):

A – schemat abstrakcyjny ilustrujący opisywaną prawidłowość: 1 – „wyspy” bardziej południowych typów roślinności i krajobrazów w obrębie bardziej północnych stref roślinnych, 2 – zdeformowane przez kras (obszary krasowe) granice pomiędzy strefami roślinnymi; B – 3–5 – tundra (arktyczna, mszysto-porostowa oraz niskokrzewiasta), 6 – lasotundra, 7–9 – tajga (świerkowa, świerkowo-jodłowa, tajga z gatunkami drzew drobnolistnych), 10 – lasy mieszane, 11 – lasy liściaste, 12 – lasostep, 13–14 – step (stepy trawiaste), 15 – półpustynia (step suchy), 16 – Ural

Dwie główne grupy czynników kontrolują od zewnątrz (ukierunkowują ewolucyjnie) rozwój KK: *klimatyczny* (egzogogeniczny) oraz *tektoniczny* (endogeniczny). Czynniki klima-

tyczny – pochodny położenia geograficznego KK (strefowego i hipsometrycznego) – wpływa poprzez temperaturę, ilość opadów i czas ich oddziaływania (ciągłość-nieciągłość)

na intensywność procesów krasowienia. W warunkach cieplejszego i bardziej wilgotnego klimatu procesy krasowe przebiegają intensywniej, dlatego KK szybszej osiągają dojrzałe (a nawet equifinalne) stadia rozwoju, aniżeli w warunkach umiarkowanego czy zimnego klimatu¹⁹.

Ewolucyjny wpływ czynnika tektonicznego – ruchów skorupy ziemskiej – na krajobraz krasowy jest również bardzo istotny. Pionowy kierunek ruchów tektonicznych determinuje przebieg całego ewolucyjnego cyklu krasowienia. W przypadku przyjaznych dla rozwoju krasu ruchów wypiętrzających mamy do czynienia z normalnym cyklem rozwojowym, kiedy KK ewolucyjnie wyłania się z megacyklu krasowego (jako stadium – patrz poprzedni paragraf) i stopniowo przekształca się w coraz bardziej niezależny i autonomiczny (samoorganizujący się) system krajobrazowy – aż do samozniszczenia. W przypadku stabilizacji lub zmiany kierunku ruchów na obniżające, którym towarzyszy utrata przez rzeźbę energii oddziaływań (degradacja baz erozyjnych), KK zanika, nie realizując swojego potencjału rozwojowego²⁰. Ogólną ewolucję struk-

tur krajobrazowych na tle megacyklu krasowego obrazuje rys. 13.

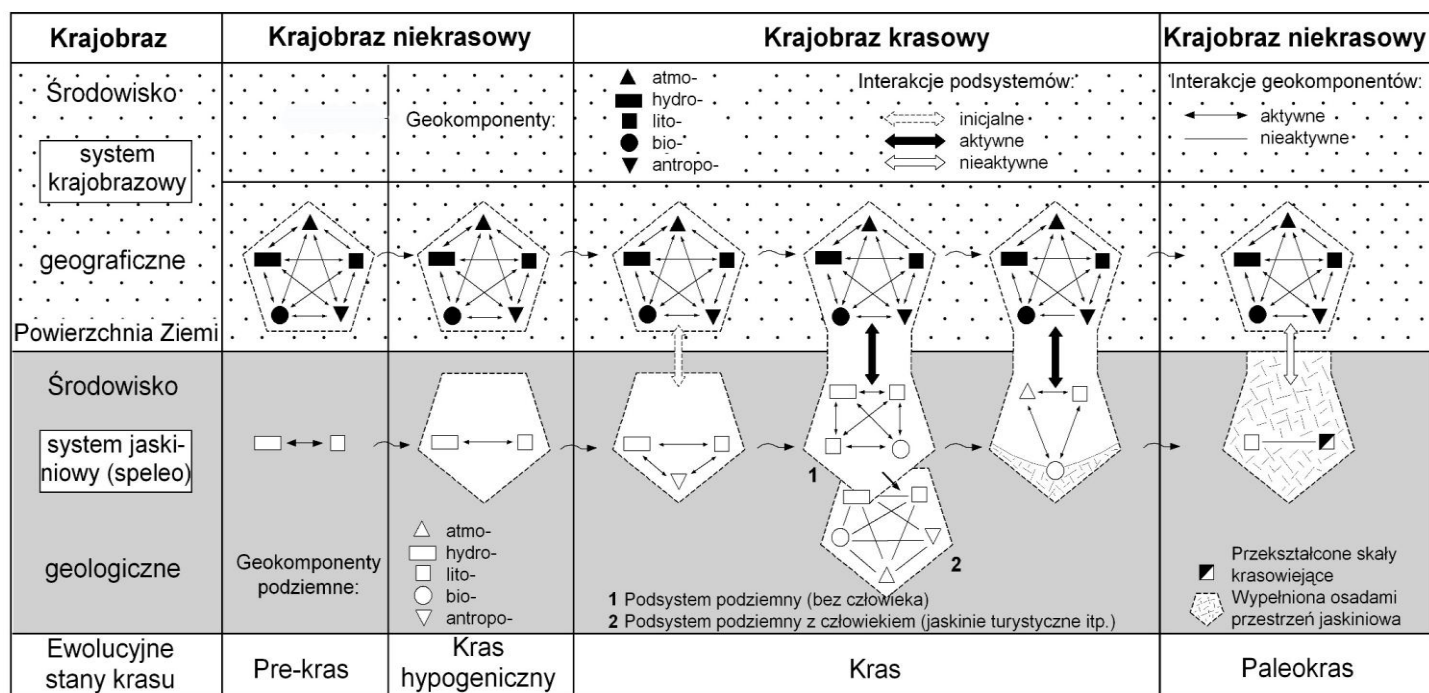
Uogólniając czynnikowe kwestie dynamiki i rozwoju KK można stwierdzić, że wewnętrzne czynniki (interakcje pomiędzy elementami) są ważniejsze w aspekcie kształtowania funkcjonalnej i fizjonomicznej odrębności KK, natomiast czynniki zewnętrzne determinują intensywność oddziaływań elementów wewnątrz krajobrazu oraz określają jego tendencje i możliwości rozwojowe.

W rozdziale tym zostały bardzo ogólnie omówione – na poziomie wyłącznie konceptualnym – niektóre zasadnicze aspekty systemowej organizacji krajobrazu krasowego. Mówiliśmy o pewnym abstrakcyjnym KK, bardzo upraszczając sytuację i nie biorąc pod uwagę dużego zróżnicowania krajobrazów krasowych (nagie, zakryte, równinne, górskie, wysokogórskie, tropikalne, śródziemnomorskie, wapienne, gipsowe itp.). Zdaniem autora, można sobie jednak pozwolić na tak daleko idącą generalizację, ponieważ, bez względu na duże zróżnicowanie, wszystkie KK w zaawansowanym stadium rozwoju mają główny atrybut strukturalny: próżnie podziemne i kanały, tworzące specyficzną pionową strukturę krajobrazu. Ta ostatnia z kolei determinuje charakterystyczny przebieg procesów w KK, unifikuje różnice pomiędzy poszczególnymi typami KK i doprowadza do ich wyraźnej specyfikacji wśród innych krajobrazów.

¹⁹ Klimat nie jest jedyną ani najważniejszą przyczyną zasadniczej różnicy rzeźby obszarów umiarkowanych i tropikalnych. Duże znaczenie ma również okoliczność paleogeograficzna, polegająca na tym, że obszary niskich szerokości geograficznych rozwijały się przez miliony lat w o wiele bardziej stabilnych warunkach klimatycznych – bez zlodowaceń czy licznych transgresji mórz, w przeciwieństwie do krajobrazów położonych w strefach umiarkowanych i polarnych.

²⁰ Można w tym przypadku snuć rozważania na temat „strat ewolucyjnych”. Na tle rozwoju ewolucyjnego krajobrazów tego lub innego terytorium, stadium krasowo-krajobrazowe (jeżeli w przekroju geologicznym obszaru występują skały krasowiejące, a elewacje tektoniczne doprowadzą do ich odsłonięcia) może pozostawić wyraźny ślad ewolucyjny w postaci specyficznych gatunków roślin i zwierząt, które wykształciły się w specyficznym środowisku krasowym. To, że w takim środowisku dochodzi do wyraźnej specjalizacji organizmów i formowania się nowych gatunków (nie tylko pod ziemią!), potwierdzają badania ekologów. Liczba endemitów może osiągać w nim kilkanaście %! (w rezerwacie Tsyngi de Bemaraha na Madaskarze jeszcze więcej). Bez wątpienia, stadia krasowe w rozwoju

różnych obszarów naszej planety w znaczącym stopniu przyczyniły się do rozwoju i większego zróżnicowania jej świata organicznego.



Rys. 13. Ogólny schemat ewolucji struktury krajobrazu krasowego na tle megacyklu krasowego

ZASADY OCHRONY KRAJOBRAZÓW KRASOWYCH

Systemowe wizje krajobrazu krasowego, których jedna z wersji została zaprezentowana powyżej, mają bez wątpienia znaczenie praktyczne: edukacyjne (podejście, koncepcja), gospodarcze (zagospodarowywanie obszarów krasowych) oraz dotyczące ochrony przyrody (ochrona krasu i jaskiń). W tekście poniżej dokonano próby powiązania rozważań krajobrazowo-systemowych z problemem ochrony obiektów i obszarów krasowych – również na poziomie dość ogólnym.

Problem ochrony krasu i jaskiń

Krajobrazy krasowe, a jaskinie w szczególności, są obiektami wartościowymi pod względem przyrodniczym. Dlatego często są obejmowane ochroną prawną. Ze skutecznością tej ochrony bywa jednak różnie. Nawet w krajach o wysokiej świadomości ekologicznej obywateli i bezwzględny przestrzeganiu zasad ochrony przyrody, nierzadko występują kłopoty z właściwą ochroną obiektów krasowych. Kłopoty te wynikają najczęściej z nieuwzględnienia specyfiki zachodzących w obrębie krajobrazów krasowych procesów przyrodniczych (przestrzenne interakcje podsystemów KK). O wiele gorzej wygląda sytuacja w krajach z gospodarką przejściową (np., w krajach Europy Wschodniej), krajach intensywnie rozwijających się (Chiny, Azja Południowo-Wschodnia) lub słabo rozwiniętych (afrykańskich i in.). W krajach tych obserwuje się wyraźną tendencję wzrostową w odniesieniu do liczby obejmowanych ochroną obiektów krasowych i jaskiń. Jest to zjawisko niewątpliwie pozytywne, chociaż, niestety, coraz częściej towarzyszy mu tendencja do komercjalizacji obiektów (ich prywatyzowanie, przekształcanie w *show caves*, organizacja parków rozrywki). W tej sytuacji pytania o skuteczność ochrony stają się jesz-

cze ostrzejsze i wymagają bardzo przemyślanego podejścia do organizacji tej ochrony.

Doświadczenia eksploatacji jaskiń turystycznych na całym świecie pokazują, że dobry management obiektów jest niezwykle ważnym narzędziem skutecznej ochrony, ale nie rozwiązuje wszystkich realnych czy potencjalnych problemów. Mimo właściwego prowadzenia obiektu (obszaru) krasowego, często obserwuje się jego postępującą *degradację przyrodniczą*. W ostatnich dekadach XX wieku uważano, że winę za to ponosi czynnik antropogeniczny, czyli człowiek. Przyjmowano (najczęściej słusznie), że przy wykorzystaniu obiektów krasowych przekracza się pewne krytyczne wartości ich obciążenia. Prowadzono w związku z tym specjalne badania: jak turyści wpływają na chroniony obiekt, i na ich podstawie określano optymalną odwiedzających.

Tego typu zabiegi miały pozytywny wpływ na ochronę i stan obiektów, lecz w większości przypadków nie zmieniły ogólnej tendencji degradacyjnej na tendencję stabilizacji lub renaturalizacji. Okazuje się, że przyczyna tego stanu tkwić może w *niewłaściwym podejściu do wyodrębnienia chronionego obiektu z obszaru krajobrazu krasowego*. Przy wcześniejszym określeniu granic obiektów czy obszarów chronionych nie uwzględniano (w różnym stopniu oczywiście) wyraźnej przyrodniczej specyfiki krajobrazu krasowego, mianowicie jego całościowości oraz zasadniczego znaczenia sprzężenia jego naziemnego i podziemnego podsystemu. Decyzje dotyczące ochrony przyrody były (i nadal są) przyjmowane bez oparcia na wyraźnie sformułowanych zasadach, ale też, niestety, z powodu ich braku. Systemowa wizja krasu pozwala na sformułowanie takich zasad.

Zasady ochrony

Zgodnie z koncepcją systemową, kras posiada zdolności *systemotwórcze* i w pewien sposób *organizuje swoje środowisko rozwojowe*, formując terytorialnie zwarte, funkcjonalno-całościowe

utwory krajobrazowe (geosystemowe). W krajobrazie krasowym występuje określona przestrzenna, funkcjonalno-dynamiczna oraz genetyczna (paragenetyczna) subordynacja wzajemnie oddziałujących elementów. Aby zrozumieć funkcjonowanie geosystemów krasowych, należy zbadać ich strukturę i granice. Nie znając granic i budowy geosystemu krasowego (krajobrazu, geokompleksu niższej rangi, jaskini), jego struktury funkcjonalnej, nie można prawidłowo określić właściwych granic obiektów czy obszarów, które należy objąć ochroną. Korzystając w takim przypadku wyłącznie z kryteriów fizjonomicznych (a nie strukturalno-funkcjonalnych) lub wychodząc z możliwości nabycia gruntów (zezwoleń, rekompensaty, dzierżawienie itp.), dzieli się całościowe utwory krasowe na sztuczne części, z których jedną bierze się pod ochronę, natomiast reszta pozostaje poza nią. To może przypominać ochronę czystości rzeki bez ochrony czystości jej dopływów.

Wiadomo, że funkcjonowanie i dynamika krajobrazu krasowego oraz budujących go geokompleksów (geosystemów) polega, przede wszystkim, na wiodących interakcjach pomiędzy jego częścią naziemną i podziemną (powiązania pionowe), przy czym relacje pomiędzy nimi mają nie tylko paradynamiczny, ale i paragenetyczny charakter. To oznacza, że wydarzenia w jednym podsystemie nie tylko „odbijają się” na stanie drugiego, lecz wywołują w nim reakcje jakościowe, zmieniające przebieg procesów. Na przykład, powstanie zapadliska na powierzchni terenu (oddziaływanie podsystemu podziemnego) zmienia charakter drenażu powierzchniowego (przechwytywanie potoków, formowanie się lokalnej zlewni itp.). Z kolei wycięcie lasów w podsystemie naziemnym zasadniczo zmienia charakter formowania się nacieków w położonych pod nim jaskiniach, itp.

Z tej strukturalnej predyspozycji – piętrowej wertykalnej budowy geosystemów krasowych oraz funkcjonalnej jedności ich podsystemów – wypływa ważny wniosek, na którym bazuje pierwsza zasada ochrony obszarów

i obiektów krasowych: *nie wolno oddzielać ochrony podziemnej części geosystemu krasowego od naziemnej, na przykład, chronić system jaskiniowy, ale nie chronić lasu nad nim lub na odwrót: chronić powierzchniowy geokompleks krasowy nie biorąc pod uwagę próżni występujących pod nim. Ochrona obszaru czy obiektu krasowego powinna być kompleksowa, uwzględniająca dwuczłonowy charakter krasowego systemu krajobrazowego.*

Nie mniej ważne jest uwzględnienie specyfiki horyzontalnej struktury krajobrazu krasowego, w tym jego większych składowych jednostek geokompleksowych (poziomu terenu). Jak pokazano wyżej, jednostki horyzontalnej (morfologicznej) struktury KK tworzą prawidłową, charakterystyczną dla danego krajobrazu, mozaikę hierarchicznie zorganizowanych jednostek niższej rangi taksonomicznej, łączoną w całość poprzez potoki materialno-energetyczne pomiędzy jednostkami. Potoki te łączą jednostki w specyficzne paradynamiczne i paragenetyczne lateralne geosystemy (prosty przykład już wspominany – wkleśła forma krasowa i jej zlewnia).

Relacje paradynamiczne i paragenetyczne cechują również większe jednostki geokompleksowe krajobrazu, na przykład złożonej formy depresję krasową z jej zlewnią, duży ponor krasowy i mały system rzeczny drenowany przez ponor, strefę nadbrzeżną morza (wraz z potężnymi wypływami wód krasowych) z masywami krasowymi, górującymi nad nią itp. Z tej okoliczności wynika następny wniosek dotyczący ochrony przyrody: przy określaniu granic obszarów czy obiektów typowanych do ochrony, konieczne jest *uwzględnienie występujących w KK lateralnych powiązań o naturze paragenetycznej pomiędzy jego elementami (geokompleksami).* Przy czym: *wymiary chronionej części krajobrazu powinny odpowiadać nie wielkości chronionego obiektu krasowego, a być poszerzone o cały system paradynamiczny (paragenetyczny) z nim związany.* Stanowi to drugą ważną zasadę planowania i realizowania ochrony krasowych obiektów i obszarów, wynikającą z systemowej natury KK.

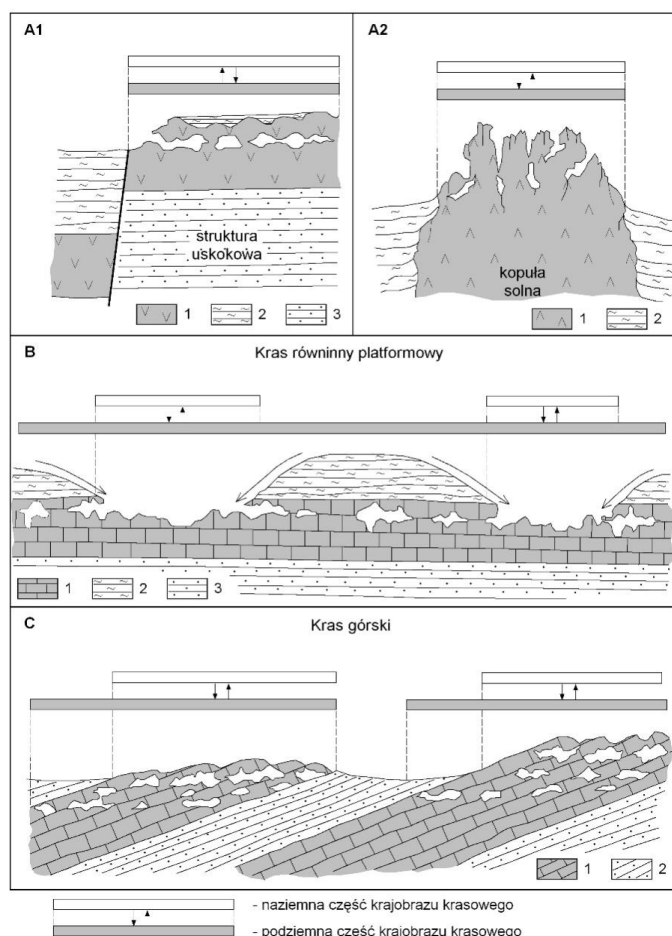
Sytuacje problemowe

Zatem, przy ochronie krasu, biorąc pod uwagę wertykalny aspekt struktury KK, należy uwzględnić zasadę zintegrowanej ochrony jego podsystemu naziemnego i podziemnego, a w aspekcie horyzontalnym – uwzględnić paradynamiczne otoczenie obiektów i utworów krasowych. Obie postulowane zasady wydają się być oczywiste. Niemniej jednak, przy realizacji tych zasad w praktyce często dochodzi do komplikacji i nieporozumień, szczególnie na etapie planowania ochrony i projektowania obiektu chronionego. Przy założeniu, że z formalnego punktu widzenia mamy „zielone światło” odnośnie do określenia granic przestrzennych planowanego obiektu czy obszaru chronionego, musimy zdawać sobie sprawę z trudności merytorycznych przy wytyczaniu optymalnych strukturalno-funkcyjnych granic. Trudności te najczęściej wiążą się z często występującym przestrzennym niedopa-

sowaniem granic naziemnej i podziemnej części geokompleksu (geosystemu) krasowego. Można wyróżnić kilka aspektów tego niedopasowania, na przykład:

- przestrzenne niedopasowanie granic spowodowane charakterem rozpowszechnienia i zalegania skał krasowiejących;
- przestrzenne niedopasowanie granic spowodowane funkcjonalnymi osobliwościami naziemnej i podziemnej części geokompleksu (obiektu, obszaru) krasowego.

Szczególnie ostro problem ten występuje na obszarach górskich, gdzie rozprzestrzenienie skał krasowiejących może mieć sporadyczny (przerwany, wyspowy) charakter, uzależniony od struktury tektonicznej obszaru. W górach serie skał krasowiejących są również pofałdowane, odsłaniają się w postaci monoklinalnych grzbietów i kuest, „wyrastających” spod serii niekrasowych, co też sprzyja zróżnicowaniu krasowienia pod ziemią i na powierzchni. Rys. 14 obrazuje kilka uwarunko-



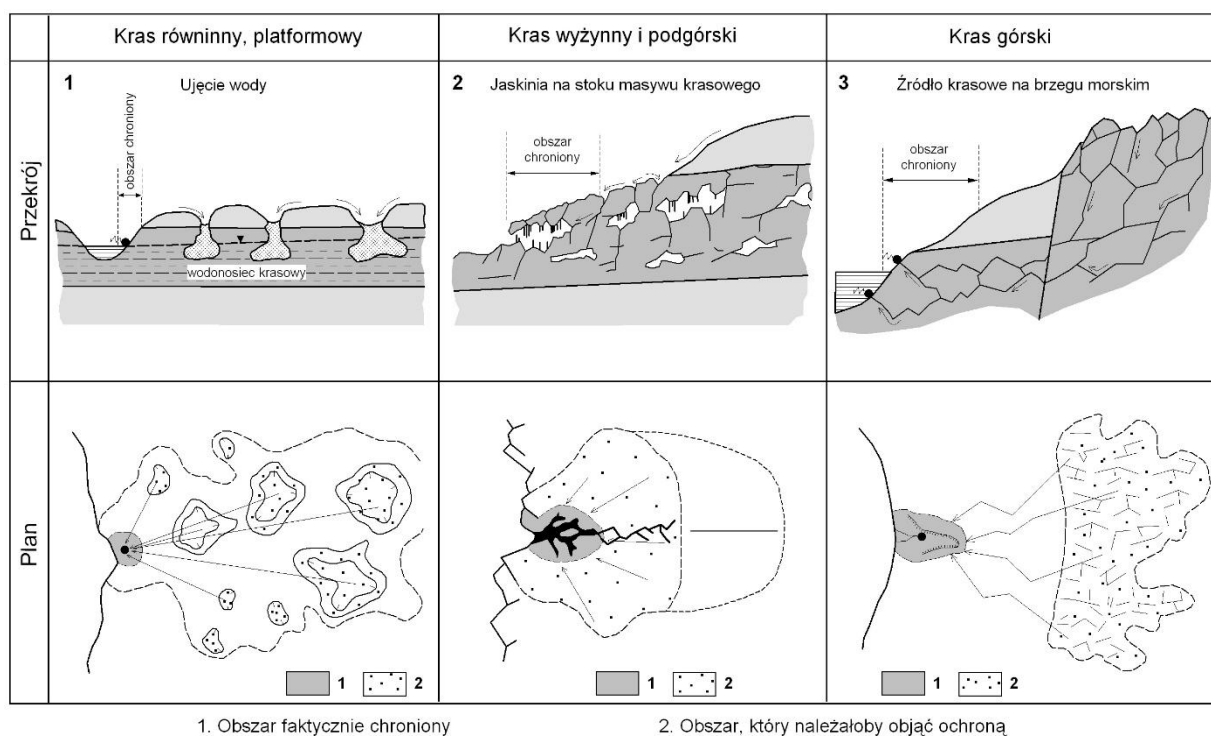
Rys. 14. Przykłady tektonicznego oraz erozyjnego uwarunkowania niezgodności granic powierzchniowego i podziemnego podsystemu krajobrazu krasowego:
1 – skały krasowiejące, 2-3 – utwory niekrasowiejące

wanych tektonicznie sytuacji niedopasowania pionowych granic podsystemu naziemnego i podziemnego. Dopasowanie granic z kolei częściej ma miejsce w krasie równinnym (platformowym), o horyzontalnym zaleganiu serii skał krasowiejących. W takich warunkach geosystemowym ogranicznikiem często są uskoki, tworzące naturalne granice obszarów krasowych i ich funkcjonalnie sprzężonych części (rys. 14 A-1). Dopasowanie ma również miejsce w przypadku geologicznego odizolowania ciał krasowiejących, na przykład, dużych masywów rafowych lub kopuł solnych (rys. 14 A-2). W krasie równinnym na sytuację wpływać też może charakter (stopień) erozyjnego otwarcia serii skał krasowiejących. W miejscach o dużej pokrywie nieprzepuszczalnych osadów niekrasowych podziemny podsystem krajobrazu może być pozbawiony

procesualnej aktywności pionowej – bezpośredniej interakcji z podsystemem naziemnym (rys. 14 B).

W aspekcie funkcjonalnym chodzi przede wszystkim o często występujące niedopasowanie hydrologicznych granic powierzchniowych i podziemnych zlewni paradydynamicznych składowych KK. Problem ten regularnie występuje w obszarach górskich.

Nieuwzględnienie specyficznej natury KK oraz wspomniane trudności w określeniu właściwych granic geosystemów krasowych stanowią ważną przyczynę nieadekwatnej lub nieskutecznej ochrony obiektów krasowych. Na rys. 15 przedstawiono kilka wręcz banalnych, lecz realnie występujących sytuacji – przykładów, w których popełniono błędy przy określeniu granic czy stref ochrony obiektów krasowych, co negatywnie odbija się na skuteczności tej ochrony.



Rys. 15. Wybrane przykłady chronionych obiektów i obszarów krasowych ukazujące ich niewłaściwe wyodrębnienie na tle systemu krajobrazowo-krasowego:

1 – faktycznie chroniony obszar, 2 – obszar, który należałoby wziąć pod ochronę.

Przypadek 1 nawiązuje do warunków równinnego zakrytego krasu z dobrze rozwiniętym wodonoścem krasowym. Wody krasowe są wykorzystywane gospodarczo, m.in. do celów pitnych. Ochroną objęty został fragment powierzchni bezpośrednio nawiązujący do ujęcia wodnego. Natomiast powierzchniowe formy krasowe (leje i depresje) na otaczającym obszarze – w promieniu kilku km od ujęcia – zasilające wodonoścę poprzez odprowadzanie z powierzchni wód opadowych i gruntowych, nie są chronione w żaden sposób. Niektóre zaś formy, jak ustalono w trakcie badań, służą mieszkańcom sąsiadującym z ujęciem wiosek za wygodne (bo wszystko w nich znikła) wysypiska śmieci, a nawet miejsca utylizacji zwłok zwierząt domowych. Uwzględniając krasową specyfikę tego obszaru, status reglamentowanej ochrony należałoby poszerzyć o znacznie większą powierzchnię, z wprowadzeniem zakazu zrzucania do form krasowych śmieci i zanieczyszczeń, poprzez ich odrozdzenie itp.

Przypadek 2. jest również dość typowy. Dotyczy chronionych jaskiń, w tym jaskiń turystycznych. Ochrona zwykle automatycznie jest rozszerzana na część powierzchni masywu krasowego, stanowiącą bezpośrednią projekcję systemu jaskiniowego. Natomiast obszary na powierzchni – poza granicami systemu jaskiniowego – dynamicznie (hydrodynamicznie, aerodynamicznie) sprzężone z nim przez leje krasowe, ponory, szczeliny czy inne otwory jaskiniowe, nie są chronione. W tego typu przypadkach chroniony powinien być obszar powierzchniowy o zdecydowanie większej powierzchni. Jego wielkość i kształt (ten ostatni może mieć bardzo nieregularny i złożony charakter) ustala się na podstawie przeprowadzonych systemowo ukierunkowanych badań.

Przypadek 3 dotyczy obszarów nadmorskich, gdzie w strefie przybrzeżnej mamy do czynienia z wypływem źródłanym wód kra-

sowych, których strefa zasilania jest położona w górujących nad wybrzeżem masywach górskich (typowe dla obszarów śródziemnomorskich, dla Krymu, Kaukazu, Turcji itp.). Nadmorskie źródła krasowe są często bardzo widowiskowe, robią wrażenie swoją wielkością (wypływające rzeki), kolorem wody (turkusowy, zielonkawy), sposobem wydostawania na powierzchnię (wirujące kotły, wodospady) itp., i ze względu na atrakcyjność lub walory użytkowe są często chronione, ale z reguły chroni się strefę bezpośrednio przylegającą do źródła. Natomiast obszar jego zasilania (górski płaskowyż krasowy i in.), który co prawda może być położony kilka-kilkanaście i więcej kilometrów dalej (w górach), chroniony już nie jest. Ta sytuacja jednak nie jest tak powszechna jak poprzednie, ponieważ zwykle nadmorskie masywy krasowe i plateau są również chronione jako tereny rekreacyjne, parki krajobrazowe, rezerваты przyrody itd., co w sumie, przynajmniej częściowo, rozwiązuje problem. Za bardzo niekorzystne w takim przypadku uznać można byłoby wycięcie lasów na powierzchni masywów (co miało miejsce w przeszłości). Pewne zagrożenie dla czystości (jakości) wód źródłanych stanowić mogą zanieczyszczenia jaskiń, towarzyszące wyprawom speleologicznym (np. karbidem, stosowanym wcześniej przez speleologów w celu oświetlenia jaskiń podczas ich eksploracji).

Reasumując, ochrona obszarów i obiektów krasowych uwzględniać powinna ich naturalną (krasową) specyfikę oraz osobliwości strukturalno-funkcjonalne. W realizowaniu projektów ochrony przyrody szczególne znaczenie ma pierwszy etap – projektowanie chronionego geokompleksu (geosystemu) krasowego. Na tym właśnie etapie można zapobiec poważnym problemom, związanym z przyszłą ochroną czy reglamentowanym wykorzystaniem gospodarczym chronionego obiektu lub obszaru.

PREFACE

Karst areas (landscapes) are of a very specific nature (GWOZDETSKIY, 1954, 1972, 1977, 1988; SWEETENG, 1972; JAKUCS, 1977; WHITE, 1988; ЦВИЈИЋ, 1991; SALOMON, 2000; SALOMON, PULINA, 2005; ANDREYCHOUK, 2007; FORD, WILLIAMS, 2007 and many others). They have distinctive relief representing a distinct genetic type, a particular water regime and hydrographic network (or lack thereof), specific types of soils (e.g. *terra rosa*), ecosystems of a different composition of flora and fauna species as well as some particular morphological and physiological characteristics in organisms that are adapted to specific (karstic, cave) environmental conditions.

It is well known that this distinctiveness is associated with a particular process that occurs in the earth's crust and on the surface – dissolving certain types of rocks susceptible to dissolution (so-called karst rocks) by circulating water. This process is essentially of a hydrological (hydrogeological) nature as it relates to the impact of water on the rocks and takes place mainly underground. As the hydrological "maturation" of the karst rock massif proceeds, the dissolution is transformed under certain conditions into *the karst process* which in turn "brings to life" a number of other derivative processes (erosion, sinkhole formation, landslides, etc.), so becoming a *system of processes*. Acting together under and on the earth surface these processes shape the relief, and thus the whole landscape, the components of which, both abiotic (rocks, water, air) and

biotic (plants, animals), or anthropic (man), by adjusting to each other create a specific and complex environmental system – the karst landscape (KL).

This system (karst geosystem) is characterized by a specific *organization* resulting from the evolution of the process itself, which consists in *self-organisation* (gradual development of the network of channels, formation of underground cavities, etc.). The evolutionary self-organization results in developing a specific *spatial and functional structure* in the karst system (connections and interactions between elements), which is the essence of the organization in the mature stages of development.

In the author's view the specificity of the karst landscape can be depicted and explained in the most thorough way ("from the inside"), using a *general systems paradigm*. It recognizes KL as a complex natural system of a characteristic composition of its elements, their specific spatial arrangement (structure), and the way they interact (function) (ANDREYCHOUK, 2009). Analysing this aspect is the main objective of this study.

The first part of the study provides definitions of the basic concepts and shows formation of the karst landscape against the background of the evolution of the karst system as a whole, recognised in terms of synergetics (self-organization). The second part evaluates the structure of the system and the functional-dynamic and developmental peculiarities of KL determined by the structure. The third and final part aspects of the application of the system understanding of the karst landscape.

DEFINITIONS AND METHODOLOGY

Karst

The term "karst" usually refers to the complex of specific processes, phenomena and forms which occur within areas composed of karst rocks. Karst results from the long-term impact of atmospheric, surface and underground water circulating through the rocks. This concept integrates several aspects in a genetic sequence: process → phenomenological → morphological, which hold a specific territory in common.

In the *process (geodynamic)* sense, karst is a *system of processes*, among which the leading role, as if of the "conductor" of "the entire geodynamic orchestra", is the chemical process of rock dissolution in the water circulation cycle within the subsurface zone of the lithosphere²¹. The dissolution process is the "driving force" behind the development of the karst system, which in turns induces other geodynamic processes – both denudation (erosion, gravitational processes, including cave-in and landslide), and accumulation (formation of the residue of dissolving rocks, filling underground cavities with deposits and mineral formations, etc.).

In the *phenomenological* sense, karst processes are associated with various characteristic *phenomena* that are often not found outside of karst areas (disappearance of surface rivers underground, large outflows of groundwater, surface collapse, etc.).

In the *geomorphologic* sense, karst processes create numerous specific *forms* of relief underground (caverns, cavities, channels, caves, cave systems) and on the surface (karren, dolines, depressions, karst valleys, karst towers, etc.).

Karst is an evolutionary product of specific environmental conditions and simultaneously a creator of a specific natural environment. In the first case we are dealing with a whole range of factors (geological, hydrogeological, geomorphological, climatic, biotic, etc.) involved in the process of karst development; in the second case, - with a number of consequences of its impact on the geological substrate, surface and underground water, soil, etc., that are the components of the landscape. The rein lays multifaceted nature of karst and consequently the fact that representatives of particular disciplines in the Earth sciences place emphasis on different features of karst definitions.

Geologists regard karst as, above all, types of rocks (of massifs and formations) which undergo specific metamorphoses due to the dissolving effect of water circulating in the rocks and massifs. They consider it as one of the mechanisms for both formation and the destruction of the rock (karstolithogenesis), including the formation of specific mineral resources (known as *karst deposits*). *Hydrogeologists* pay attention mostly to the specific conditions and peculiarities of water circulation in karst rock massifs (i.e. their regime) and the formation of their resources in so-called *karst collectors*, whereas *geomorphologists* emphasize the distinctive types of relief developing in karst areas. *Geographers*, viewing karst in the most comprehensive and multifaceted way, regard it as a *particular type of natural environment* resulting from the system-integrating impact of karst processes on all elements of the environment – the bedrock, water, relief, organic life, soil, etc. The development of karst results in gradual transforming a *non-karst landscape* into a *karst landscape*, i.e. an area of specific relief, water circulation, micro- and mezoclimatic conditions, flora and fauna, and the conditions of human life.

From these characteristics and others, the science of karst (*karstology*) is composed of a variety of thematic sections, e.g. *karst geology*, *karst hydrology (including karst hydrogeology)*, *karst geomorphology*, *karst geochemistry*, etc.

²¹The upper subsurface zone of the lithosphere within which, due to low temperatures, water exists in a liquid state and circulates in a cycle is sometimes called the hydrolithosphere.

These divisions of karstology constitute component disciplines primarily investigating individual parts of the karst environment. Their methodology consists of mainly analytical methods targeting these different components at deeper and deeper levels of exploration. Due to their individual narrow focus they cannot provide an adequate (holistic) study of the karst landscape as a natural system in its entirety. Comprehensive review and research can be provided only by a comprehensive, systems-focused scientific approach to the problem.

Comprehensive methodology in karst research

A *scientific approach* implies a certain comprehensive vision of reality and a relevant organization of the research process, which means that it is embedded not in the empirical (research aspect) but in the methodological (research methods determined by a certain vision) field of science. The term *approach* has a general scientific status and is universal, as a *comprehensive* or *systemic* approach, the *anthropic principle*, etc. As a rule, the approach is applied to thematic, spatial or historical aspects of the reality to be investigated, which has a relative wholeness, structurality and a complex organization (natural environment, state, community of organisms, Renaissance, landscape, etc.), which requires the researcher to prepare an adequate cognitive structure. Therefore, the application of these or other approaches to research on karst is conditioned by regarding karst comprehensively, as a certain type of *organization*. This may be, for example, *the entire karst as a set of genetically and spatially related processes and phenomena*, *the karst environment* (a concrete karst area together with the human inhabitants), *the karst landscape*, *karst massif*, etc.

What kinds of comprehensive approaches have application to karst studies nowadays? According to the author, in karstology four main approaches are currently used: the karstocentric, environmental, geosystemic and land-

scape-systemic approaches (ANDREYCHOUK, 2010) (Fig. 1).

The karstocentric approach represents a concrete version of the *centric* approach which implies regarding the studied reality (object, phenomenon, process, area) as a certain organization functioning in the conditions of a strict (genetic) dependence upon particular factors (Fig. 1-1). Within a given approach karst is considered as a derivative of the collective impact of a number of factors and environmental conditions, i.e., the presence of karst rocks, water circulating in the massif, rock fracturing, aggressivity of water, drainage conditions, and many other, more specific ones (lithology and structure of karst rocks, amount of rainfall, water temperature, etc.) which affect the course of the karst process or the physiography of the karst area. "Classic" examples of this approach may be found, inter alia, in the Soviet karst literature of the '50–70s' of the last century (the publications of F. Savarenski, D. Sokolov, some works of G. Maximovich, V. Dublyanski, A. Chikishev, R. Tsykin, and many others). The works of these authors dealt with the issues of 'conditions and factors of karst development'²². They discussed a spectrum of karst formation factors, which of the factors are more important (essential, crucial), and which are less important, etc. in relation to the central concept of karst, sometimes regardless of discrepancies in defining karst itself. This approach was manifested in the characteristics of the researches carried out on karst, in the structure of the monograph studies on karst of these or other areas, in the organisation of material in reference books (introductory chapters), etc. This approach also has application nowadays, especially in the case of comprehensive studies on karst in a particular area, as well as in works generalizing on karst.

²² The monograph of Dmitriy Sokolov *Osnovnyye uslovija i faktory razvitija karsta* (Essential conditions and factors of the development of karst), 1962 is the most comprehensive example.

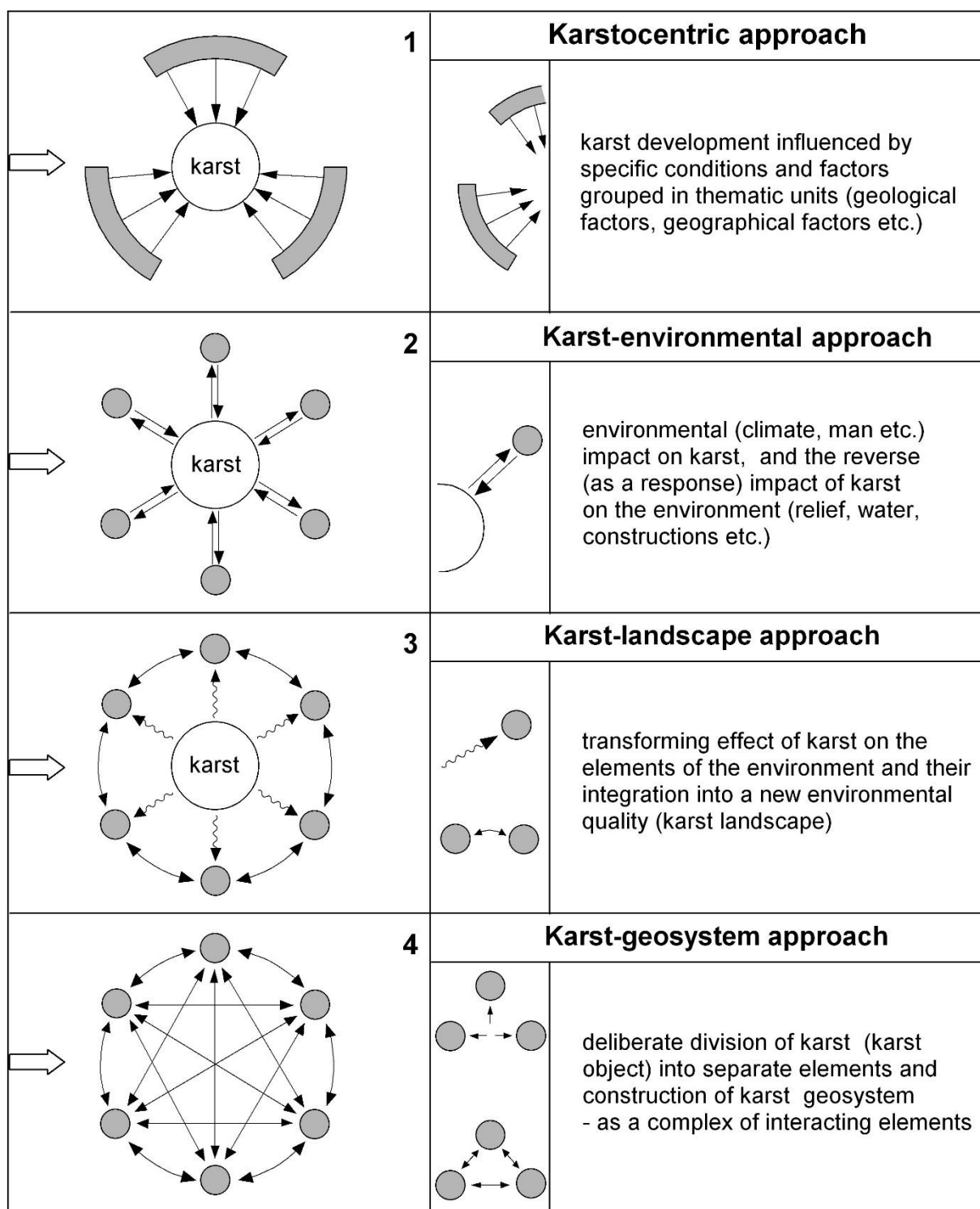


Fig.1. Main comprehensive approaches to the karst study (acc. to: ANDREYCHOUK, 2010)

The **karst-environmental approach** is another version of the centric approach, that is, it implies examining the relationship between the studied object and its surroundings (environment) (Fig. 1-2). This approach is currently employed on a large scale in geoecological studies (*ecological/ecocentric/ecosystemic* approach –

synonyms), in research on the relationship of man and nature (*anthropocentric, anthropic*), etc., i.e. when examining the impact of the environment on the object (nature, man, organism, etc.), and vice versa the impact of the object on the surroundings. This approach has been carried out since the time of J. Cvijić

(ЦВИЈИЋ Ј., 1991) on a large scale in karst studies primarily in terms of geographical research, where karst was considered as the environment of human life, including issues of *karst determinism*. This approach found wide application in the countries of the Mediterranean Basin, where karst issues have always been associated with the issues of water and its exploitation.

The environmental-karst approach (especially its opposite aspect – the impact of the industrial activities on karst) has revived over the past decades due to a growing economic impact of man on the karst environment (*technogenic, activated*, etc., karst) and the concomitant consequences that are sometimes disastrous, as in induced surface collapse, land subsidence, etc.

The karst-landscape approach is the special (karstic) case of the *landscape approach* of the Eastern school that understands landscape, as a particular territorial, process and physiographic part of nature as a whole. The landscape approach suggests considering a given area in terms of its entirety whose physiographic specificity is determined by the particular spectrum of natural processes occurring within its boundaries which shape its appearance (volcanic processes – volcanic landscape, aeolian processes – desert landscape, karst processes – karst landscape, etc.). It has been also implied that the compactness of the internal interconnections of the components (bed-rock, water, soil, climate, biota and others) in the landscape understood in such a way (Fig. 1-3), due to its characteristic processes is greater than of the external relations of the landscape which is manifested, inter alia, in the specific physiognomy of the landscape area. It is also believed that the formation of a given genetic type of landscape is generally determined by the so-called “leading process or condition”, which integrates and subordinates the activities of other processes, directs the development of landscape and determines its peculiarities. The role of such a condition or process may be played by climate (formation

of polar, desert, etc. landscapes), tectonics (landscapes of rift valleys), erosion and landslide processes, etc. The presence of karst rocks and karst which over the course of development gradually subordinates other processes and more and more considerably transforms the landscape to forming a specific (petrogenic, lithogenic) karst landscape can constitute such a leading or growth influencing factor.

The landscape-karst approach, as described above, is represented mostly in the works of researchers of the Eastern school of landscape science. These are the works of N. GVOZDETSKYI (1972, 1979), A. CHIKISHEV (1982), L. VOROPAI, V. ANDREYCHOUK, (1985), V. ANDREYCHOUK, M. PROSKURNYAK (1993), V. ANDREYCHOUK, L. VOROPAI (1993), M. PROSKURNYAK, V. ANDREYCHOUK (1998, 1999), V. ANDREYCHOUK (2007) and a number of other papers. This approach seems to be very useful to elucidate the evolution of karst areas (formation of the landscape), and explain the specifics of their natural environment. It is also advantageous when dealing with the issue of land use within karst areas and their protection.

The karst-geosystem approach is a special case of the *systems approach*, which favours considering the object (phenomenon, area) as a system, an appropriate organization of the research process (algorithm research), and often also the application of appropriate numerical methods (system analysis, graph theory, and others) (Fig. 1-4). In the systemic approach the object is presented as a set of elements and relationships between them (structure), and the study itself focuses primarily on the issues of interactions between the elements, because it is just the interactions between the elements that determine the overall (emergent, system-derivatives) properties of the system.

System studies (as well as the entire system methodology) have been finding wider and wider application for several decades in all fields of modern science, including the natural sciences: biology, ecology, and to a lesser degree, geology and geography. Despite many other merits of a cognitive nature, the

systemic approach is advantageous also because it allows fairly easy formalisation of the studied object (functional connections of its elements), which paves the way for a wide application of numerical methods and modelling. The systemic approach enables the most complete and appropriate examination of the object, since its application reveals not only the properties of the object, derived from the properties of its components (elements), but also properties induced by the interactions of the elements (structure-derivative properties, i.e. comprehensive, systemic). The latter are particularly vital when planning certain activities in the environment, in the landscape, as they allow for detection of trends in development and for forecasting changes. Therefore, general system visions and environmental studies are most forward-looking and effective methodology nowadays.

Unfortunately, the systemic approach has not found wide enough application in karst studies. This is due to, on the one hand, quite a narrow range of karst research compared with the overall natural studies, on the other hand, the lack of clearly formulated systemic concepts of karst (karst system visions). Speleological research into water circulation in karst massifs (karst systems performing the cycle: supply – transit – outflow) is an exception here. It establishes hydrological and other relationships between the objects (caves, springs) and areas, first of all. In the case of monitoring the flow of water, a “black box” or “gray box” testing situation takes place when the interior of the massif is inaccessible or only partly accessible: the internal structure of the karst system and the processes occurring within it are deduced based on the measured “input” and “output” parameters. In the situation when it is possible to follow the water circulation in the karst massif by cave exploration examining the links of the karst system inside from the input to the output, “white box” testing takes place.

The systemic approach may have a number of different “methodological configura-

tions”, and variety of *research models* may be created by this approach. However, studying and presenting the material *as a system* remains invariant. This approach is no doubt very forward-looking in karst studies as caves, karst aquifer systems and areas (karst massifs, landscapes) are distinguished by the complexity of their structure and the large variety of processes occurring within them. The systemic approach is known for constituting a conceptual tool to study complex objects and phenomena of reality.

Of course, these examples of comprehensive, as contrasted with partial, analytical, thematic, approaches to the research of karst are largely provisional. Their “methodological weight” is not equal, and they do not exclude other potential approaches. Nevertheless, in the author’s opinion they allow determination of the “coordinates” for comprehensive scientific study of karst, revealing the systemic nature and specific organization of the karst landscape.

Landscape

The literature contains many approaches and countless definitions of the *landscape* as such. In geography it is hard to find a term that is more ambiguous. The mere listing of the definitions would take many pages. In order to sort out the problem, geographers distinguish different trends and approaches to defining this concept, which is by nature a multifaceted and almost inexhaustible concept. In such a situation, the only solution for the landscape researcher is to set out at the very beginning, his understanding of the concept, and to determine the meaning assigned to it.

By generalizing and simplifying the issue, it can be suggested that there is a difference in perceiving and defining the landscape between researchers from Eastern Europe (the countries of the former USSR) and geographers from Western Europe. In the East, in the first half of the 20th century this concept underwent many “mutations” in relation to its original meaning as “the area appearan-

ce", "face of region", "area type", etc. The changes consisted in imputing more and more genetic sense to this concept – genetic types of landscape, factors of landscape formation, hierarchy and classification of landscape units, etc. From the primarily physiognomic term (*form*), the landscape transformed into rather a genetic one (*content*). Also its "geometry" changed, from an undulating 2D "surface" landscape became converted into a 3D volumetric "body". Over time, a particular organization was recognized within the "body", which consequently became a holistic formation – geocomplex, geosystem, etc., explored with appropriate methods known as the comprehensive geography methods. Most of the researchers in Eastern Europe still understand landscape in this way.

In Western Europe and in North America the term also has been given various meanings, however always within the realm of a certain invariant physiognomy. The landscape was not treated too specifically and rigorously by Western researchers. Questions of its origin were primarily dealt with in the context of the surface and its characteristics, i.e. morphology (geomorphology) and filling in the space (shape, picture, types of terrains, covering of the areas, their land management and arrangement, including aesthetic, etc.). It should be noted that in the two last decades there has been observed a trend towards integration and interweaving of more rigorous Eastern (genetic, geocomplex, etc.) with a more flexible Western understanding of the landscape (physiognomical, morphological etc.).

In this study, the author will use the Eastern approach – a more "volumetric", genetic and comprehensive. Such an understanding of the landscape – as an entire natural system, facilitates plenty of opportunity to apply a holistic approach and reveal the complex nature of karst landscape and its organization. The formulations given below may serve as a starting point.

The landscape is a natural²³, territorially compact and functionally integrated system consisting of spatially related elements interacting with each other – bedrock, relief, surface water and underground water, climate, flora, fauna and soil. Being a formation structurally and functionally complete, the landscape is characterized by emergent properties which manifest in its dynamics (self-regulatory capacity) and evolution (self-development processes). The landscape is characterized by a particular physiognomy of space (image view, *paysage*), which is denoted on a map in the form of a specific drawing-pattern. Within the greater landscape there are smaller, hierarchically organized and regularly arranged characteristic territorial units which make up an individual landscape composition (mosaic, pattern).

The landscape is therefore a formation of known territorial dimensions, usually from a few hundred to a few thousand km² with a characteristic and complex internal structure. In addition it constitutes an organic part of larger territorial formations (physical-geographic units of greater size – regional, etc.). Territorial dimensions (boundaries) of the landscape system correspond to the area within which the landscape retains its physiognomic characteristics. Typical features of landscape result from the homogeneity of the geological structure, characteristic forms of relief and how they are arranged in relation to each other, hydrographic network, vegetation cover, and characteristic processes occurring within the landscape (geomorphological, in particular). Each landscape is characterised by an individual "barcode" of forces and processes shaping it.

Karst in terms of synergetics

As previously mentioned, the existing definitions of karst usually refer to one of three

²³Nature-anthropogenic in the case of *the culture landscape*.

aspects: process (karst as a mono- or complex process), phenomenological (karst as a *phenomenon* or set of specific events) and geomorphological (territorial: karst as an *area* or *relief* with a characteristic set of characteristics). Just as in the case of the concept of landscape, there are certain differences in the approach to defining karst by Eastern European karstologists and Western European and American karstologists. Typical for the Soviet school understanding of karst as a process or phenomenon, or the unity of the process and the phenomenon (including forms) – placed emphasis upon the process aspect. In Western literature perceiving karst as an area with specific forms and hydrology is dominant, and the territorial-phenomenological aspect, etymologically closer to the source term (Kras/Karst Upland), is accentuated.

A. KLIMCHOUK and V. ANDREYCHOUK in their article “About the essence of karst” (2010) propose yet another – a systemic approach to the definition of karst, based on the ideas of synergetics and unbalanced thermodynamics of I. Prigogine, concerning self-organization in systems and formation of dissipative structures. Karst is being examined from the angle of self-development of permeability structures in karst rocks in the course of interaction between water and rock (aquifer and massif, etc.). The essence of the development and evolution of karst is the staged self-organization of permeability structures (channel networks), manifesting itself in the initiation, concentrating and integrating of underground drainage, and the intensification of the water cycle in karst massif. Karst is defined as a “*water-circulation geosystem within a certain part of the hydrolithosphere, whose formation and progressive evolution are characterized by self-organization of permeability structure together with formation of integrated systems of channels owing to the impact of a specific speleogenetic mechanism based*

on the positive feedback between water circulation and dissolution’.²⁴

By definition, karst is a progressive evolution of a geosystem with a permeable, rock vulnerable to dissolution, triggered by water circulation and speleogenetic mechanisms of self-organization of permeability. *Progressive evolution* is understood as a process of formation and development of new dissipative structures (increase of structural complexity of the system), whereas *regressive evolution* – as a process of their destruction and collapse (reduction of structural complexity). During the cycle of karst (karst megasystem)²⁵ development the progressive evolutionary trend over time gives way to the regressive one, but this process of formation (integration) and degradation (disintegration) of structures is stretched over time, overlapping and complex.

The geosystemic, evolutionary-synergetic approach provides an excellent conceptual theoretical basis for understanding the nature of karst, its position in the evolution of the karst megasystem, and creating a *systemic (geosystemic) concept of the karst landscape*.

²⁴ The principles of this approach were previously implicitly employed to define karst by P. HUNTOON (1995), A. KLIMCHOUK and D. FORD (2000) and A. KLIMCHOUK 2010a). The same principles constituted the basis for the fundamental monograph *Speleogenesis: Evolution of Karst Aquifers*. - Huntsville: National Speleological Society, 2000.

²⁵ The term of *karst megasystem* refers to a karst area within which so-called “karst cycle” is realised: the appearing, developing and evolutionary disappearing of karst. Karst is understood as a complex karst geosystem of the entire territory, which functions and develops in accordance with principles of synergetics, passing through the successive phases of development (forming and increasing complexity of the structures) and degradation (disintegration of the structures and reduction of complexity) of the system. It is a provisional, sketchy term introduced in order to facilitate conveying specialist ideas, and as such does not pretend to be conferred a status of a scientific term.

Karst landscape as a stage of self-organization in the karst megasystem

The synergetic-development model of a natural system assumes that during its development the system passes through development stages of known characteristics which are accompanied by a gradual increase in its inner structural complexity. The process of the structure becoming more and more complicated ensues the occurrence of new developmental factors, radically changing (often accelerating) the development of the system and introducing it into a new structural (energetic) state while simultaneously facilitating conditions (so-called boundary conditions) for preserving (consolidating) this state. In synergetics the moment of the emergence of the “revolutionary” factor in the system development is called “the bifurcation point”. Bifurcation points determine boundaries of qualitative states (stages) of the development of the system.

The gradual – from bifurcation to bifurcation – qualitative increase in the structural complexity of the system is the core of progressive evolution. However this growth has its time, spatial and structural constraints, dependent on the size and type of system and evolutionary factors. In the course of the development of the system up to the developmental climax, new elements and factors appear (multiply) and together with them relationships²⁶ between them. Among them, however, negative feedback processes become increasingly important, limiting the development of the system and leading to gradual degradation, i.e. reduction in its structural complexity. This is the essence of regressive evolution of the sy-

stem, which results in its “death” as a well organized system.

How does this general developmental model describe karst and the karst landscape? In the development of the karst megasystem²⁷ several phases (mega-phases) can be identified and separated from each other by critical events (bifurcations). This is depicted in Fig. 2, drawn by author upon the basis of the above mentioned article of A. KLIMCHOUK and V. ANDREYCHOUK (2010).

The first phase is the stage of *pre-karst* (or *early speleogenesis*). At this stage the karst megasystem has not yet developed karstic quality as such. This is an “embryonic” stage within which the initial permeability structures (fractures and pores) undergo a process of hydrodynamic “maturing”. This maturing consists of the impact of water present in pores and fissures on the rock substrate susceptible to dissolution, which results in very slow, (lasting tens of thousands or more years, but continuous widening of the fissures, formation of proto-channels together with their gradual hydrodynamic integration into initial networks. The driving force and the main mechanism for the development of proto-channels is positive feedback between the rate of development and the increase of flow. At this stage chemically aggressive water and karst rock are the main elements of the system (not yet karstic) and dissolution is the main process (Fig. 2).

The critical moment in the evolution of proto-channels, called “the breakthrough moment”, signalises such a degree of their opening that rapid kinetic dissolution occurs along their entire length. After that, water

²⁶ As the number of elements in the system increases in arithmetical progression, the number of connections between the elements of the system increases exponentially.

²⁷ In this work the karst megasystem in the spatial aspect refers to ‘a volumetric rock body’ being a part of the hydrolithosphere built from rocks susceptible to dissolution, wherein, in favourable conditions, karst may develop as a system of a specific water circulation within this body. The projected onto the surface or geologically exposed the upper fragment of the body constitutes a potential or real surface area of the occurrence of karst.

flowing through the entire proto-channel remains unsaturated, which radically changes

the dynamics of its growth (acceleration) and of other variables.

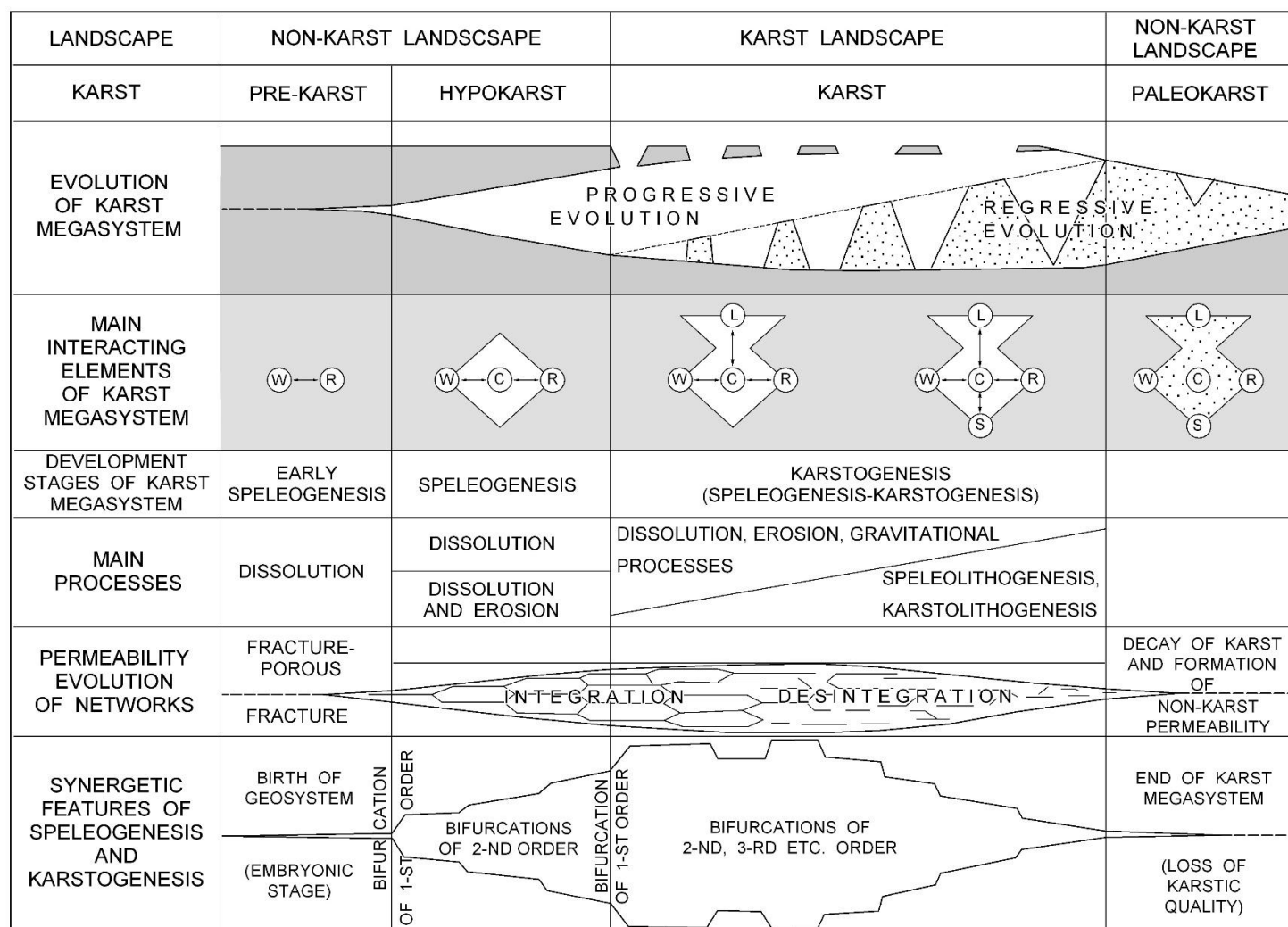


Fig. 2. The conceptual integral diagram of the development of the karst megasystem (wg: KLIMCHOUK, ANDREYCHOUK, 2010):

W – water, R – rock, C – cavity, L – landscape – outside environment, S – sediments

The rate of growth and water flow increases by several orders, while pressure in the growing channel decreases causing conversion of boundary conditions and activation of integration process (merging of proto-channels into networks). Proto-channels transform into channels, which means “the birth” of a new systemic behavior – karstic. The evolutionary breakthrough point constitutes the first (of first rank) bifurcation in the development of the karst megasystem, and the moment of the birth of karst (KLIMCHOUK, ANDREYCHOUK, 2010).

The rapid development of karst channels, diversification of development mechanisms (for example, the appearance of turbulent water flow in some parts of the system, and hence possible mechanical erosion) leads to integration of the channels, increase of their size, i.e. to the formation of simple karst systems – channels and cavities. At this stage a new element – an underground cavity i.e. an empty space “enters the game” and becomes an important (if not the most important) factor in the development (symbol c in Fig. 2). This component becomes not only an inter-

mediary between water and rock interacting with each other, but also both the result of their interaction (increased volume) and the cause of the further development of the system (acceleration as a consequence of the positive feedback between the volume – the total surface of the contact of water and rocks, and movement). At this stage we are dealing with *speleogenesis* (the development of channels and cavities) taking place underground, at a certain depth, in isolation from the Earth's surface, therefore this early phase in karst development (or karst state) can be provisionally called *hypokarstic*²⁸.

During the development of the karst system (the increase of complexity in its structure) different types of bifurcations occur, affecting its development in one way or another (e.g., change in the pressure conditions of water movement by the conditions of free water flow), but not changing fundamentally its trend (second order' bifurcations). A new – *an actual karstic* stage in the development of the megasystem begins at the moment of the system's opening up to the outside (connections with the surface) (Fig. 2).

This is the second fundamental developmental bifurcation after which the "life" of the system is getting very complicated. This opening, which means exposure to multiple and aggressive factors in the external environment, causes major changes in the system's structure and functioning. It is illustrated in the figure 2 by attaching an element-factor L to the model of the system.

The impact of external factors on the one hand, progressively complicates the structure of the system (e.g., as a result of capturing the surface runoff, increasing the volume of under-

ground cavities), on the other hand, initiates formation of processes and feedbacks hindering progressive development (such as collapse of the cave ceiling and formation of sinkholes, filling the corridors and cavities with flowstones, etc.), that is, has characteristics of the regressive phenomenon of evolution – degradation of permeability structures and the structure of the entire system (Fig. 2).

In the context of deliberations in the next paragraphs on the karst landscape, entering this third phase in the megasystem means the "birth" of the karst landscape. It is due to the fact that not only external factors begin to have an impact on the development of permeability structures underground, but also the cavities (which as a result of opening have become caves) and channels start to affect the landscape, transforming it gradually (bifurcations of 2, 3 etc. order) into a new entity – *karst landscape*. The karstic process of the development of permeability structures thus becomes the *relief-forming* factor, and by introducing surface elements into the circulation – water, vegetation, soil, etc. – the *landscape-forming* process.

After having become a part of the external environment, the karst megasystem becomes extremely complicated. The leading mechanism in its development is constituted by multiple interactions between the surface and underground, which integrate it into a very complex natural system with a tiered structure representing a new development state of the karst megasystem. This state or stage can be defined as *karst or karst landscape phase* in the karst megasystem development (Fig. 2), and understood as a whole system consisting of two parts – the underground and surface terrestrial.

At this stage, the development of the karst megasystem is stimulated by numerous processes taking place both on the surface and underground, depending on tens or hundreds of external and internal factors. Between the system elements (components) together with their countless connections, different relation-

²⁸Describing *hypokarst* as a stage of the karst megasystem development is slightly wider beyond the common understanding of hypokarst (underground karst first of all) as a phenomenon generated by water recharging from below independently of seepage from the overlying surface (KLIMCHOUK, 2007, 2010b). In both cases there is a common denominator – the lack of connections with the surface.

ships are formed which operate in favour of its development either progressive or regressive or sometimes both. An abundance of connections (interactions) justifies a large quantity of different types of bifurcations of low orders which determine development of individual links of the entire system.

The capture of the surface water stream by a ponor, formation of sinkhole and its drainage area, fill of the vadose channel with flowstones, descent of an underground stream into a lower level – these are examples of bifurcations of the second or third order.

Many of bifurcations, especially those related to capturing the surface flow, lead to an increase in the internal structural differentiation of the system while others, especially those associated with the gravitation processes and filling channels and cavities with sediments, results in its destruction (destructuring)²⁹. Over time, these “destructive” bifurcations grow in number causing “withering away” of functional links between individual spatial elements of the system and thus leading to its degradation. Interestingly, the degradation of permeability structures in the karstifying geological substrate (rock series, karst massif, etc.) means active development (progressive evolution) in the geomorphologic subsystem. The development of surface karst relief significantly reflects degradation of underground structures, hence a shift in time in the destruction of the underground and terrestrial parts of the karst landscape at the karstic stage of the karst megasystem development. For example, the fascinating and unique landscapes of the tropical tower karst, considered to be the quintessence of karst relief, are just the creation of degraded underground circu-

lation. Further destruction of the karst megasystem, i.e. its last “bastion” – the surface karst relief, is brought about by external environmental factors. The destruction (planation) of the last elements of karst relief (as long as karst has not “moved” to lower levels – into the depths) is followed by the extinction of the karst megasystem, i.e. the of loss of karstic quality in the landscape.

It should be noted that the transition of karst or the karst landscape into a new non-karst (or paleokarst: see below) quality, which is its final degradation, is of a temporary nature, evolutionary (not acute). Between these karst states (stages) there is no clear boundary, and there is no fundamental (of the first rate) bifurcation behind it, as it is the case at other stages. Bifurcations as such, are an indispensable element of progressive evolution, and their role (of the first-, second-, third rate) is greater in the initial stages of the system development, when there are still not too many elements and links affecting each other. Over time, as the complexity of the system grows, the number of bifurcations there increases, and their role in the development of the system decreases proportionally. At a certain stage (in our case – a mature karst landscape), along with a rapid increase in the number of bifurcations, there is observed spatial dispersion (location) of bifurcations over the links of the megasystem and consequent reduction of their factorial status in relation to the entire system.

Karst stage (karst or the karst landscape – Fig. 2) is not a mandatory step in the development of the karst megasystem. Owing to the change in the character (sign) of tectonic movements – from the positive (uplifts) to negative (down), the second bifurcation, i.e. opening of channels and cavities may not occur. Then the karst system, having been filled completely or partially with sediments, evolves towards the paleokarst state (phase) (Fig. 3, scenario A1). However, during the next change in the direction of tectonic movements (uplifts), re-karstification may take place and the me-

²⁹ Development of accumulation processes means appearing in the system structure the next element – sediments (gravitational, aqua-mechanical, chemogenic, biogenic, etc.) (S on Fig. 2). It also means that one more “player” gradually enters the game (development factor), whose importance in the system development (in this case its degradation) will be continuously growing.

gasystem may achieve the state of the karst landscape (Fig. 3 A2 scenario).

The characteristic of tectonic movements determines also the further evolution of the “completed” megasystem, i.e. the system which passed through the stage of karst landscape during its evolution (Fig. 3-B). When there is lowering, karst remnants may be buried under layers of continental or ma-

rine sediments (scenario B1), whereas the occurrence of uplift movements may lead to the total destruction of the relics of the “extinct” karst system and consequently to its disappearance from the geological cross-section (scenario B2). Nevertheless, the evolutionary reality is much more complicated and presented scenarios represent only a few selected and simplified examples.

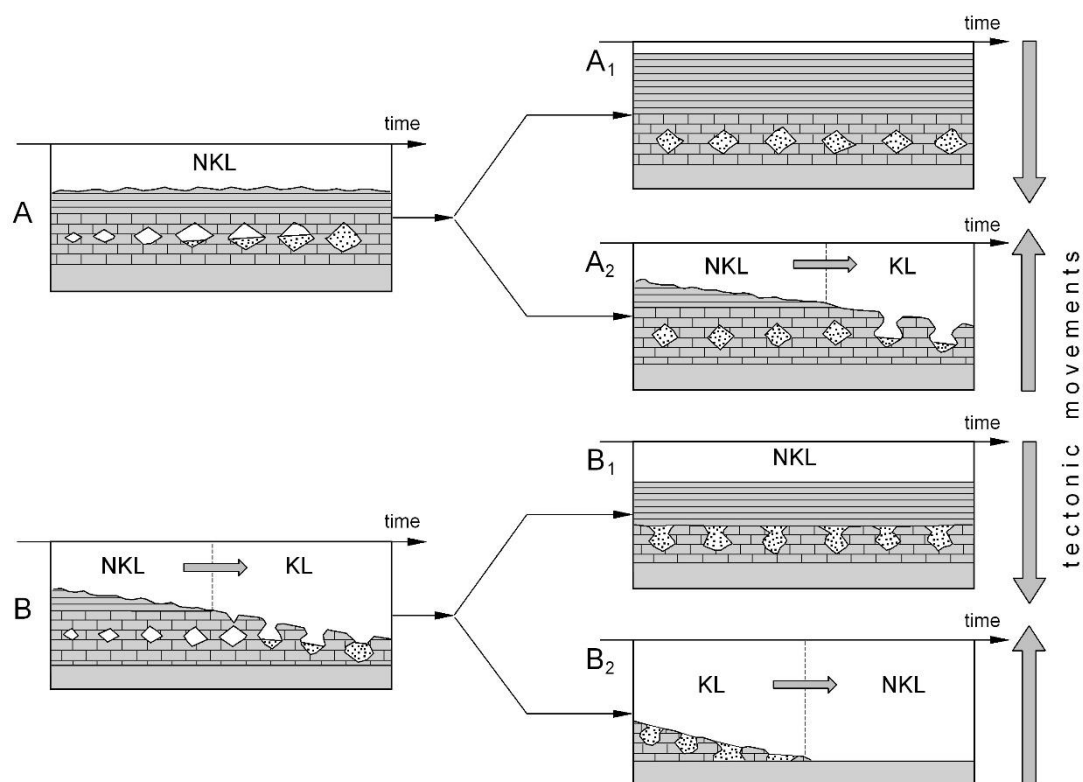


Fig. 3. Some potential scenarios of the karst megasystem evolution depending on tectonic movements (KL – karst landscape, NKL – non-karst landscape)

Further deliberations on the essence of the karst landscape, will be focused exclusively on scenario B, and we will try to examine

the karst megasystem in its culminating evolutionary state – the karst landscape – in terms of its “anatomy”.

KARST LANDSCAPE AS A SYSTEM

As shown above, it is at the karst (karst landscape) stage, in its broad sense, i.e. when the karst megasystem because of the significant role of external factors becomes a binary system comprising both subterranean (geological environment) and surficial (geographical environment) elements which integrate into the karst landscape. The dynamic-developmental accent of the entire megasystem is on the plane of interactions between the parts of the binary karst system. Let us focus on the internal aspects of this system – structural, functional and developmental. The karst landscape will be referred to as a genetic unity of two of its parts (geosystem), highlighting its peculiarities compared to the non-karst landscape.

In this paragraph also the systemic accent will be shifted from one system object (the evolutionary karst megasystem) onto another one (the karst landscape as a system). The nature of the system approach, which is its considerable advantage, allows such a shift in accent. For every object can be presented and studied as a system and it facilitates its exploration, a better understanding of it and showing its essence. In this case it becomes necessary to consider the object in systemic terms (wholeness, structure, connections, etc.).

The structure of the karst landscape as a system

The karst landscape is characterized by the presence of the phenomenon atypical for the vast majority of other landscapes – large underground channels and cavities including caves³⁰. In the course of the evolution of the karst system, these elements become relatively autonomous natural formations– from the physio-

gnomical and functional point of view, i.e. subterranean geo-complexes (ecosystems, etc.)³¹.

The subterranean part of KL is closely connected with the surficial part. They are two genetically and functionally coupled parts of the unique karst landscape and constitute the most important peculiarity of its structural organization. According to the systemic methodology or terminology, the subterranean and terrane components KL should be considered its main structural subsystems. This coupled functioning of two subsystems (surficial ↔ subterranean) in the karst landscape geosystem determines the most important properties of the whole landscape.

Karst landscapes are distinguished by particular spatial development. Because of the presence of caves, sometimes very deep (1–2 kilometres and more), which facilitate penetration of surface agents (water, oxygen, sediments, organics, microorganisms, etc.) deep into the Earth, the lower boundary of KL drops significantly beneath that of non-karst landscapes, where it is only a few dozen metres from the surface of earth and is generally coincident with the lower limit of the weathering zone. In contrast to “flat” non-karst landscapes, KL are characterized by significant three-dimensional volume.

In the structure of the karst landscape two components may be recognized: a vertical structure (geo-component – in tiers) and horizontal (geo-complex – morphological).

³⁰ Caves are underground cavities, of dimensions accessible to a man, connected with the Earth's surface in a natural (evolutional) or artificial (by man) way.

³¹ Caves are described by some karstologists-geographers as underground landscapes distinguished by their particular topography (morphology), own hydrographic network, specific underground climate (mikro- or mezoclimate) as well a peculiar world of cave organisms (GVOZDETSKIY, 1954; GERGEDAVA, 1973; CHIKISHEV, 1979). Interesting studies concerning the complex nature of the cave world are available in Slovak literature describing caves as underground geo-systems. (JAKAL, 1986; BELLA, 2008).

Vertical structure

Elements of vertical structure – geo-components

The geo-component structure of the non-karst landscape is formed by vertically layered – geo-components: *massive* and *mixed* in accordance with the physical properties (a state of matter and density). Massive geo-components are constituted by *aggregate-homogeneous* material formations (geomasses) such as: rock (hard, i.e. *lithocomponent*), water (liquid, i.e. *hydrocomponent*) and air (gas or *atmocomponent*). *Aggregate-heterogeneous* formations occurring in places where mass-homogeneous components connect and inter-penetrate form mixed (composite) geo-components. They are also called *contact* components (ANDREYCHOUK, WOROPAJ, 1993; ANDREYCHOUK, 2010) such as: soil (*pedocomponent* – at the contact between atmo- and litho-components), bottom sediments of aqueous basins (*bottomcomponent* – on contact between hydro- and litho-components), aquifer horizons (*aquicomponent* – layers of geological cross-section saturated with water), near-surface layers of water in water reservoirs and basins (so-called “active layers or surfaces” – at the contact between atmo- and hydro-components, enriched in oxygen, irradiated with solar radiation, with periodic mixing of water, etc.) and others (Fig. 4 – top). Life, as a distinct type of geomass, that is *biocomponent* occurs (concentrates) in varying degrees and in different forms (animals, plants, micro-organisms, dead organic mass) in each of the geo-components both massive (*abiotic* – rocks, water and air) and mixed (Fig. 4). At the same time contact geo-components are usually much more enriched in biomass (both living and dead) than massive geo-components. It affects the properties of these components – they become *abio-biotic* formations. In the case of active interactions between their inorganic and organic parts, new (integral) quality geomasses

of a very specific nature and properties (e.g., soil) are created.

The vertical geo-component structure of the karst landscape is more complex than that of non-karst landscapes (Fig. 4). The presence of underground cavities makes a vertical structure of KL layered and repetitive. As underground cavities and caves are geo-complexes by their nature, in the case of KL what we deal with is not an ordinary increase of the number of elements (geo-components) in the system but an increase of the number of geo-complexes, i.e. a qualitative change concerning its organisation. This forces introducing into the schema of the vertical system organization of KL yet another – *subsystem hierarchical level* (the level of organization between the component and the system).

The presence of two subsystems – terrigenous (surface, upper) and subterranean (underlying), clearly distinguishes the vertical structure of KL from the vertical structure of the non-karst landscape.

In the lower tier of KL massive (atmo-, hydro, lito and bio-) and mixed (litho-atmo-, hydro-atmo-, litho-hydro-, etc.), geo-components are also present, however in the underground version. The properties of the subterranean geo-components are different from those of the upper tier. And so, the *gas* component (the subterranean atmosphere, cave air, As-u – Fig. 4) usually contains more (a few to a few hundred times) carbon dioxide, methane, hydrogen sulphide, radon and other gases than the surface atmosphere. In the case of the impeded exchange of air with the outside atmosphere, caves, (particularly large and labyrinthine ones), become specific “traps” for gas emanations from the earth interior. The relative humidity of the cave air is often equal to or close to 100%. The morphology of certain caves causes almost a complete lack of air movement, which rarely happens on the surface.

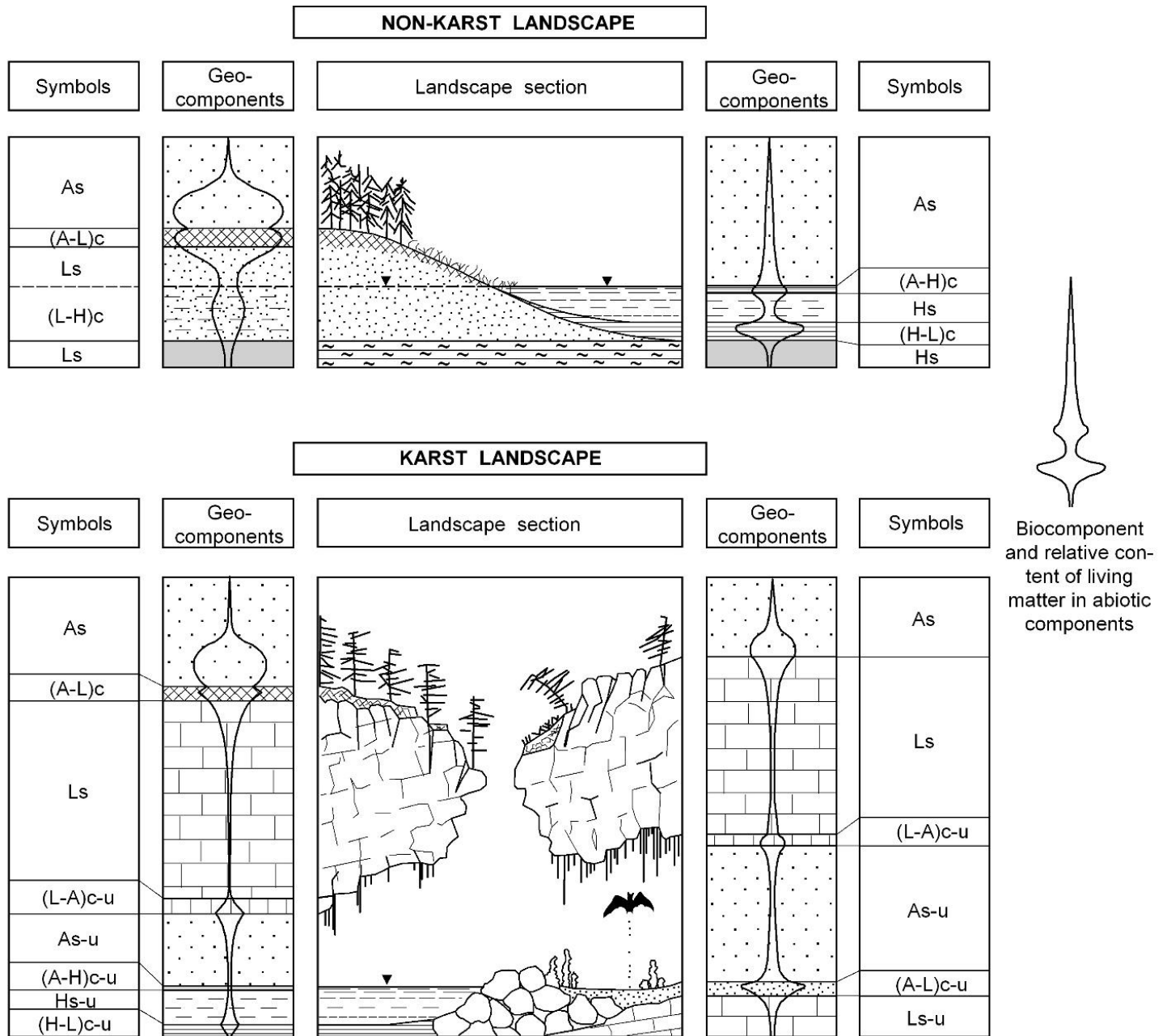


Fig. 4. The principal vertical geocomponent structure of the non-karst and karst landscapes:

Homogenous components: As – atmo-component - substantial (gaseous, massive); Ls – litho-component - substantial (solid, massive); Hs – hydro-component - substantial (liquid, massive); As-u – atmo-component -substantial (gaseous, massive) – subterranean (underground); Hs-u – hydro-component - substantial (liquid, massive) – subterranean (underground); Ls-u – litho-component - substantial (solid, massive) – subterranean (underground); Heterogeneous components: (A-L)c – soil (mixed, contact); (L-H)c – aquifer (mixed, contact); (A-H)c – near-the-surface water strata (“active layer”) of water reservoirs (mixed, contact); (L-A)c-u – the rock of the cave ceiling and walls (mixed, contact); (A-L)c-u – the surface layer of cave sediments (mixed, contact); (A-H)c-u – the near-surface water layer of larger cave lakes (mixed, contact); (H-L)c-u – the bottom sediments of underground reservoirs (mixed, contact);

Subterranean hydrocomponent (Hs-u) is enriched with dissolved mineral substances – due to the longer time of interaction between water and karst rock than in the case of surface waters. In the non-karst landscape TDS content in water with range of 2–3 g/dm³ or more usually occurs at a depth of 1–3 km, far below the lower boundary of the landscape system. In contrast, in the sulphate karst landscape such parameters are characteristic even for superficial water and in the salt karst landscape TDS content in water reaches dozens, or even hundreds, of g/dm³. Karst water of the lower tier of KL is often characterised by a more varied chemical composition and a diverse geochemical environment, including the occurrence of reducing conditions which are extremely rare on the surface.

The *lithocomponent* also has different characteristics underground. Processes of cementation, recrystallization, dolomitisation – de-dolomitisation, metasomatism, hydration, and others change the structure, texture and lithology of rocks significantly, and the occurrence of karst cavities there deform configurations and differentiate the intensity of geophysical fields in karst massifs. Processes of speleolithogenesis cause geochemical redistribution of elements and chemical compounds. Karst rocks containing underground cavities are often filled with lithokarstic inclusions and huge masses of karst breccia, residual material and non-karst rocks of gravitational origin.

The content of biomass (*biocomponent* – Bs-u) in the subterranean subsystem KL is relatively small, especially in comparison with that of the terrestrial non-karst landscape. Quantitative estimates of the biomass in karst caves or cavities are extremely rare in the literature. However, in tropical caves the biomass may be significant, especially in the case of by-products such as guano. In any case, there is incomparably more organic matter in the subterranean tier of KL than in the bedrock (fissures and pores) of the non-karst landscape.

Mixed geo-components (contact) of the subterranean subsystem of KL are yet more specific than massive ones. For example, a weathered rock layer on the walls of a cave or a near-the surface layer of cave sediments are significantly different in composition and properties from the analogous terrigenous formations (e.g. soil). But just as in the terraneous subsystem KL, they are located on the contact of mono-mass components, are characterized by mutual penetration and interaction of substances building them, and formation of particular geochemical barriers (Fig. 5)³². They constitute the environment of the concentration of organic matter (living and dead). Corrosion niches in the cave ceiling are inhabited by bats and often by insects (arachnids, primarily). The rock of the ceiling and walls (*L-A*)c-u is often weathered, more porous, corroded or covered with mineral crusts enriched with chemical compounds, which result from oxidation of minerals and elements contained in the rock, aggressive impact of organic substances and gases, etc. (Photo 1). In this zone, infiltrating water often accumulates chemical deposits, there is also crystallization or recrystallization of minerals and condensation of water.

³² The geochemical barrier means a contact zone (transitional) of various bodies and environments within which takes place a specific deposition of certain chemical elements or compounds migrating through the zone in water solutions. The causes and mechanisms of depositions are determined by changes in temperature, density, permeability, geochemical conditions etc., on the contact of different environments through which water solutions migrate. The concept of geochemical barriers is one of the key concepts of the landscape geochemistry (PERELMAN, 1966).

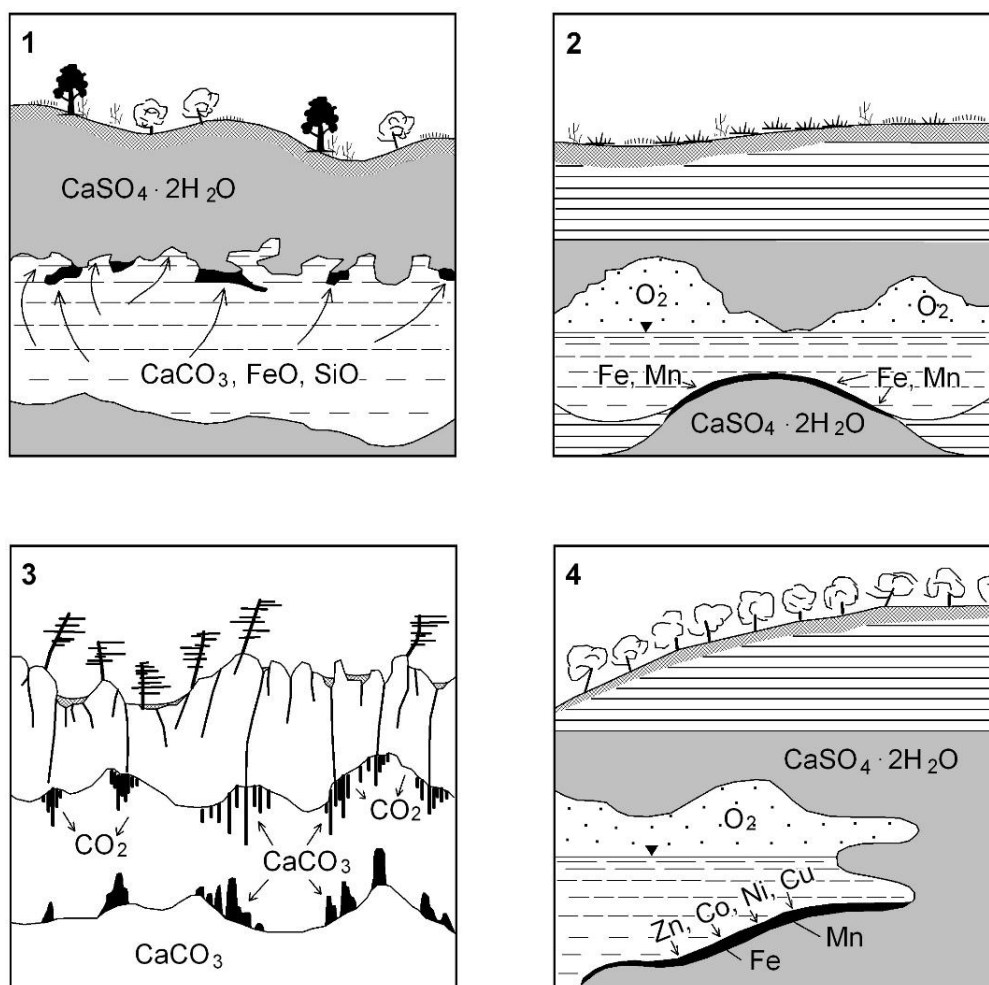
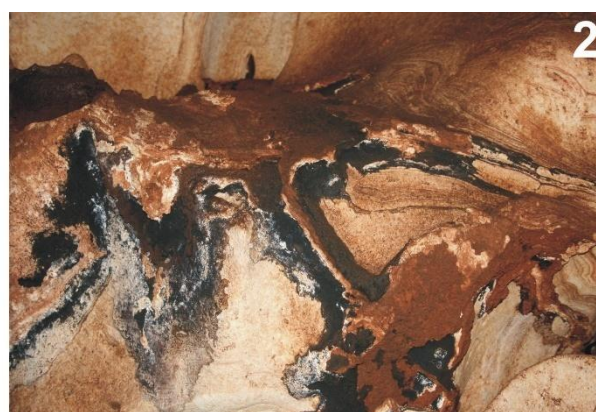


Fig. 5. Some types of geochemical barriers in the underground part of karst landscapes:
1 – solution, 2 – oxygenic, 3 – thermogasodynamic, 4 – sorption



Phot. 1. Organic-mineral (1) and carbonate-ferruginous-manganese (2) crust formations on the cave ceiling (1) and walls (2) (Davadung Cave, Thailand, R. Kwai Basin, photo by V. Andreychouk).

Due to interpenetration of the environments and substances (oxygen, water, organics, etc.), various types of micro-organisms concentrate on the surface and inside the contact layer and their presence contributes to

qualitative changes occurring in the layer (Fig. 6). In the presence of light, (e.g. artificial), the rock substrate nourishes active development of algae, fungi and even vegetation (lampenflora) (Phot. 2).

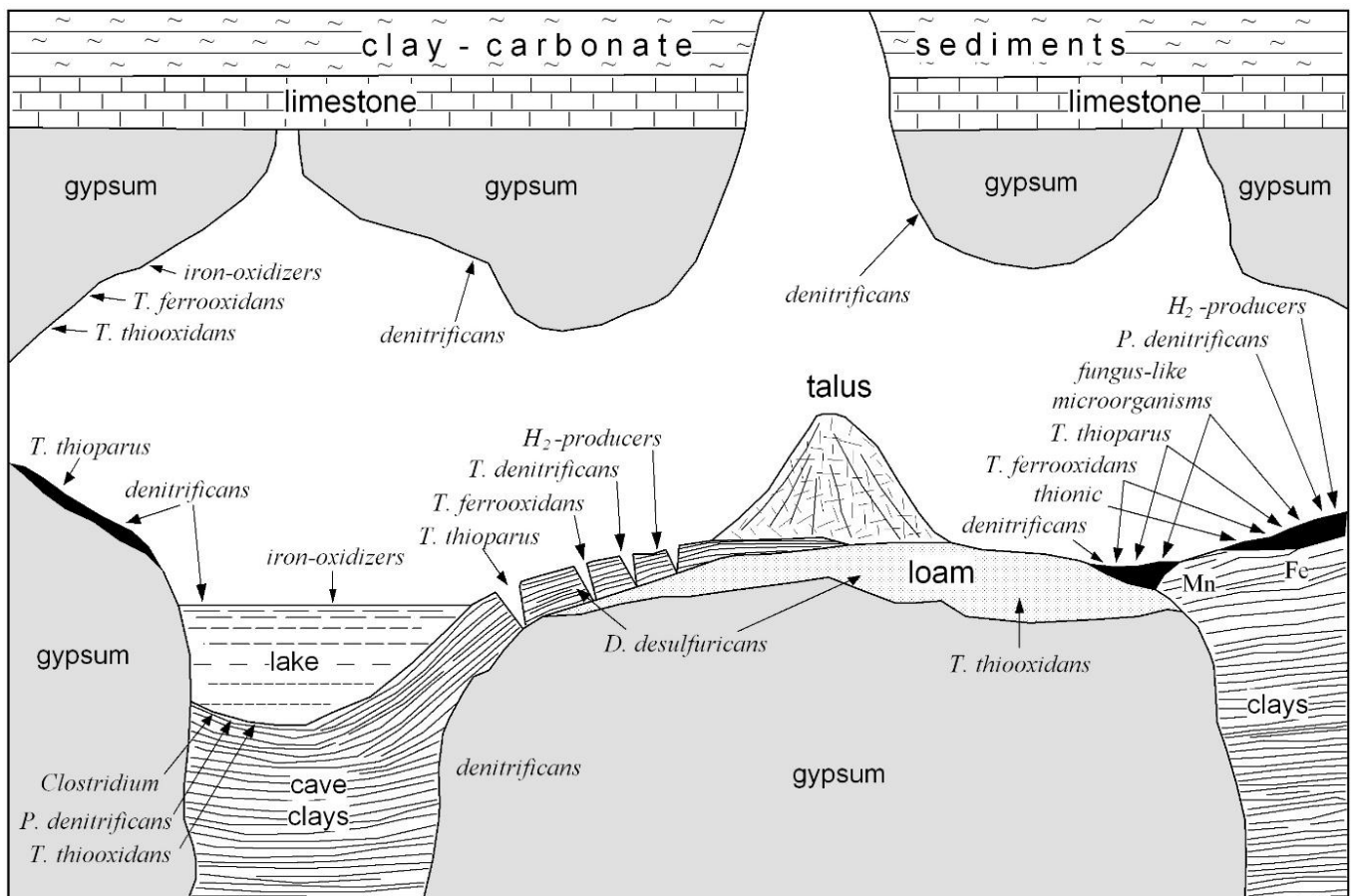


Fig. 6. The spread of basic species and groups of microorganisms in Zoloushka Cave (Bukovina, Ukraine) (after ANDREYCHOUK, KLIMCHOUK, 2001). Microorganisms are concentrated on the surface of the cave walls and sediments, i.e. related to contact formations (geocomponents).



Photo 2. Fern growing in a cave owing to artificial irradiation of ground and walls. Laos, the cave in the vicinity of Van Vieng (Phot. by V. Andreychouk)

The surface layer of cave sediments (A-L)c-uis also richer in life than the bedrock beneath. Decaying remnants of organisms are gathered there, including those carried to the cave by surface water, air or gravity, as well as the excrement of the cave-dwelling organisms. Accumulating organic material makes an excellent biosubstrate for the development of micro-organisms and insects, which form the basis of the cave ecological chain of trophic relationships. Organic acids from excrement transform rock projections of the cave bottom chemically, which is often accompanied by formation of specific, partially biogenic minerals, mainly of the phosphate group. The activity of micro-organisms utilising organics or producing specific chemical compounds (the metabolic waste of chemosynthetic bacteria) concentrates here, too. On the surface of cave sediments there are also tiny plants growing (although only the embryonic stage) from seeds transported into the cave by water, wind or on speleologists' boots. Microflora and moulds develop

well on the remnants of organics and litter left in the cave by man, sometimes covering dozens of square metres, which is facilitated by high humidity and the stability of the cave microclimate.

The near-surface water layer of larger cave lakes may be also considered as a contact geo-component of the subterranean subsystem KL – (A-H)c-u. It is acknowledged that there is a clear stratification of the physico-chemical properties of the water of groundwater reservoirs, where the upper layer of the water is almost always distinctive for its high content of dissolved salt. As a result of evaporation, the settling of aerosol particles from the air, and hydro-chemical imbalances, a mineral film may precipitate on the surface of the water. There is formation of specific geochemical barriers here (through the migration of chemical elements), such as: mechanical, evaporative and oxygen. In the surface layer (film) also the life of bacteria is concentrated (Phot. 3).

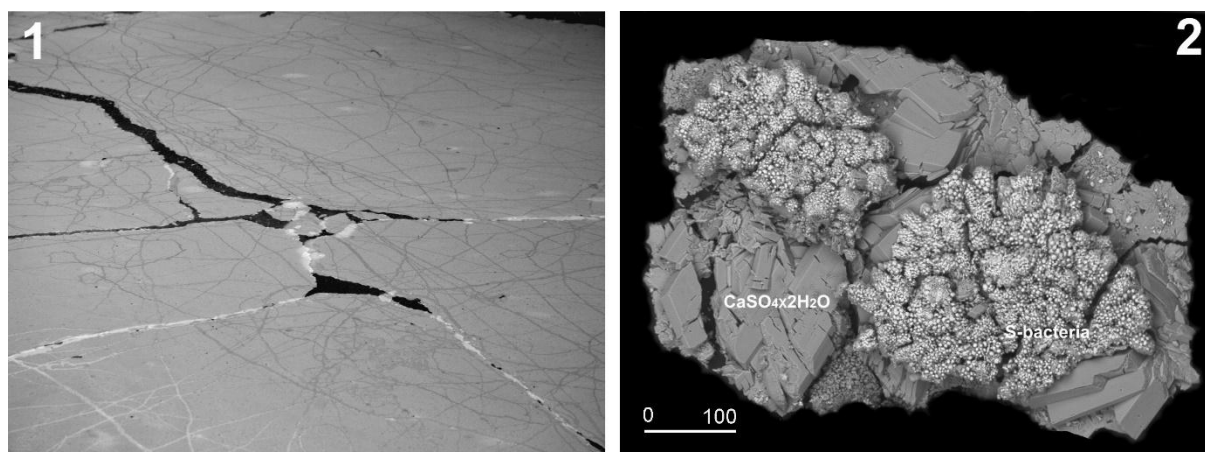


Photo 3. An organic-mineral (gypsum + sulphur bacteria) film (thin crust) on the water surface. An ascending karst spring (lake) with thermal water enriched in sulphates. Debar surroundings, Macedonia: 1 – thin gypsum crust, 2 – fragment of crust composed of gypsum micro-crystals and sulphur bacteria on them under SEM (scale in microns) (Phot. by V. Andreychouk)

The bottom sediment of underground reservoirs (of cave lakes) and karst aquifers (H-A)c-u are associated with the existence of many organisms inhabiting ground water – copepods, amphipods and other organisms. Here accumulation of organics also takes place (admittedly, mainly in small measure), creation

of geo-chemical barriers resulting from the deposition of minerals (Fig. 5), and the observed increased activity of living microorganisms.

Generally, the organic world of the subterranean subsystem KL is, of course, significantly poorer than that of the surface. However, the karst landscape of deserts, where

a quite diverse fauna of insects, reptiles, rodents, etc., may be concentrated in caves because they are more humid than the surface, may be an exception.

In the geo-component structure of KL, at the present stage of development of the epigeosphere³³, human beings along with the products of their economic activity (technical and infrastructure components) increasingly make their presence felt. They constitute a qualitatively new system element which gradually forms its relationships and connections with other elements of the KL system, and thus begins to impact more and more actively on the landscape, unfortunately, often destructively. Apparently as a biocomponent, this new element has no strict location in the vertical structure of the system, however, it can occur in all its layers in various intensity.

Thus, the vertical structure of KL, in contrast to the "normal" geo-component structure of non-karst landscapes is arranged in tiers, and the layered character not only applies to the extension inwards (quantitative increase) the vertical "spectrum" of geo-components, but qualitatively differentiate the entire system, giving it also a geo-complex, or rather multicomplex (binary) character. The geo-component, and simultaneously geo-complex nature is a peculiarity characteristic of KL structure. In terms of systemology it means that we deal with a higher level of the organization of the whole system in which the components are organized into subsystems, and the subsystems form the system (landscape). This fact is of crucial importance for the formation of the holistic properties of KL and un-

derstanding of the specifics of its functioning, dynamic, self-regulation, stability, self-development and evolution as a specific natural system.

Material and energy relations of geo-components

The presence of cavities makes the karst landscape much "deeper" than the ordinary landscape. Because of the fact that cave systems "descend" to a depth of several hundred meters, even to 1–2 km, the thickness of the karst landscape is several times greater than the thickness of the non-karst landscape, lending it more three-dimensionality, stretching it vertically and differentiating geodynamic processes which take place in the landscape. As the increase of the landscape space happens at the expense of the vertical vector, it enhances the effects of gravity in KL.

The specificity of the vertical section of KL – a significant extension into depth, repetitive spectrum of its geo-components, the presence of subterranean subsystem determine a specific mutual material and energy impact of its components. These interactions (relationships between the system components) are realized in the form of material-and energy (and information) flows between them.

These interactions (relationships) between the system components occur in the form of material – and energy (and information) flows between them. These aforementioned characteristics of the vertical section of KL determine the peculiarities of *vertical relations*, i.e. streams of matter and energy, *between its components*. Firstly, the importance of these relations in the overall structure of the connections of the elements of KL is definitely higher than in non-karst landscapes. Secondly, the ascending direction (upwards) of their functioning occurs by far more often in KL than in non-karst landscapes. This may be illustrated with well-known examples of seasonal variations in air exchange between the subterranean and terrestrial parts of KL, high amplitude of water

³³ The term *epigeosphaera* or *geographical envelope* is widely used by geographers in Eastern European countries. This term refers to the several-kilometre-long near Earth's surface zone in which the matter and energy cycles between the lithosphere, atmosphere and hydrosphere (abiosphere) take place, and where life occurs. In combination with life, which is also included in the cycles, the abiosphere creates the biosphere, and the biosphere with a human being – the antroposphere (noosphere, technosphere, etc.).

level fluctuations (reaching tens metres, or even up to hundreds in mountain areas) in cave lakes and karst aquifers. Thirdly, in vertical streams of KL the transportation of solid material (along with streams of water, and especially resulting from collapsing of the ceilings of underground cavities) is incomparably greater than in non-karst landscapes. The movement of water masses in freely flowing streams (like on the surface) taking form of cascades and waterfalls in caves is another peculiarity of vertical connections among the components of KL. Generally, the broader spectrum of geo-components in KL results in a definitely greater number of overall relations between them than in non-karst landscapes.

Paradynamic and paragenetic aspects of the vertical structure of karst landscapes

The vertical streams of material and energy in KL unite the tiered geo-components and their subsystems (subterranean and terraneous) into the landscape entirety. The streams are *paradynamic* (interactions), but most of all, *paragenetic* in nature, which consists in the fact that the subterranean and terraneous subsystems of the landscapes evolve (as the evolution of the system proceeds) in a more and more integrated way towards their closer relations and interdependence. For example, a sinkhole formed above an underground cavity creates a small catchment around it – karst doline. By collecting and bringing under the ground rainwater and groundwater, the doline facilitates an increase of the underground passage which drains it. Whereas the presence of the underground drainage together with transportation of the material coming from the surface runoff are conducive to the enlargement of the basin area. Thus, a positive feedback (mutual stimulation) between the subterranean and terraneous elements of the landscape is created, which results in a *dynamic paragenesis*. And conversely: the colmatation of ponor with soil material in the bottom of the karst doline leads to the dis-

appearance of the interaction of elements, which affects the function and physiognomy of the subterranean and terraneous components of the paragenetic system. Obviously, at the level of the entire landscape (rather than of its individual components) the processes of interaction between the subterranean and terraneous subsystems are much more complex, varying in terms of the surface and vector, nevertheless retain their paragenetic nature.

The vertical streams not only infiltrate geo-components of KL resulting in their structural merge, but also combine its subterranean and terraneous parts (sub-systems, geo-complexes), therefore it can be stated that the vertical connections in KL are of an inter-component, or even intercomplex character. This means, inter alia, that the subterranean and terraneous parts of KL create a specific paradynamic, and above all, paragenetic geo-system which does not occur in non-karst landscapes having an exclusively vertical geo-component structure and an exclusively inter-component character of vertical relations of material and energy.

The described above properties of the vertical structure of KL allow considering it as specific and rating it as a separate *particular type of an arrangement of the geo-components* of the vertical structure of the landscape.

Horizontal complex (morphological) structure

Elements of the horizontal structure – geocomplexes

The horizontal structure of the karst landscape, as well as of other landscapes, is formed by overall topological inter-landscape spatial units – *geocomplexes*. They are hierarchically organized formations of different sizes creating an internal structural mosaic of the landscape.

The simplest “building block” of the horizontal structure of the landscape is a

*facies*³⁴ – a homogeneous fragment of the terrain of certain boundaries, referring to a specific element of the relief, within which the homogeneity of the bedrock (*geotop*), microclimate (*climatope*), soil (*pedotop*) and vegetation (*biotop*), i.e. a homogeneous arrangement of the components of the vertical structure is preserved. A *facies* is an elementary geocomplex, the smallest structural landscape unit integrating geo-components into a genetic whole³⁵.

Facies make up the larger taxonomic units – *the spots* (*urochysko* – pol., *urochyshe* – rus. etc.). This may be illustrated by an example of an old karst doline of inclined slopes and a flat bottom, forming separate *facies* (of the slope and bottom) or a karst tower with steep rocky walls (*facies*) and a rounded, sometimes pinnaced, covered by vegetation apex (*facies*).

Spots form together *terrains* – areas with a regular presence of several types of spots, for example, a wide floodplain terrace of a large river with spots of periodically flooded flat surfaces (meadows) and constantly filled with water oxbow lakes. What may be good example of the terrain in the karst landscape is a flattened karstified watershed surface dotted with karst dolines of various sizes (spots), karst polje with spots of the slopes, bottom, transit beds or sinking streams, karst dolines, etc. The *terrains*, as the largest intra-landscape geocomplex topological units, constitutes the landscape³⁶.

Geocomplex units of each level are primarily peculiar geomorphological natural ensembles and a geodynamic “orchestra”, wherein the role of the conductor is performed by relief, its diversity and the processes that both

shape it and are induced by it. Terrain morphology diversifies ecological conditions (insolation, humidity, etc.) which determine the character of biota (flora, fauna), soil, and thus the character of an entire geocomplex of any rank. The geocomplex spatial (terrain) structure of the landscape is often called *morphological* (Fig. 7).

The three-level topological organisation of the landscape (*facies* → *spot* → *terrain*) constitutes its more or less universal (for all landscapes) taxonomic “skeleton”. However, in the case of landscapes of a more diverse internal structure, a three-level hierarchy does not allow an adequate illustration of a real landscape structure and requires the introduction of additional hierarchical levels (units), for example, *zvenos* (WIDINA, 1970), *subspots* (between the *facies* and *spots*), *complex spots*, *sub-terrain* (VOROPAI, ADREYCHOUK, 1985), and in the mountains – *striyas* (between the *spot* and *terrain*) (MILLER, 1974) etc. This problem typically arises during the large-scale mapping of landscapes. The diversity of the morphological structure of the landscape generally depends on the diversity of the relief, mainly on the degree and depth of the fragmentation of the landscape area (by erosion and other processes). Therefore, the landscape of uplands or mountains, as a rule, has a more complex structure than of flatlands, and even more, of lowlands.

Geocomplex mapping (landscape mapping) of the structure of karst landscapes in most cases shows the need for finer, more detailed taxonomic scales due to the fact that they have a more complex internal structure (spatial organization). The author’s experience in making maps of KL suggests that generally the karst landscape of the same geomorphological type (lowland, flatland, upland or mountain) as the non-karst landscape has a more complex structure than the non-karst landscape – of at least one structural taxonomic level.

³⁴ The term *facies* was borrowed by physical geographers from geologists. As a geographical term, it functions mostly in Eastern European landscape literature.

³⁵ In ecology, *ecotop* or *biogeocenosis* are the equivalents of *facies*.

³⁶ *Facies* – the smallest *homogenic* unit of the landscape, whereas units of higher ranks – *geochoras*, i.e. spots, terrains, etc., belong to *heterogenic formations* (of non-homogeneous internal structure).

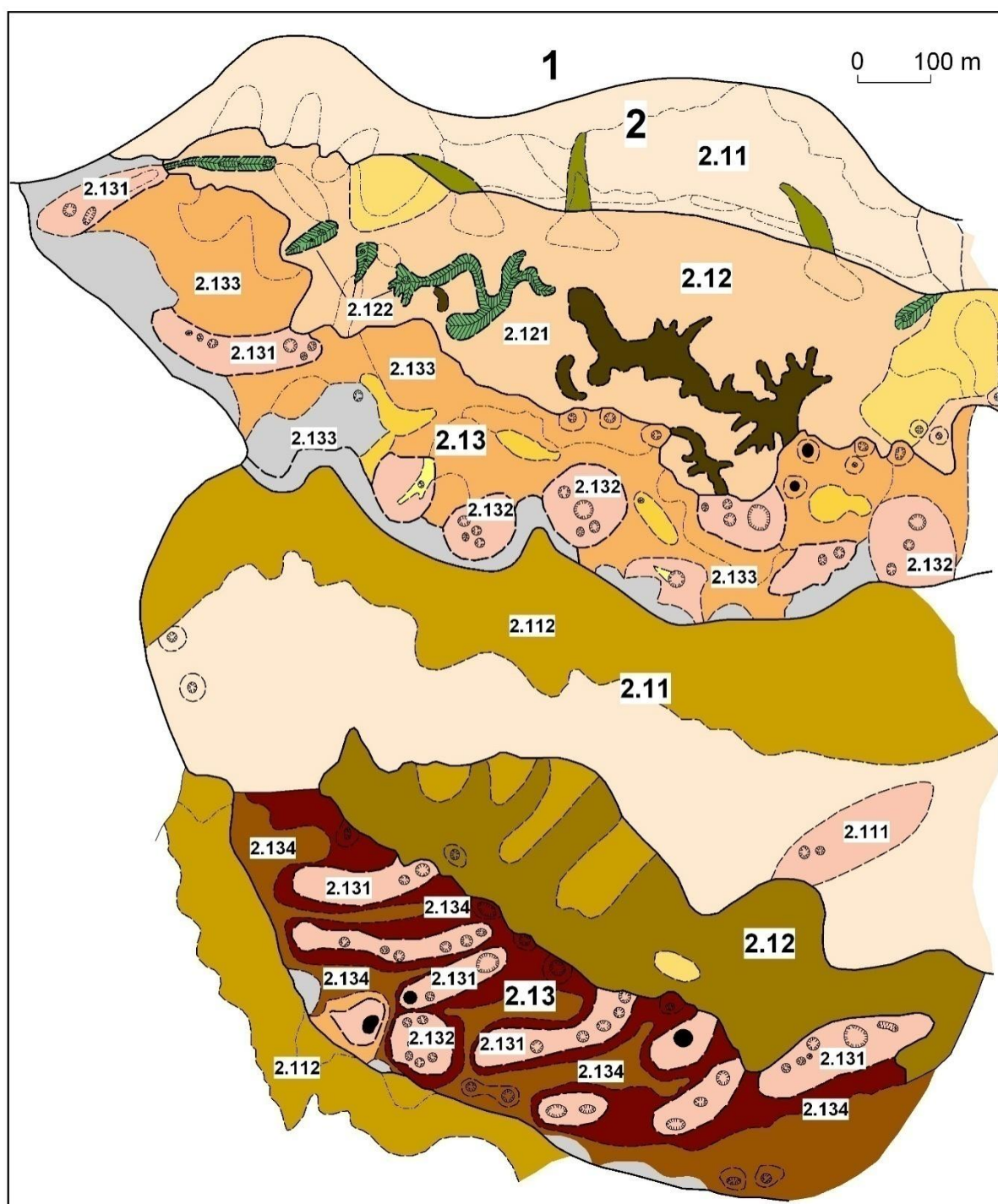


Fig. 7. The landscape map of Kyrktau Plateau (Zeravshanski Ridge, Uzbekistan):
 1 – erosion (mainly) slope of karst massive, 2 – karst landscape (karstified plateau on the top of monoclinal structure). Hierarchical-structural elements of karst landscape (as examples):
 2.11 – of “terrain” level, 2.132 – of “spot” level.

Some karst landscapes of the plains are equally, or sometimes even more “speckled” and complex as non-karst landscapes of the mountains. This fact results from the presence of the forms of linear-erosion as well as

numerous karst forms (dolines, depressions, blind valleys, towers etc.) in the karst landscape (in its relief). The mere presence of these additional forms (potential geocomplexes), their different spatial relationships and interac-

tions with linear forms make the internal structure of KL significantly more complicated. What primarily engenders such a situation (complication of morphological structure of KL) is the subterranean subsystem “competing against” the terraneous subsystem for matter (mainly water) and energy.

The spatial structure of the KL is not only more complex than the structure of non-karst landscapes, but also has specific, typical for it, *morphological features*. It is all about a clear dominance (in the mature KL) of concentric forms – round, oval, both concave (dolines, valleys, poljes) and convex (domed hills, towers, etc.) of various sizes³⁷. Most often concentric forms create closed areas within which distinct geocomplexes formed.

The presence or domination of concentric forms leads to the creation of a specific (spatial, morphological) outline of KL, distinguishable from mostly “linear” non-karst landscapes shaped by surface watercourses (*erosional* landscape), glaciers (*drumlin* landscape), or even the wind (*yardangs* in a desert landscape). Obviously, in the structure of the KL there are also present linear forms related to river valleys, erosion or fault escarpments, canyons, etc. However, as the evolutionary development of KL occurs, their number in the landscape in relation to the concentric forms is decreasing.

The amount of linear forms often decreases along with the elevation of KL (the higher altitude – the fewer forms due to the condi-

tions facilitating water sinking under the ground), and with the decrease of the thickness of non-karst sediments covering the karst substratum, which also leads to the disappearance of the surface water network and degradation of the catchments of erosional forms. The ratio of linear forms to concentric forms in the landscape may be an indicator of some selected aspects of the KL development. Capturing of streams on the surface by ponors results in degradation of linear forms and creation of relatively autonomous (in terms of geodynamics) concentric forms, which constitute the basis for the formation of overall natural units – geocomplexes.

To recapitulate, the horizontal structure of KL is complex and hierarchical in character. Its features are comprehensive, hierarchically organized topology units of various sizes: from elementary homogeneous (facies) to complex multiple heterogeneous ones.

Material and energy connections between geocomplexes

Horizontal connections between geocomplexes in KL also differ from those in the non-karst landscape. In both cases, they are represented by lateral material and energy streams in the form of a linear and surface flow, slope processes, circulation of air masses, migration of organisms, etc. Their main directions are controlled by hypsometry and relief which produce “gravity gradient” determining the movement of denser geomasses (rocks, water, sediments), climate-forming factors producing thermal and barometric gradients which trigger the air movement, and environmental (ecological) factors forcing the biomass migration.

A clear specificity of karst relief modifies, complicates and even affects the lateral material and energy exchange between the morphological elements of the horizontal structure of KL. In many cases it results in its almost complete disappearance. In the naked karst, for example, meteoric water falling on

³⁷ The dominance of concave or convex forms is conditioned mostly by climatic conditions and the age of karst. In the karst landscape of tropical terrains – with a great amount of precipitation (> 1000 mm/year) and a long developmental cycle in climatically unchangeable (for millions of years) conditions dominant are convex (hill, cone, tower) forms. Whereas in the karst of the temperate latitudes dominant are concave forms (dolines and depressions). The karst landscape of the transitory climate areas (e.g., Mediterranean) is characterised by a mixture of concave and convex forms, and their proportions depend on both climatic conditions (not only latitudinal but also altitudinal) and structural-geological conditions.

fissured karstified surface almost completely infiltrate into the massif, depriving adjacent geocomplexes (spots) of the interaction in the lateral plane (Fig. 8). In the covered karst, the lateral material and energy exchange between geocomplexes is largely disturbed by the surface karst forms which capture the flow, both linear and surface, locating it within separate geocomplexes, often with simultaneous “transferring” it to the subterranean subsystem. This leads to the creation of a specific *radial-centric* (rather than linear, as in non-karst landscapes) type of mass-energy conjugation of inter-landscape units, often together with the underground “utilization” of potential external influences on the landscape. This means a spatial restriction of the horizontal vector of the connections in the KL structure, self-fragmentation and placement of streams within smaller structural units, and generally their

closing and tendency to self-isolation as units – contrary to the non-karst landscape, which is characterised by the dynamic openness of its units, their multilevel interactions and overall tendency for increasing degree of transitivity of intercomplex streams (i.e. increase in the openness of geosystem).

By slightly generalizing and simplifying the matter, it can be concluded that in KL there is a tendency towards disappearing of horizontal structural links, their diversification, and in general, towards geodynamic self-isolation of units (geocomplexes), while in the non-karst landscape towards the development of lateral connections and the increasing number of dynamic connections between units. This circumstance concerning the specificity of the structural lateral links in KL is decisive in its development and determines the formation of its natural physiognomy.

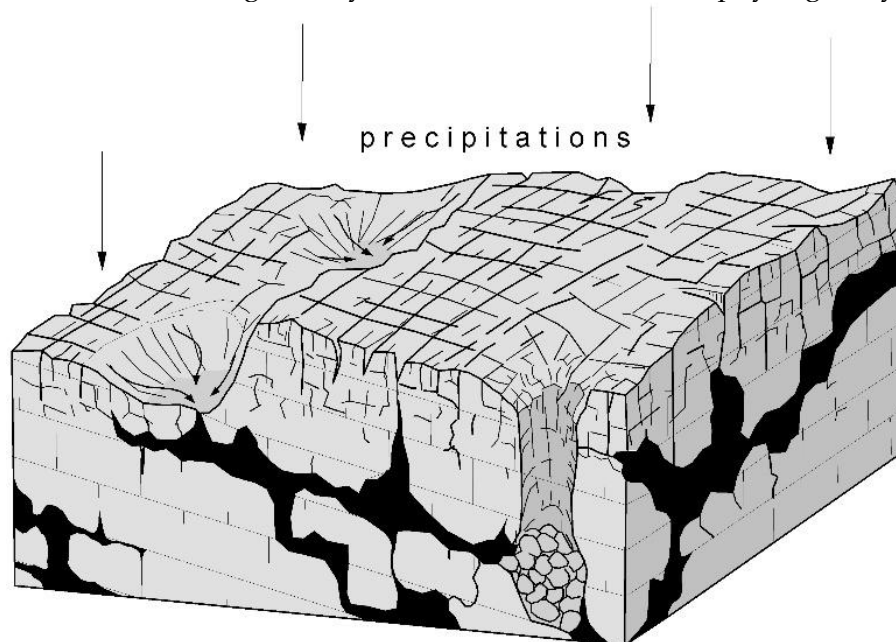


Fig. 8. A hypothetical fragment of karst plateau with karren fields and solution dolines. Within the limits of karren fields, direct infiltration of meteorological water into the massive takes place excluding its lateral movement.

Paradynamic-paragenetic aspect of the horizontal structure of the karst landscape

Lateral flows of material and energy in KL combine its structural elements (geo-complexes) into paradynamic and paragenetic overall

functional formations, just like in the case of vertical linkages. Such paradynamic or paragenetic systems (geosystems) may be illustrated by the following examples of correlated formations: a karst doline and its catchment, a blind karst valley (with a ponor) and the sur-

face area which is drained by it, etc. (Fig. 9). The functional unity of paragenetic formations is determined by the targeted streams of ma-

terial and energy, which dynamically connect homogeneous elementary units into heterogeneous paradynamic (paragenetic) systems.

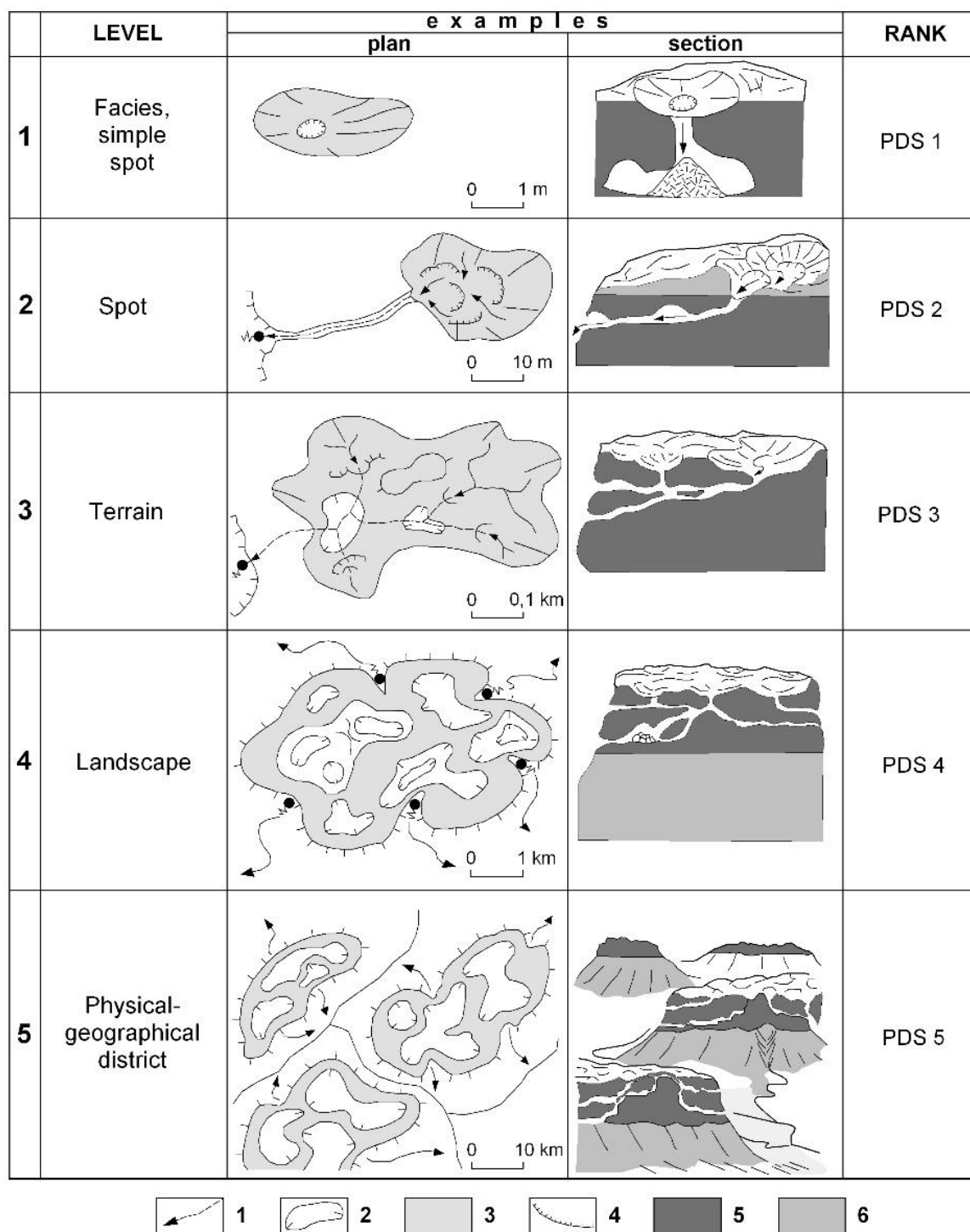


Fig. 9. Examples of karst paradynamic geosystems of different sizes and levels of organization::
 1 – main directions of karst water movement, 2 – karst sinkholes and depressions, 3 – areas of different sizes dynamically connected by runoff and drainage. 4 – waterways. 5 – series (formation, layer) of karst rocks, 6 – non-karst rocks

Conjugacy of the vertical and horizontal structure of karst landscapes

The structure of karst landscapes, both vertical and horizontal, in the first case, fundamentally, in the second – significantly differs from the structure of non-karst landscapes. It is characterized by close functional-dynamic relations, including paradyamic and paragenetic ones, between geocomponents, geocomplexes and subsystems.

Of course, considering vertical structure of paradyamic geosystems of KL separately from its horizontal structure is rather provisional. In reality they function as a spatial entirety. A karst doline with its drainage basin can be perceived as a paragenetic system in the lateral structure of KL, but also as a surface element of the paragenetic vertical system, whose another element is an underground cavity (cave) draining the doline (Fig. 9-1). It would be more appropriate to “combine” the underground cavity, the sinkhole (doline) above, and its basin into the unique – integral and “complete” – paradyamic-paragenetic terraneous-subterraneous karst system, since all its functional elements closely interact and are characterised by a mutual genetic dependence.

Larger karst formations, e.g., a large karst doline with landslides on the slopes, or a blind karst valley with a ponor should be also regarded as a surface element of the paradyamic system whose subterraneous part is a cave system shaped by the stream disappearing in the ponor. By following this induction, karst landscape in its entirety can be also considered in terms of the paradyamic-paragenetic mega-geosystem, comprising dynamically and genetically conjugated terraneous and subterraneous parts (Fig. 9-4, 5).

To sum up, the specificity of the karst landscape system is determined, on the one hand by both a particular composition of its structural units (unit enrichment of the geocomponent and geocomplex spectrum) and the peculiarities of their spatial arrangement

(in geocomplex tiers), on the other hand by specific (karst) interactions between them (conjugation), which manifest in the creation of a specific – karst type of paradyamic (paragenetic) geosystem formations.

Relationships between the karst landscape and its surrounding

Both karst and non-karst landscapes are open dynamic geosystems connected with their surroundings by an exchange of material and energy. The nature of the relationship between the karst landscape and the surrounding landscape is largely dependent upon the hypsometric location of KL in relation to the neighbouring areas. Indeed, the fact of its towering over the surroundings (*autochthonous* location – in the terminology of L. JAKUCS, 1977) usually suggests a one-way impact of the landscape (in this case of KL) on its surroundings³⁸. In such a case, the surroundings do not affect shaping of the landscape (with the exception of the climate factor), and its development is profoundly influenced by the processes of self-development. In turn, KL largely determines the processes taking place in its surroundings (for example, irrigation of the areas by karst springs at the foot of massifs).

An *alogenic* location of KL (at or below the level of its surroundings – which happens rarely) makes it the receiver of external influences. Material and energy streams considerably, and sometimes decisively, affect the formation of KL, e.g., the character and extent of its karstification. In the case of a *transitional* location, the karst landscape on the one hand receives the targeted impact of the non-karst formations of higher regions, whereas on the other hand – it significantly affects the landscapes located below. At the same time, the material and energy streams

³⁸ A good example of similar situations may be upland or mountain massifs and karst plateau towering above the surroundings.

which transitionally “penetrate” KL, undergo significant transformation, both in terms of quantity (e.g., the amount of outflowing water), and quality, i.e. its chemical composition.

The boundaries between the karst and non-karst landscapes are usually quite clear, sometimes even sharp. This is primarily due to lithologically conditioned essential morphological differences between the karst and non-karst relief which determine the physiography of these areas. Quite often, the lithological boundaries of rock series, especially in the mountains or in the areas where *cuestas* are present, are accompanied by tectonic boundaries

(faults). Then the boundaries between the landscapes, clearly marked by geomorphology (scarps of karst plateau and *cuestas*), have a *linear* character (Fig. 10-B). In the plains and upland areas with a monoclinical occurrence of karstifying series and their “immersion” under the non-karst sediments, the boundary between KL and NKL usually is of a transitional character (Fig. 10-A). On the map, it takes on the form of a *winding curve* reflecting the uneven, conditioned by erosion change in the thickness of the cover, which separates the karst series from the surface.

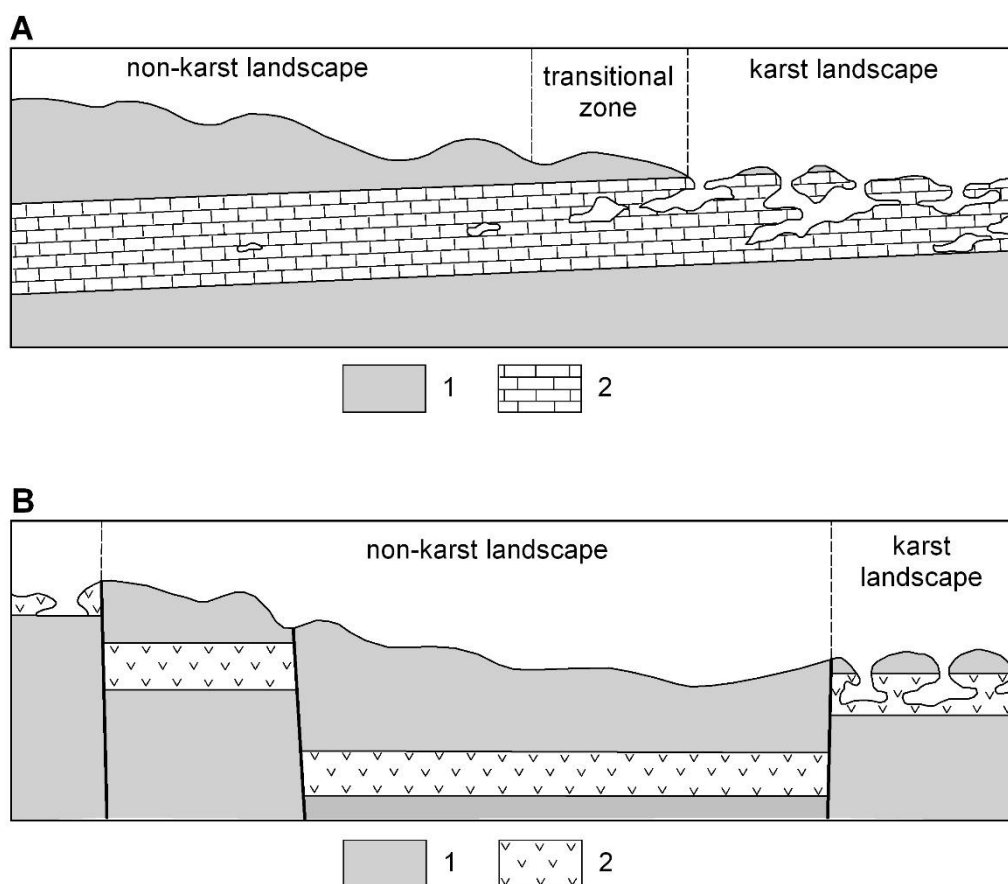


Fig. 10. Some examples of the boundaries between karst and non-karst landscapes: A – soft, blurred boundary – with the transitional zone (in the case of monocline bedding of karst rocks): 1 – non-karstic cover sediments, 2 – limestone, 3 – non-karstic bedrock; B – sharp boundaries (in the case of the fault-induced limitation of the karst rocks spread): 1 – non-karstic rocks, 2 – gypsum

The functioning of each landscape as a geosystem is an integral, complex, cyclic, continuous, synchronised, etc., process of the exchange of material and energy as well as in-

formation between its components (geocomponents, geocomplexes, subsystems, etc.). The functioning of the karst landscape is particularly complex. Just as in the case of non-karst

landscapes, it is determined by the structure of the entire geosystem (by the amount of its elements and the nature of connections between them) and by the processes taking place both within the system and its surroundings. However, the structure of KL is more complex than of N-KL. Owing to the presence of the subterranean subsystem with its own set of geo-components and the capacity of the whole system, the overall number of internal connections in KL, as well as generally its entire functioning space are several times bigger than in N-KL. The structure of karst landscape is specific because of a great amount of internal, mainly vertical connections.

The functioning and development of the karst landscape

Functioning

The greatest functional peculiarity and essence of KL are *interactions (the exchange of material and energy) between the subterranean and terraneous subsystems*. Just here, in the layered (terranean-subterranean) structure of KL, the most important physical-energetic contradictions, which activate the material-energetic circulations between the elements of both of the systems are located. For example, the development of the cavities in the subterranean subsystem results in the formation of sinkholes and ponors catching the flow in the terraneous subsystem. In turn, the changes on the surface (deforestation, colmatation of ponors) induce the processes in the subterranean subsystem such as filling the cavities with loam material, or the other way round – washing out the fillings. The activity (functional strength) of the interactions between the two tiers – subsystems of KL depends on their altitudinal span, tectonic activity of the area, type of karst (lithological, morphogenetic, climatic, etc.), its age and many other factors and circumstances.

The functional structure (model) of the karst landscape is shown on the highest possible level of generalisation – in Fig. 11.

It is obvious, that the number of the functional connections between the elements of the karst landscape system increases in proportion to the amount of the elements (in this case – only genetic blocks of the elements), and the character of the increase is exponential. Once again this indicates how complex the functional structure of KL is in comparison with N-KL. This circumstance should be taken in consideration while carrying out both researches on KL and various economic and nature-conservation projects within it.

The complex structure of KL, qualitative diversity of its components and their connections, high “energetic potential” determined by the layered structure point out a higher functional activity of KL in comparison to N-KL in similar geomorphologic and climatic conditions.

Apart from the qualitative-substantial i.e. physical, chemical, aggregative, diversity of the elements of KL, equally essential for its functioning are the differences in *the spatial location* of the structural elements in relation to the internal elements transforming and stabilizing the landscape system: the terraneous system of KL is more closely connected with “egzo-surroundings” of KL, whereas the subterranean system with “endo-surroundings”. The terraneous subsystem directly achieves the impact of the external environment (solar radiation, precipitation, anthropogenic influences), whereas the subterranean – the impact of the factors of the internal environment (fluctuations of underground water, collapsing of the cavities’ ceilings, accumulation of gas emanations, etc.). Each of the subsystems performs, to some extent, the *buffer* and *transformational* role – in relation to the external (from above) and internal (from below) influences. This results in a certain delay in the response of the subterranean subsystem to the events in the terraneous subsystem and vice versa, which testifies to a particular *functio-*

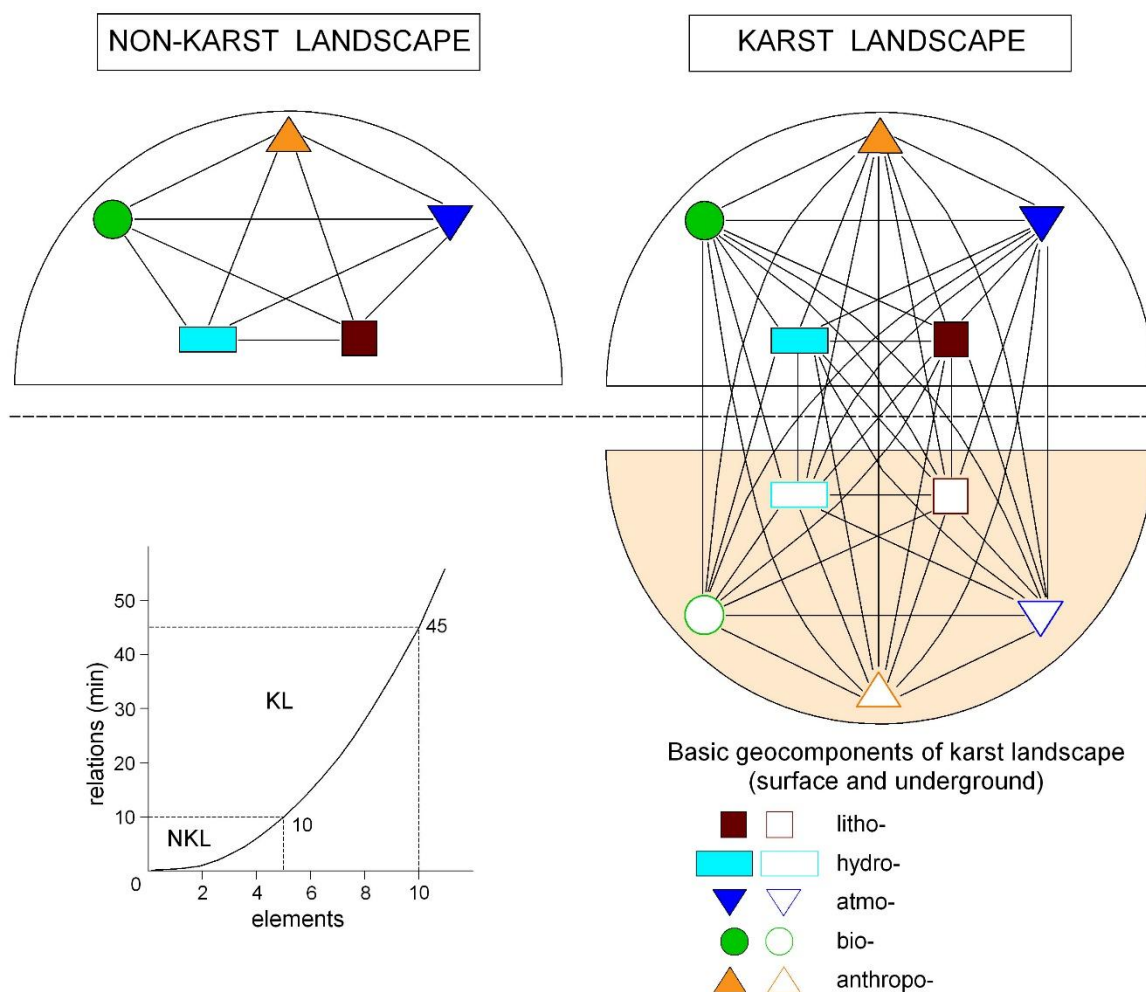


Fig. 11. The functional structures (models) of the non-karst and karst landscape and the internal relationships (minimal number – number next to the curve) between their basic, i.e. massive, homogenous, elements (for comparison). The contrast between the structures will be even sharper when the mixed (heterogeneous) components and external relations of the landscapes with their environment are taken into consideration. NKL – non-karst landscape, KL – karst landscape

tional asynchronicity of the events in the structural subsystems of KL. As a classic example to illustrate this thesis may serve the diverse response of the karst landscape to rains. At the beginning the impact is received by the terraneous subsystem of KL (filtration of precipitation water through the epikarst zone, accumulation of water in streams before their sinking in ponors). An apparent increase in the level of the underground water or their concentration in underground rivers, i.e. in the subterraneous subsystem, do not occur sooner than after several hours, sometimes even days. In this way the influence of the factor (precipitation) is reflected in the entire system, however

the karst subsystems response to the impact of this factor is asynchronous. The phenomenon of asynchronicity points out a certain *functional autonomy* of the terraneous and subterraneous subsystems of KL, which is vital in the formation of the mechanisms of its dynamic and stabilisation.

Dynamics and stabilisation

The *dynamics of the landscape* is commonly understood as changes occurring within it, mostly irreversible, caused by factors both internal (interactions of the elements) and external (interactions between the landscape and its

surroundings). The changes do not affect significantly the structure of the landscape and may have a character either relatively reversible or irreversible. Irreversible changes are the ones which are usually connected with geodynamic processes (erosion, groundwater flow), especially those of a catastrophic character, whereas conventionally reversible nature is generally characteristic of cyclic changes (daily, seasonal) or regeneration changes related to the influence of factors, either natural (fires, floods) or anthropogenic (burning or cutting down forests, irrigating or draining the land), etc.. Nevertheless, with the passing of time the changes taking place in the landscape are becoming more and more distinct (forest appears, the thickness of soil increases, river valleys deepen, gorges branch off, etc.), especially in the case of the occurrence of catastrophic phenomena (landslides, rock falls, severe floods, earthquakes).

The karst landscape is usually characterized by *higher* dynamics (changeability), which is a direct consequence of its intensive functional activity, being the result of the interactions of two main subsystems of the landscape. KL comprises something that might be considered as another, additional, erosion-denudation base (or multilevel bases) in the form of the cavities of the subterranean subsystem.

The dynamism of KL is greatly intensified also because of the fact that each cave system draining the surface, or a separate underground cavity (passage) with a large sinkhole above it constitute particular local erosional bases "hanging" in relation to the main regional base. This leads to territorial diversification of this dynamism and makes the character of the changes taking place in the landscape system more local (dispersed) and more autonomous. All this does not mean that KL undergoes physiognomical changes (from the outside) faster than N-KL. In the greatly karstified landscape with a good developed subterranean subsystem or in the landscape of naked karst, active changes migrate, to-

gether with water – the main factor of changes, under the ground.

The dispersion of the changes in KL related to the presence of a great number of dynamically "independent" elements (dolines with ponors, blind valleys etc.) makes the dynamics of the landscape (as a whole) slightly more evenly distributed (spatially) in comparison with NK, where the most active changes clearly concentrate within deeper river valleys, and leave the separating them watersheds in the state of passive dynamism for quite long periods of time.

The stability of KL depends on the material and energy connections both between its elements (geocomponents), as in non-karst landscapes, and between the subsystems (subterranean and terranean) – which is distinctive of KL. In the karst landscape the elements of the terranean subsystem are closely connected with each other as well as with corresponding elements of the subterranean subsystem forming a complex *voluminal* (spatially) and *metachronical* (time) dynamic structure. The structural complexity of the system, comparable with the complexity of its surroundings, is apparently the condition for its *stability*, i.e. the capability to maintain the state of dynamic equilibrium during the time when the system is exposed to external influences, or to restore the balance. In the case of the karst landscape this prerequisite is amply fulfilled – due to the presence of the subterranean subsystem and the connections between terranean and subterranean intersystems.

Generally, a higher level of KL stability (as a whole)¹⁸, in comparison with N-KL, is determined by a structural complexity of KL, whereas the specificity of the mechanism(s)

¹⁸ The stability of the landscape should not be mistaken with its durability (in time), i.e. physiognomic immutability. What really matters is the capability of KL to 'systematically' maintain its state and structure in the face of external influences, its lower susceptibility to the impact of destructive factors which may radically change the non-karst landscape during a certain influence, e.g. flood.

of its stability – by the specificity of the (layered) structure. The influence of the external factors on the KL system – either from above or from underneath – is always buffered by its terraneous or subterranean subsystems, which weakens their destructive influence (the so-called *buffer* mechanism of the landscape stability). The role of the buffer for the terraneous subsystem, protecting it from the underneath influence (e.g., emanations and gaseous fumes, radiation), is performed by the subterranean subsystem, and vice versa – the subterranean subsystem is protected from the impact of exogenic factors (temperature fluctuations, direct influence of solar radiation, rain or snow precipitation, etc.) by the terraneous subsystem.

Simultaneously, the structural permeability (fracturing, cavernosity, cavities and channels) and spatial connections of KL subsystems (fissures, ponors, sinkholes, shafts, cave holes) determine the capability of KL to absorb and filtrate harmful influences (e.g. pollution) or to accumulate matter of “alien” origin without any considerable damage to the entire system. Therefore, the terraneous subsystem, unlike N-KL, preserves its purity by absorbing pollution through the karstified fissures and ponors. Sometimes it happens at the expense of the subterranean system – resulting in its pollution. More often, however, the latter gets rid of the polluting substances within a rather short period of time due to the high permeability of its collectors. It is usually facilitated by the abundance of water in karst collectors, which is a derivative of their capacity and the frequently turbulent character of the water movement under the ground (in underground rivers). This is what constitutes the *adaptive* mechanism of the stability of KL in relation to the external influences.

Both of the subsystems may also operate jointly for the benefit of the entire landscape. Floods in river valleys are the examples of such functioning and simultaneously of yet another – “*absorption*” mechanism of stabilization in KL. In N-KL landscapes the level of

river water sometimes raises significantly (5–10 m, or even more), which not only results in a tremendous economic loss but also in substantial changes in the natural landscape (the course of the river bed, location of islands, river banks erosion, landslides, etc.). The converse is true in KL. In some cases, the flood wave created in non-karst areas of foothill terrains (but not exclusively there) on its invading the karst terrain (especially canyons) undergoes “suppression” (lowering) owing to the absorption of water by karst cavities and karstified fissures in the rock slopes of the valleys.

Specificity of the development (self-development) and evolution

The leading role of the intersystem interactions between the elements (geocomponents, subsystems) of the karst landscape, the domination of the vertical vector of interactions, and the limitation of the horizontal vector (including the surroundings) are the root causes of KL autonomization during the course of its development. They also are responsible for a large percentage of *self-development* processes (*self-organization*) in the structure of the development factors of KL.

As the development of KL proceeds (in the course of which the role of intersystem terraneous-subterranean interactions between its elements is continuously increasing), karst landscapes are gradually *secluding themselves functionally*, which in consequence leads to their *physiognomic isolation* from the surroundings. The reduction of the surface runoff and disappearing of the river flow results in the formation of edges and escarpments on their peripheries. The karst massifs often assume the shapes of table mountains with karstified surface (karst plateau). This surface undergoes the process of destruction (denudation) rather slowly due to the immediate absorption of precipitation water by wells and fissures. The entire mechanical energy of the water is activated under the ground, when the see-

ping water has concentrated beneath the buffer epikarstic zone and the small brooks have merged into fast-flowing underground streams "perforating" the massif's interior. This way, the karst landscape somewhat "conserves" itself from the inside, maintaining its "constant" appearance, at the expense of internal destruction (formation of channels and cavities). What is its geomorphological consequence is a slower pace of the lowering of KL surface in relation to the surrounding terrains, wherein the surface actually absorbs the impact of exogenic factors, which leads to its faster destruction. Nonetheless, the intensity of the changes in KL ("hidden" underground) is usually higher because the water, being the main factor of landscape formation in karst (and not only there), destroys the rock with double force – both chemically and mechanically.

Because of the leading role of the inter-system interactions (in developing and shaping the appearance), the karst landscape is becoming less dependent on its exosystem surroundings (zonal-geographic, sectorial-climatic, etc.) in comparison with N-KL. Within its boundaries, specific soil and biocenosis (ecosystems), considerably divergent from "normal" zonal ones, are developing. Therefore the characteristics of KL are often referred to as *azonal* or "abnormal", which distinguishes it naturally against the background of the zones of vegetation, soils, etc.. For example, owing to the increased dryness of the surface (underground drainage) and also frequently higher temperature of the rock surface, vegetation and soils of more southern zone develop better within KL. In consequence, in the landscape of a certain vegetation zone, representative enclaves and islands of flora characteristic of more southern zones appear in places where karst occurs. In karst terrains the soils and vegetation of more southern zones may spread northwards deforming its boundaries and creating "islands" within the zones located farther to the north. This phenomenon is often observed

within the East European Plain (ANDREYCHOUK, 2007), and is essentially illustrated in [Fig. 12](#).

Due to the environmental specificity and "abnormal" characteristics of the karst landscape, M. GVOZDECKIY (1972, 1977) suggests distinguishing it as a *particular type of a landscape*, which should not be categorized as any of its *genetic zonal types*.

In the karst landscape, a significant amount of material involved in local or overall landscape cycles of matter exchange remains in the landscape. It pertains to the accumulation of material both terraneous (residual covers, travertine dams and cascades) and subterraneous (chemogenic and mechanical filling up of karst cavities).

It is true, to a different extent, for karst landscapes of all climatic zones, although there are certain qualitative differences between chemogenic accumulation in "warm" (tropical) landscapes and "cold" (polar) landscapes. In the former, material is deposited mainly due to degassing or evaporation of water, in the latter – throughout the cryochemical process (freezing out of the mineral component) (ANDREYCHOUK et al., 2013). The fact that a substantial amount of material remains in the landscape points to yet another evolutionary-developmental characteristic of KL distinguishing it from N-KL. It does not mean, however, that KL is more long-lived than N-KL, but it merely indicates qualitative differences lying in the transformation of the geological substratum in KL, which does not occur in non-karst landscapes.

Therefore, self-development processes consisting in the interactions between the terraneous and subterraneous subsystems are essential for the development of KL. The influence of the self-development (self-organisation) processes is so profound that results in KL becoming autonomous, distinct, and of an "anomalous" (in any sense) character in comparison to other landscapes.

Nevertheless, the significance of external developmental factors, i.e. the control of the KL development by the superior system (en-

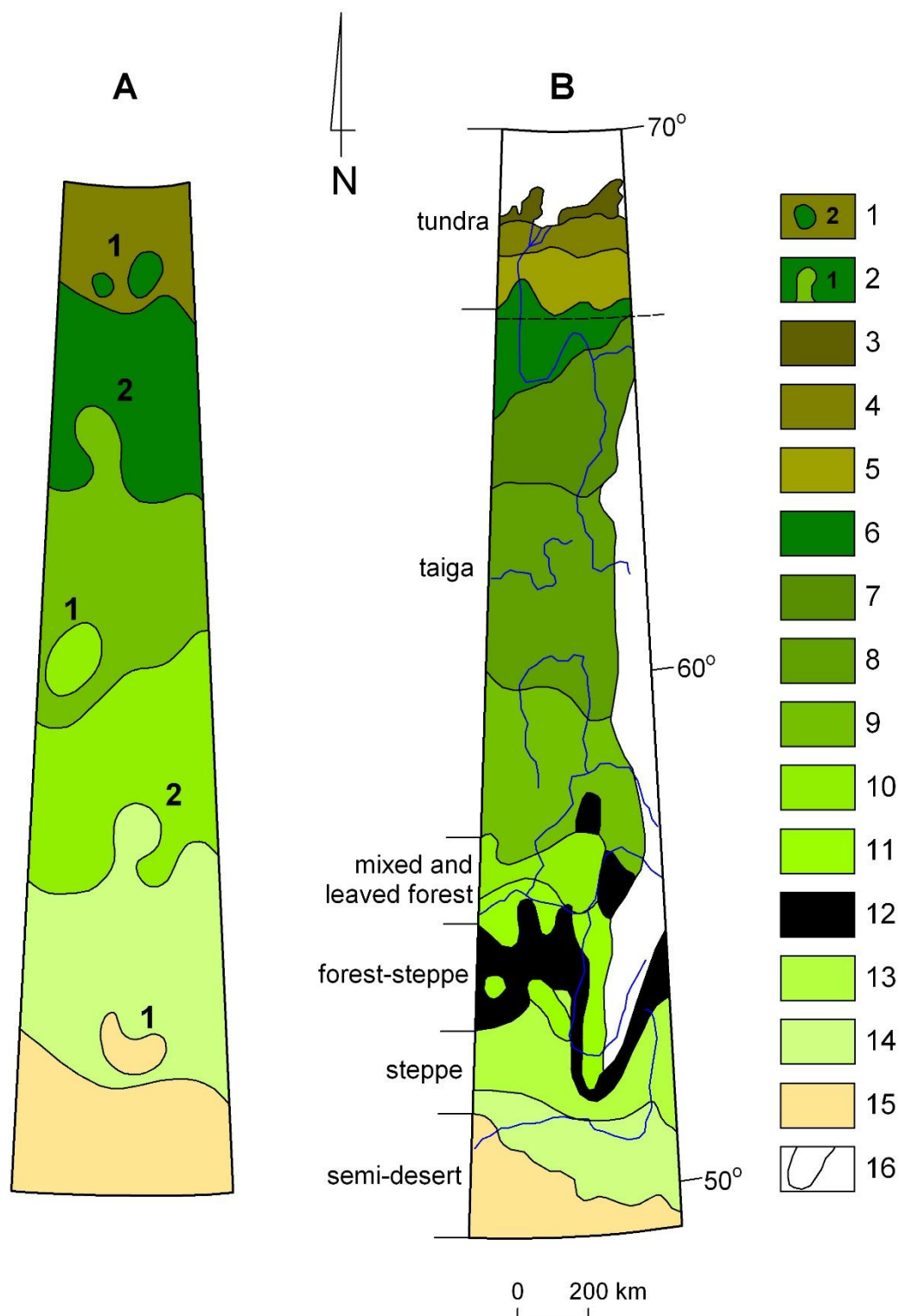


Fig. 12. An example of the deforming impact of karst onto the spatial (zonal) course of vegetation zones (the meridional transect along the Western mega-slope of Ural's Ridge) (ANDREYCHOUK, 2007):

A: 1 – “islands” of the landscape types (karst-derivative) with the features characteristic rather to more southern landscapes occurring within the vegetation zone of a more northern character, 2 – the boundary between vegetation zones deformed by karst (an abstract construction illustrating the rule); B – vegetation zones: 3–5 – tundra (arctic, moss-lichen and low-bush tundra), 6 – forest-tundra, 7–9 – taiga (spruce taiga, spruce-fir-tree taiga, taiga with small-size-leaf trees), 10 – mixed (needle-leaf) forests, 11 – broad-leaf forests, 12 – forest-steppe (alternation of broad-leaf forest and grassy steppe), 13, 14 – steppes (coloured and non-coloured feather-grass types), 15 – semi-desert (sagebrush-grass steppe), 16 – Urals area

vironment) should not be underestimated. Their impact is also significant, although its consequences show up in the landscape within a longer time perspective (evolutionary). The development of KL is controlled from the outside by two main groups of the factors (evolutionary orientation): climatic (exogenic) and tectonic (endogenic). The climatic factor, derivative from the geographical situation of KL (zonal and hypsometric), affects the intensity of karst processes by the temperature, amount of precipitations and the length of their influence, biota etc.. In the conditions of a warmer and more humid climate, the karst processes are more intense, therefore KL achieves an advanced (or even equi-final) stage of development faster than in the conditions of a temperate or cold climate¹⁹.

The evolutionary influence of the tectonic factor – the earth's crust movements, on the karst landscape is equally important. The vertical direction of tectonic movements determines the course of the entire karst cycle. In the case of tectonical uplifts facilitating karst development we deal with a "normal" development cycle, wherein KL "emerges" from the karst mega-cycle, and gradually transforms into a more and more independent and autonomous (self-organizing) landscape system, up to "self-extinction" (Fig. 2). In the case of stabilisation or changing the direction of the movements into descending ones, which are accompanied by the loss of the interactions energy by the relief (degradation of erosion bases), KL disappears without realizing its development potential²⁰. Fig. 13 illustrates an ove-

ral evolution of the landscape structures against the karst mega-cycle.

By generalizing the factorial issue of the dynamics and development of the karst landscape, it may be concluded that the internal factors (interactions between the elements) are more important than the aspect of shaping the functional and physiognomic difference of KL, whereas the external factors determine the intensity of interactions of the elements within the landscape and define its tendencies and development capabilities.

In this chapter, certain fundamental aspects of the systemic organisation of the karst landscape have been roughly discussed. The concept of an "abstract" KL has been considered, which means the considerable simplification of the phenomenon and not taking into consideration a great diversity of karst landscapes (naked, covered, plain, mountainous, alpine, tropical, Mediterranean, calcareous, gypsum, etc.). In the author's opinion, such a broad generalization is permissible because each KL, irrespective of their great diversity, at an advanced stage of development possesses the main structural attribute – underground cavities and channels forming a specific vertical (functional etc.) structure of the landscape. The latter, in turn, determines a characteristic course of processes in KL, unifies the differences between particular types of KL and makes them distinct from other landscapes.

¹⁹ Climate is not the only or most important reason for a fundamental difference in the relief of temperate and tropical terrains. Of a great significance is also a paleogeographic circumstance consisting in the fact that the terrains of a low geographical latitude had been developing for millions of years in far more stable climatic conditions – without glaciations or numerous sea transgressions in contrast to the landscapes situated in the temperate or polar zones.

²⁰ In this case we can speculate on "evolutionary losses". Against the background of the evolutionary development of the landscape of a certain terrain, the

karst-landscape stage (if in the geological section of the terrain there are karst rocks, and tectonic elevations lead to their exposure) may leave a conspicuous evolutionary trace in the form of specific species of plants and animals which developed in a particular karst environment. The fact that such an environment facilitates a distinct specialization of organisms and formation of new species (not only underground) is confirmed by ecologists' researches. The number of endemic types there may reach over a dozen percent (in Tsyngi de Bemaraha Reserve in Madagascar even more). Without any doubt, karst stages in the development of a certain terrain on our planet contributed greatly to development and differentiation of its organic world.

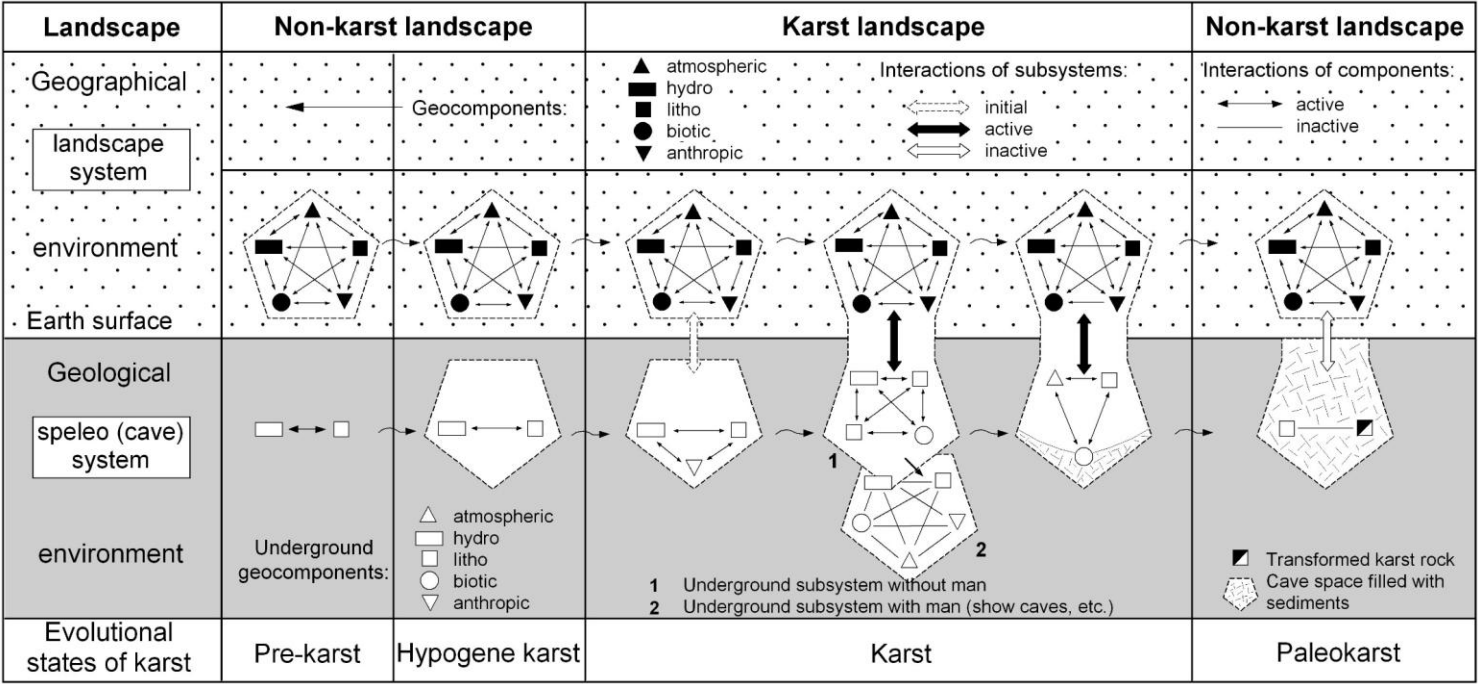


Fig. 13. An overall evolution of the karst landscape structures in comparison to the karst mega-cycle

PRINCIPLES OF THE PRESERVATION OF THE KARST LANDSCAPE

Systemic visions of the karst landscape (one of which has been presented above) have, in the author's opinion, practical significance and could find application in various aspects of reality: education within the earth sciences, land use and management in the karst terrains, preservation of karst and caves. In the text below an attempt is made to integrate landscape-systemic deliberations with the problem of the protection of karst objects and terrains – also at a rather general level.

Problems of the preservation of karst and caves

Karst landscapes, and especially caves, are precious and attractive terrains and nature objects, and quite often they are given legal protection. However, the effectiveness of this protection may vary. Even in the countries wherein absolute obedience to the preservation rules is in force and the level of environmental consciousness is high, there are problems with preserving karst objects and terrains, which most often result from neglecting the specificity of the natural processes taking place there (interactions of the subsystems). A far worse situation is in the countries of a transitional economy (e.g., in Eastern Europe), or in the countries intensely developing (China, South-East Asia) or developing (African and others). Those countries display an increasing tendency towards commercialisation of karst objects (their privatization, transformation into show caves, creating theme parks). In this situation, the questions of nature preservation become more burning and demanding a well-thought-out approach to the organization of the preservation.

An experience in the tourist exploitation of caves indicates, almost in the whole world, that a competent management of the object is

crucial for an effective protection, however it does not solve all real or potential problems. Despite an appropriate management of the karst object (terrain), its *nature degradation* is often observed. In the last decades of the 20th century, an anthropogenic factor, i.e. man was supposed to be responsible for this. It was often righteously assumed that while utilizing karst objects, certain critical values of their capacity were exceeded. Therefore special researches were carried out on how the tourist visitors influenced the protected object, and on that basis optimal number of visitors were determined.

This type of endeavour had a positive effect on the condition of the objects, nevertheless, in most cases it did not change the tendency towards degradation into the tendency towards stabilization or re-naturalization. It turns out that the actual cause of such a situation may be *an inappropriate approach to isolating the protected object from the karst landscape*. In the process of determining the boundaries of the protected objects or terrains, the natural specificity of the karst landscape was not taken into consideration (to a different extent, actually), i.e. its entirety and a profound significance of the conjugation of its terreneous and subterranean subsystems, the relation between the paragenetic elements, etc. On many occasions the taken decisions on nature preservation were not pursuant to explicitly established rules, often because of the lack of them. The systemic vision of karst allows formulating such rules (ANDREYCHOUK, STEFANOW, 2008).

The principles of preservation

According to the systemic concept, karst possesses *capability to create a system*, and in a certain way *organizes (and re-organizes) the environment for its development* by creating territorially coherent, functionally overall karst formations (geosystemic). In the karst landscape there is a spatial, functionally-dynamic and genetic (paragenetic) subordination of the inter-

acting elements. What is a prerequisite to understand the functioning of karst geo-systems, is careful examination of their structure and boundaries. Without this knowledge, it is not possible to determine correctly the appropriate (optimal) boundaries of the objects or terrains meant to be preserved. Using exclusively physiognomic, economic or law criteria and possibilities (instead of structural-functional) results in dividing the overall karst formations into artificial fragments, one of which is given protection whereas the others are unprotected. It may resemble preserving the main river while simultaneously neglecting to protect its tributaries.

It is known that the functioning and dynamics of the karst landscape and the geocomplexes (geosystems) which create it primarily consists in the leading interactions between its terraneous and subterranean parts (vertical connections). Moreover, the relations between them have not only a paradyamic but paragenetic character. This means that the events happening in one subsystem not only influence the state of the other one but also trigger off qualitative reactions within it, which change the course of the processes. For example, a sinkhole formation on the surface of the earth (the influence of the subterranean subsystem) changes the character of the surface drainage (catching up flows, formation of a local basin, etc.), whereas deforestation in the terraneous subsystem induces an alteration in the formation of dripstones in the caves located beneath, etc.

This structural predisposition – a layered vertical structure of karst geosystems and a functional unity of the subsystems, leads to the valid conclusion upon which the first principle of the preservation of karst objects and terrains is based: *preserving the subterranean part of the karst geo-system should not be separated from preserving its terraneous component, for example, preserving a cave pattern without taking care of the surface above it, or conversely: preserving the terraneous karst geocomplex while neglecting the cavities beneath it. The preservation*

of the karst object or terrain should be complex, taking into account the two-element character of the karst landscape.

No less important is taking into consideration the specificity of the karst landscape horizontal structure, including its bigger geocomplex component units, i.e. terrain level. As it has been pointed out above, the units of the horizontal (morphological) structure of KL create a mosaic, characteristic of a particular landscape, consisting of hierarchically organized units of a lesser taxonomic rank. This mosaic is combined into a whole by the streams of material and energy between the units. The streams combine the units into specific paradyamic and paragenetic lateral geosystems (the aforementioned example of a concave karst form and its basin).

Paradyamic and paragenetic relations are also characteristic of bigger geocomplex units of the landscape, e.g. a complex karst depression and its basin, a big karst ponor and a small river system drained by the ponor, the coastal zone (together with large karst springs) and karst massifs towering above it, etc. From this fact stems another conclusion concerning environmental preservation: *while determining the boundaries of terrains or objects selected for preservation, it is necessary to take into account existing in KL lateral paragenetic connections between its elements (geocomplexes). Moreover, the dimensions of the protected part of the landscape should not merely correspond to the size of the protected karst object, but be widened to comprise the whole paradyamic (paragenetic) system connected with it.* This constitutes the second vital rule of planning and realizing the preservation of karst objects and terrains, resulting from the KL nature.

Problematic situations

Taking into consideration a vertical aspect of KL structure, the preservation of karst should be based on the common principle of the integrated preservation of its terraneous and subterranean subsystems, while from a hori-

zontal aspect – the paradyamic surroundings of karst objects ought to be taken into account. Both of the postulated rules seem to be obvious. Nevertheless, putting them into practice is often connected with complications, especially at the planning stage of preservation. Assuming that formally we are given the green light to deciding upon the spatial extent of the object or terrain to be preserved, we have to be aware of some factual difficulties with drawing their optimal boundaries (structural-functional). These problems are frequently caused by the fact that the spatial boundary of the terraneous does not coincide with the boundary of the subterraneous components of the karst geosystem (geocomplex). Several aspects of this mismatch may be distinguished, for example:

- a spatial discrepancy between the boundaries resulting from the character of the occurrence of karst rocks;
- a spatial discrepancy between the boundaries due to functional peculiarities of the terraneous and subterraneous parts of the karst geocomplex.

This problem is especially acute in the mountain areas wherein the occurrence of karst rocks may have a sporadic (discontinuous, spotted, streaked) character dependent on the tectonic structure of the terrain. In the mountains, series of karst rocks are also folded (undulated) and appear in the form of monoclines or *cuestas* emerging from upon the series of non-karst rocks. Fig. 14 shows several cases of a tectonically conditioned mismatch between the vertical boundaries of terraneous and subterraneous subsystems. On the other hand, coinciding of the boundaries occurs in

flatland karst (platform), which is characterised by horizontal occurrence of karst rocks. In such conditions, a geosystem limiting factor is often constituted by faults, that form natural boundaries of karst terrains and their functionally linked parts (Fig. 14 A-1). The discrepancy also takes place in the case of geological isolation of karstifying “bodies”, for example, huge reef massifs or salt domes (Fig. 14 A-2). In the flatland karst, the situation is influenced by the character (extent) of the erosional opening of the karst rock series. In the places where the cover of non-permeable non-karst sediments is considerable (from few dozens to few hundred meters in thickness), the subterraneous subsystem of the landscape may be deprived of the direct interaction with the terraneous subsystem (Fig. 14 B).

The functional aspect concerns primarily a frequent discrepancy between hydrological boundaries of terraneous and subterraneous basins of paradyamic geosystems of KL. This issue occurs more often and regularly in mountain terrains. In most cases, the marked boundaries of subterraneous basins do not coincide with watersheds on the surface.

Neglecting the specific nature of KL, as well as the aforementioned problems with determining appropriate boundaries of karst geosystems or geocomplexes constitute an important reason for inadequate or ineffective preservation of karst objects. Fig. 15 shows some anonymous, literally banal situations – examples of errors in determining nature preserving boundaries of karst objects, which negatively affected the effectiveness of their preservation.

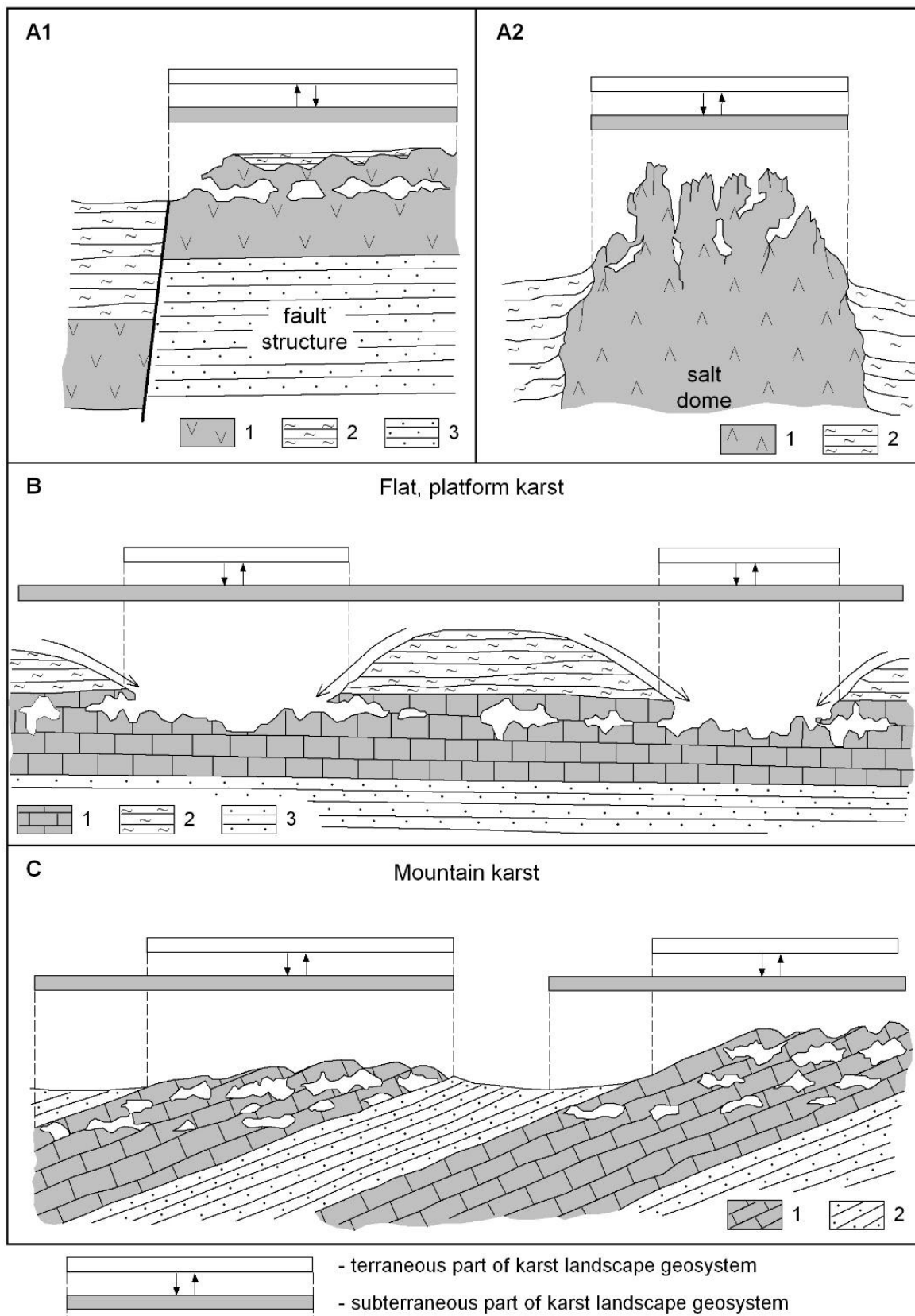


Fig. 14. Some examples of the tectonic and erosional determinants of the discrepancy between the vertical boundaries of terraneous and subterranean subsystems of the karst landscape

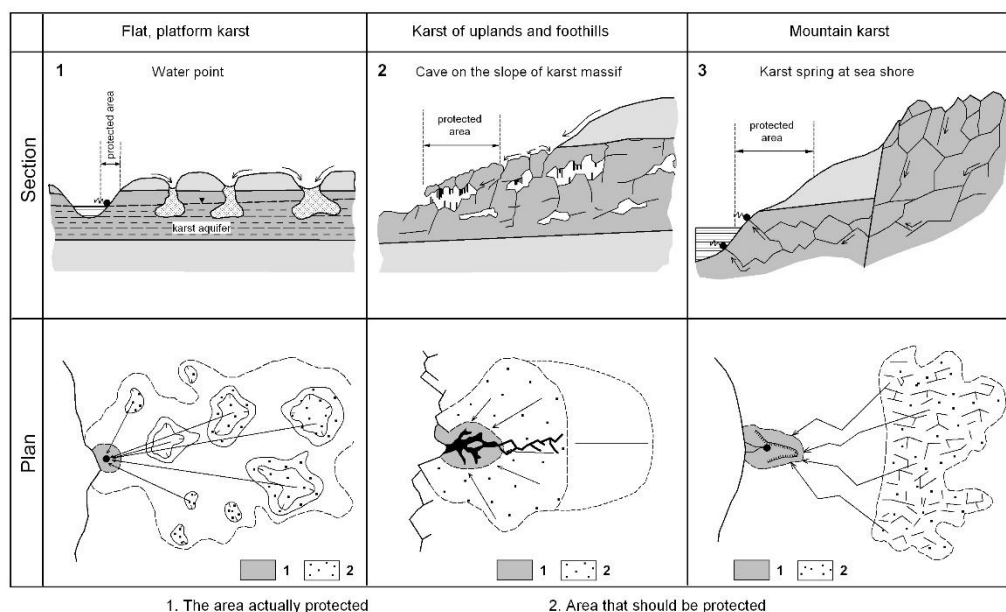


Fig. 15. Some examples of protected karst objects and areas, illustrating a non-adequate character of the functioning of the objects (as geosystems) and their protection

The case 1 in Fig. 15 refers to the conditions of the covered karst of the flatland, with a well developed karst aquifer. Karst water is used for economic purposes, among others, as drinking water. Protection has been provided to the fragment of the surface directly connected with the water intake, whereas the superficial karst forms which feed the aquifer (dolines and depressions) remain totally unprotected in the surrounding area, i.e. within a several-kilometre radius of the intake. Moreover, as it was established during the research, some of the forms are used by the inhabitants of the neighbouring villages as “convenient” (as everything disappears from there!) refuse dumps and even places of utilizing dead bodies of domestic animals. Considering the specificity of this terrain, the status of the restricted preservation should be extended to a considerable larger area, and the ban on dumping rubbish or contaminants into karst forms and fencing them off, etc., introduced.

The second case is also rather typical. It concerns protected caves, including tourist ones. The preservation of the object automatically spreads onto the fragment of the karst massif which constitutes a direct projection of the cave system. Meanwhile, the terraneous

areas beyond the boundaries of this projection, which is dynamically (hydrodynamically, aerodynamically) linked with the subterraneous subsystem through karst dolines, ponors, fissures or cave openings, are not protected. In such cases, a terrain of a significantly larger area should be preserved. Its size and shape (the latter may have a very irregular and complicated character) is determined basing on the results of the system oriented research.

The case 3 is related to coastal terrains, where in the inshore zone we deal with the karst spring whose recharge area is located in the mountain massifs towering over the coast (typical of Mediterranean terrains, Crimea, Caucasus, etc.). The coastal karst springs are very spectacular – they impress with their size (outflowing rivers), the colour of water (turquoise, greenish), the way they flow out onto the surface (spring of vaucluse type, waterfalls etc.). And thus, because of their attractiveness or practical value they are frequently preserved. However, merely the zone directly adjacent to the spring is generally protected, whereas the area of its recharge (mountain karst plateau, etc.), which actually may be located several to dozen kilometres away (in the mountains), is not. Such a situation is not as

common as the previous ones, since coastal karst massifs and plateau are usually preserved as recreation areas, wildlife parks, nature reserves, etc., which generally solves the problem, at least partially. In this case, what would be considered as really adverse is deforestation of the massif surface (which unfortunately took place in the past). A certain threat to the purity (quality) of spring water may be posed by contamination of the caves, which is associated with speleological expeditions, for example, with calcium carbide used earlier to light the caves during their exploration.

To recapitulate, the preservation of karst objects and terrains should take into consideration and be based on their natural (karst) specificity as well as structural-functional pe-

culiarities. While carrying out nature preserving projects, the first stage of designing the karst geocomplex to be preserved (geosystem) is especially vital, since even at this very stage serious problems, connected with the future preservation or restricted economic exploitation of the protected object or terrain, might be avoided.

Acknowledgements

The author would like to express his gratitude to Prof. Derek Ford (Canada) for detailed linguistic revision of the English part of this work.

LITERATURA – REFERENCES

- Andreychouk V., 2007: Karst as geoecological factor. Sosnowiec-Simferopol: 137 p. (in Russian).
- Andreychouk V., 2009: System nature of karst landscape. In: *Speleology and Karstology*, Simferopol, 3: 47–59. (in Russian).
- Andreychouk V., 2010: About the approaches to karst study. In: *Speleology and Karstology*, Simferopol, 4: 5–10. (in Russian).
- Andreychouk V. N., Klimchouk A. B., 2001: Geomicrobiology and Redox Geochemistry of the Karstified Miocene Gypsum Aquifer, Western Ukraine: The study from Zoloushka Cave. *Geomicrobiology*, 18, 3: 275–295.
- Andreychouk V., Proskurnyak M., 1993: Problematic questions of karst landscape study. In: *Problems of karst landscapes study*. Perm: 67–75. (in Russian).
- Andreychouk V., Stefanov P., 2008: Principles of protection of karst areas. In: *Speleology and Karstology*, Simferopol, 1: 54–59. (in Russian).
- Andreychouk V., Voropai L., 1993: Karst landscape and geosystem. In: *Problems of karst landscapes study*. Perm: 37–52. (in Russian).
- Bella P., 2008: Jaskyne ako prirodné geosystémy. Geokologický výskum a environmentálna ochrana. Liptovský Mikuláš: 166 s.
- Chikishev A., 1975: Geographical conditions of karst development. Moscow: Moscow University Publish. House: 111 p. (in Russian).
- Chikishev A., 1979: Problems of karst study of Russian Plain. Moscow: Moscow University Publish. House: 303 p. (in Russian).
- Ford D., Williams P., 2007. *Karst Hydrogeology and Geomorphology*. Chichester: Wiley, 562 p.
- Gergedava B., 1983: *Underground landscapes*. Tbilisi. Mecniereba: 137 p. (in Russian).
- Gvozdetzkiy N., 1954: *Karst* (2-nd ed.). Moscow: Geografiz: 352 p. (in Russian).
- Gvozdetzkiy N., 1972: *Problems of karst study and practice*. Moscow: Mysl: 391 p. (in Russian).
- Gvozdetzkiy N., 1977: Karst landscapes and their rank related to karst types. In: *The question of general and regional karstology*. Moscow: 3–23. (in Russian).
- Gvozdetzkiy N., 1988: *Karst landscapes*. Moscow: Moscow University Publish. House: 112 p.
- Hunton P. W., 1995: Is it appropriate to apply porous media groundwater circulation models to karstic aquifers? In: *Groundwater models for resources analysis and management* (Ed. Aly I.E.-K.). - Boca Raton: Lewis Publishers: 339–358.
- Jakal J., 1986: Krasová krajina ako špecifický prirodný geosystém. *Slovenský kras*, 24: 3–26.
- Jakucs L., 1977: *Morphogenetics of karst regions. Variants of karst evolution*. Budapest: 387 p.

- Klimchouk A., 1996: The typology of gypsum karst according to its geologic and geomorphologic evolution. In: Gypsum karst of the world: International Journal of Speleology, 25, 3–4: 49–60.
- Klimchouk A. B., 2007: Hypogene speleogenesis: Hydrogeological and morphogenetic perspective. Carlsbad: National Cave and Karst Research Institute: 106 p.
- Klimchouk A. B., 2010a: Evolutionary typology of karst. In: Speleology and Karstology, 4: 23–32.
- Klimchouk A. B., 2010b: Hypogene speleogenesis. In: Treatise on Geomorphology, 12: Karst Geomorphology (ed. A. Frumkin). Elsevier.
- Klimchouk A., Andreychouk V., 2010: About the essence of karst. In: Speleology and Karstology, Simferopol, 5: 22–47. (in Russian).
- Klimchouk A. B., Ford D. C., Palmer A. N., Dreybrodt W. (Eds.): 2000: Speleogenesis: Evolution of Karst Aquifers. Huntsville: National Speleological Society: 527 p.
- Miller G., 1974: Landscape study of mountains and pre-mountains areas. Lviv, Vyscha Shkola Publish. House: 201p. (in Russian)
- Perelman A., 1966: Geochemistry of landscape. Moscow: Vysshaya Shkola: 391 p. (in Russian).
- Salomon J. N., 2000: Précis de Karstologie. Presses Universitaires de Bordeaux: 250 pp.
- Salomon J. N., Pulina M., 2005: Les karsts des régions climatiques extrêmes. Presses Universitaires de Bordeaux: 220 pp.
- Sweeteng M., 1972: Karst Landforms. Macmillan: 362 pp.
- Proskurnyak M., Andreychouk V., 1998: The structure of karstified landscapes. Chernivtsy: 88 p. (in Russian).
- Proskurnyak M., Andreychouk V., 1999: Landscape genesis and land use within the karstified areas. Chernivtsy: 87 p. (in Russian).
- Sokolov D., 1962: The main conditions of karst development. Moscow: Gosgeoltechizdat: 321 p. (in Russian).
- Vidina A., 1970: About the diagnostic features of landscape and its morphological parts. In: Landscape Miscellanea. M: Moscow University Publish. House: 160–181 (in Russian).
- Voropai L., Andreychouk V., 1985: The peculiarities of karst landscapes as geosystems. Chernivtsy: Chernivtsy University Publish. House: 81 p. (in Russian).
- White W. B., 1988: Geomorphology and hydrology of karst terrains. New York, Oxford Univ. Press: 464 pp.
- Цвијић Ј., 1991: Карст. Географска монографија. Нови резултати о лацијалнојепоси Балканскога полуострва. Друго издање, Београд: 407 с.

Wpłynął do redakcji: 10 maja 2026

Поступила в редакцию: 10 мая 2026

Received: 10 May 2026

Wiaczesław Andrejczuk¹, Tadeusz Szczypek², Wojciech Puchejda³, Bruno Josef Merta⁴

¹Akademia Górnośląska im. Wojciecha Korfanteo w Katowicach, ul. Harcerzy Września 3, 40-659 Katowice, Polska; e-mail: wiaczeslaw.andrejczuk@gwsh.com (ORCID 0000-0002-9656-4542)

²Uniwersytet Śląski, Instytut Nauk o Ziemi, ul. Będzińska 60, 41-200 Sosnowiec, Polska; e-mail: bajka158@wp.pl (ORCID 0000-0002-9123-080X)

³Bielsko-Biała, Polska; e-mail: puchejda@poczta.onet.pl

⁴Mönchengladbach, Niemcy; e-mail: bmerta@arcor.de

„Góry Cukierkowe” w Azerbejdżanie – interesujący obiekt geologiczny i turystyczny

Андрейчук В., Щипек Т., Пухэйда В., Мэрта Б. Йо. „Леденцовые горы” в Азербайджане — **интересный геологический и туристический объект**. Описаны: 1) расположение „Леденцовых гор” в юго-восточной части Большого Кавказского хребта (северо-восточная часть Азербайджана) в северной части Гобустанской полупустыни в зоне относительно мягкого континентального и полупустынного климата с жарким, сухим летом и прохладной зимой; 2) литологические особенности: красные, оранжевые, зеленоватые и белые породы мелового возраста (в основном альбского и сеноманского ярусов): сланцы, песчаники, известняки и глины; 3) обнажения этих пород в виде цветных полос (результат воздействия грунтовых вод); 4) нарушенная структура горных пород: сильно складчатые и наклонные осадочные слои, прорезанные многочисленными разломами, связанными с альпийским орогенезом в неогене. Эти особенности делают „Леденцовые горы” интересным и важным туристическим объектом.

Andrejczuk W., Szczypek T., Puchejda W., Merta B. J. **"Candy Cane Mountains" in Azerbaijan – an interesting geological and tourist site**. The following are described: 1) the location of the "Candy Cane Mountains" in the southeastern part of the Greater Caucasus Range (NE part of Azerbaijan) in the northern part of the Gobustan Semi-Desert in a zone of relatively mild continental and semi-arid climate with hot, dry summers and cool winters; 2) lithological features: red, orange, greenish, and white Cretaceous rocks (mainly from the Albian and Cenomanian): shales, sandstones, limestones, and clays; 3) outcrops of these rocks in the form of colored bands (result of groundwater impact); 4) the disturbed rock structure: strongly folded and inclined sedimentary layers cut by numerous faults, related to the Alpine orogenic activity in the Neogene. These features make the "Candy Cane Mountains" an interesting and important tourist destination.

Andrejczuk W., Szczypek T., Puchejda W., Merta B. J. **„Zuckerstangenberge” in Aserbajdschan – eine interessante geologische und touristische Stätte**. Folgendes wird beschrieben: 1) Die Lage des „Zuckergebirges” im südöstlichen Teil des Großen Kaukasus (Nordosten Aserbajdschans) im nördlichen Teil der Gobustan-Halbwüste in einer Zone mit relativ mildem kontinentalem und semiaridem Klima mit heißen, trockenen Sommern und kühlen Wintern; 2) lithologische Merkmale: rote, orange, grünliche und weiße Gesteine aus der Kreidezeit (hauptsächlich aus dem Albium und Cenomanium): Schiefer, Sandsteine, Kalke und Tone; 3) Aufschlüsse dieser Gesteine in Form farbiger Bänder (Folge der Grundwasserbeeinträchtigung); 4) die gestörte Gesteinsstruktur: stark gefaltete und geneigte Sedimentschichten, durchzogen von zahlreichen Verwerfungen, die mit der alpinen Gebirgsbildung im Neogen in Zusammenhang stehen. Diese Merkmale machen das „Zuckergebirge” zu einem interessanten und bedeutenden Touristenziel.

Słowa kluczowe: Azerbejdżan, Wschodni Kaukaz, strefa strukturalna Sahdag-Xizi, „Góry Cukierkowe”
Ключевые слова: Азербайджан, Восточный Кавказ, структурная зона Шахдаг-Хызы, „Леденцовые горы”

Key words: Azerbaijan, Eastern Caucasus, structural zone Sahdag-Xizi, “Candy Cane Mountains”

Schlüsselwörter: Aserbajdschan, Ostkaukasus, Sahdag-Xizi-Strukturzone, „Zuckerberge”

Zarys treści

Opisano: 1) lokalizację „Gór Cukierkowych” w południowo-wschodniej części pasma Wielkiego Kaukazu (NE część Azerbejdżanu) w północnej części Półpustyni Gobustańskiej w strefie dość łagodnego klimatu kontynentalnego i półpustynnego z gorącym suchym latem i chłodną zimą, 2) cechy litologiczne: czerwone, pomarańczowe, zielonkawe i białe skały kredowe (głównie z albu i cenomanu): łupki, piaskowce, wapienie, iły, 3) wychodnie tych skał w postaci kolorowych pasów (wynik oddziaływania wód podziemnych), 4) zaburzoną strukturę skał: silnie sfałdowane i nachylone warstwy osadowe poprzecinane licznymi uskokami, związane z górotwórczością alpejską w neogenie. Wspomniane wyżej cechy powodują, że „Góry Cukierkowe” stanowią ciekawą i ważną destinację turystyczną.

Dość nietypowe, poetyckie określenie: **Candy Cane Mountains/Góry Cukierkowe** – w stosunku do obiektu geologiczno-geomorfologicznego – wprowadził angielski podróżnik i pisarz M. ELLIOTT (1999), ze względu na specyficzne ułożenie, a zwłaszcza kolorystykę skał. Wspomniane góry – jako fragment Gór Chizi (горы Хызы/Xızı Dağları) leżą w północno-wschodnim Azerbejdżanie na południowo-wschodnich krańcach (Wielkiego) Kaukazu, który niemal sięga tutaj M. Kaspijskiego (rys. 1–3).

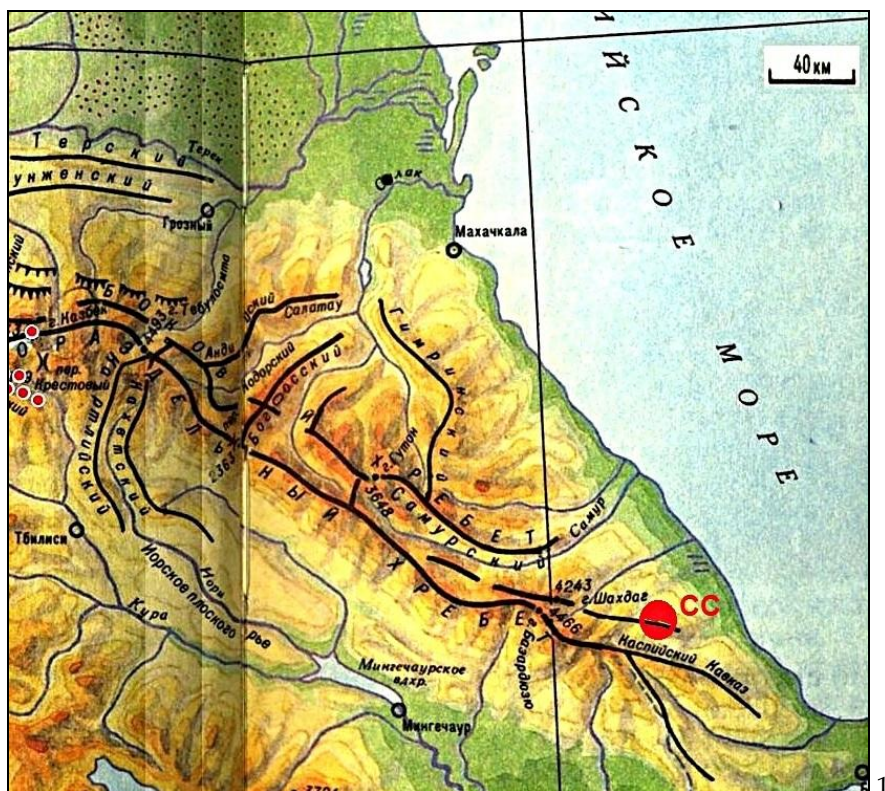
Cytowane przykładowe rysunki wskazują, że wschodnia część Wielkiego Kaukazu dzieli się na szereg grzbietów górskich, przy czym ich przebieg i nazwy (łącznie z nazewnictwem wierzchołków) są różnie znaczone

i określane. Główne pasmo, to Pasma Kaukaskie (Кавказский хребет/Qafqaz silsiləsi), zwane też Pasmem Wododziałowym (Водораздельный хребет/Su hövzəsi silsiləsi). W granicach Azerbejdżanu rozpoczyna się ono od szczytu Bazardüzü (Базардюзю) – 4 466 lub 4 489 m n.p.m. (na granicy tego państwa z Rosją) i – biegnąc ku południowoschodowi – wyraźnie obniża się. W sąsiedztwie Bazardüzü istnieją jeszcze wysokie wierzchołki: Szachdag (Шахдаг/Şahdağ) – 4 243 lub 4 255 m n.p.m., Tufandag (Туфандаг/Tufandağ) – 4 191 m n.p.m., dalej na południowoschód Babadag (Бабадаг/Babadağ) – 3 637 m n.p.m. (rys. 1–3).

Na wschód od Babadag Grzbiet Wododziałowy rozpada się na trzy niewysokie, stopniowo obniżające się odnogi rozdzielone dolinami rzecznyymi:

1. północną, najwyższą z kulminacją Dubrar (ДюбRAP/Dübrar Dağ) – 2 205 m n.p.m., kończącą się koło Sumgait wzniesieniami o wysokości około 320 m n.p.m.,
2. środkową – wkraczającą w postaci niewysokich wzgórz na teren Płw. Apszerońskiego,
3. południową – biegnącą ku SE aż do Niziny Kurańskiej (por. głównie rys. 3) (KASZKAJ, ALIJEW, 1945; TARICHAZER, 2024 i in.).

Wschodnia część Wielkiego Kaukazu, podobnie jak i cały Kaukaz, cechuje się – najogólniej rzecz ujmując – skomplikowaną tektoniką: strukturą fałdową z licznymi nasunięciami i uskokami, dotyczącą utworów środkowego i górnego mezozoiku (jura i kreda) oraz paleogenu i neogenu. Przykład takiej złożonej budowy ilustruje uproszczony przekrój na rys. 4.



Rys. 1-3 – Рис. 1-3 – Fig. 1-3: Przybliżona lokalizacja Gór Cukierkowych (Kolorowych) CC na tle grzbietów górskich Wschodniego Kaukazu w Azerbejdżanie – Приблизительное местоположение Леденцовых гор CC на фоне горных хребтов Восточного Кавказа Азербайджана –

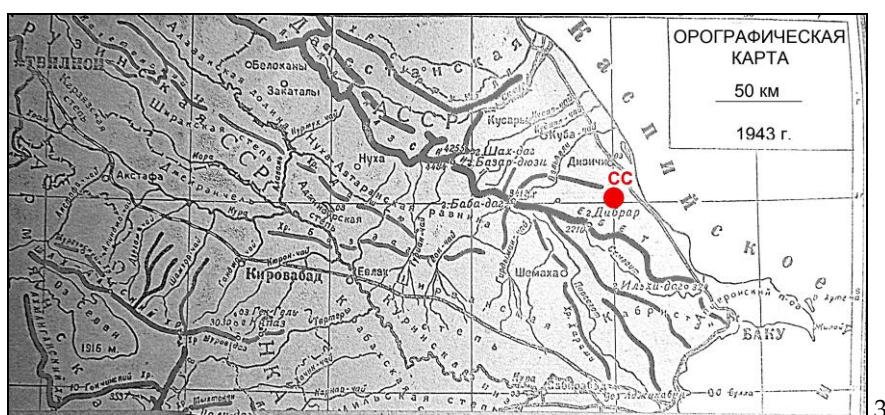
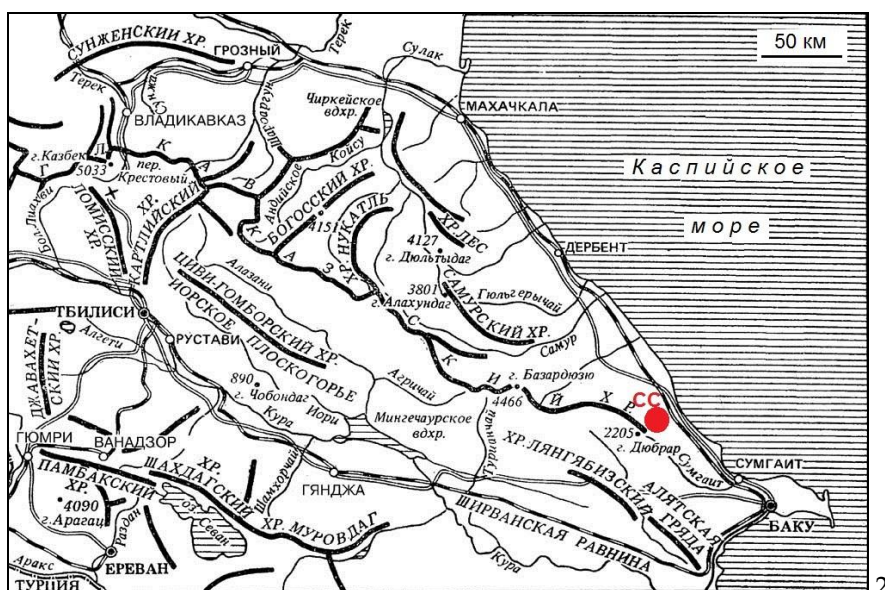
Approximate location of the Candy Cane Mountains (Colorful Mountains) CC against the background of the mountain ridges of the Eastern Caucasus in Azerbaijan

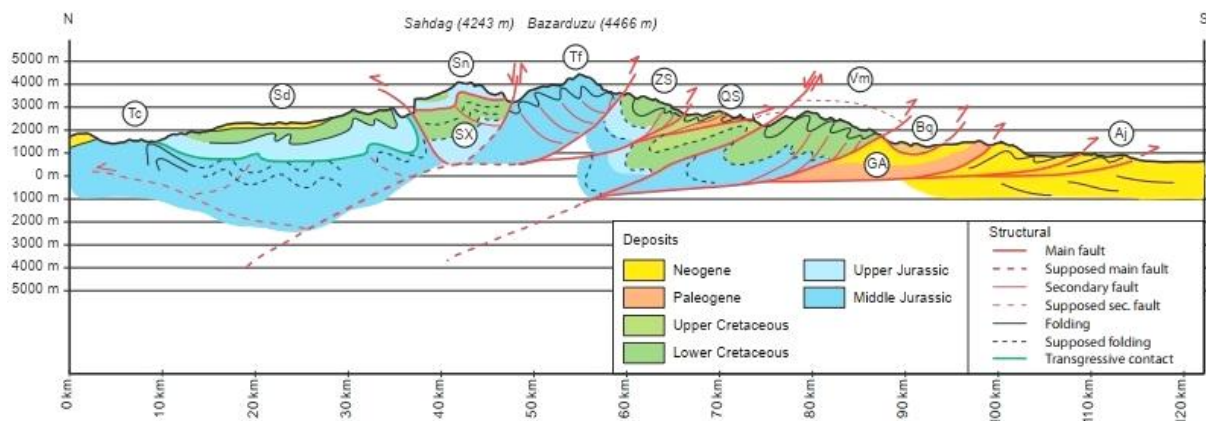
(podkład kartograficzny – картографический фон – cartographic background:

1 – https://fedoroff.net/load/maps/karta_karta_khrebtov_kavkaza/90-1-0-567

2 – <https://www.mountain.ru/useful/dictionaries/2006/klasiimg/Image1037.jpg>

3 – KASZKAJ, ALIJEW, 1945)





Rys. 4. Uproszczony przekrój przez Wielki Kaukaz (około 40 km na zachód od Candy Cane Mts) z głównymi strukturami i strefami strukturalnymi (wg: BOCHUD i in., 2011):

Tc: Tahircal Z.; Sd: Sudur Z.; Sn: Sahdag-Besbarmaq Z.; SX: Sahdag-Xizi Z.; Tf: Tufan Z.; ZS: Zaqatala-Sumqayit Z.; QS: Qovdag-Sumqayit Z.; Vm: Vandam Z.; Bq: Basqal Nappe; GA: Ganih-Ayricay Z.; Aj: Ajinour Z.

Рис. 4. Упрощенный поперечный разрез через Большой Кавказ (примерно в 40 км к западу от „Леденцовых гор”) с основными структурами и структурными зонами (по: BOCHUD и др., 2011):
Tc: Тахиркал З.; Sd: Судур З.; Sn: Шахдаг Бесбармак З.; SX: Шахдаг-Сызы З.; Tf: Туфан З.; ZS: Заратала-Сумгаит З.; QS: Ковдаг-Сумгаит З.; Vm: Вандам З.; Bq: Баскал Наппе; GA: Ганих-Айрикай З.; Aj: Аджинур З.

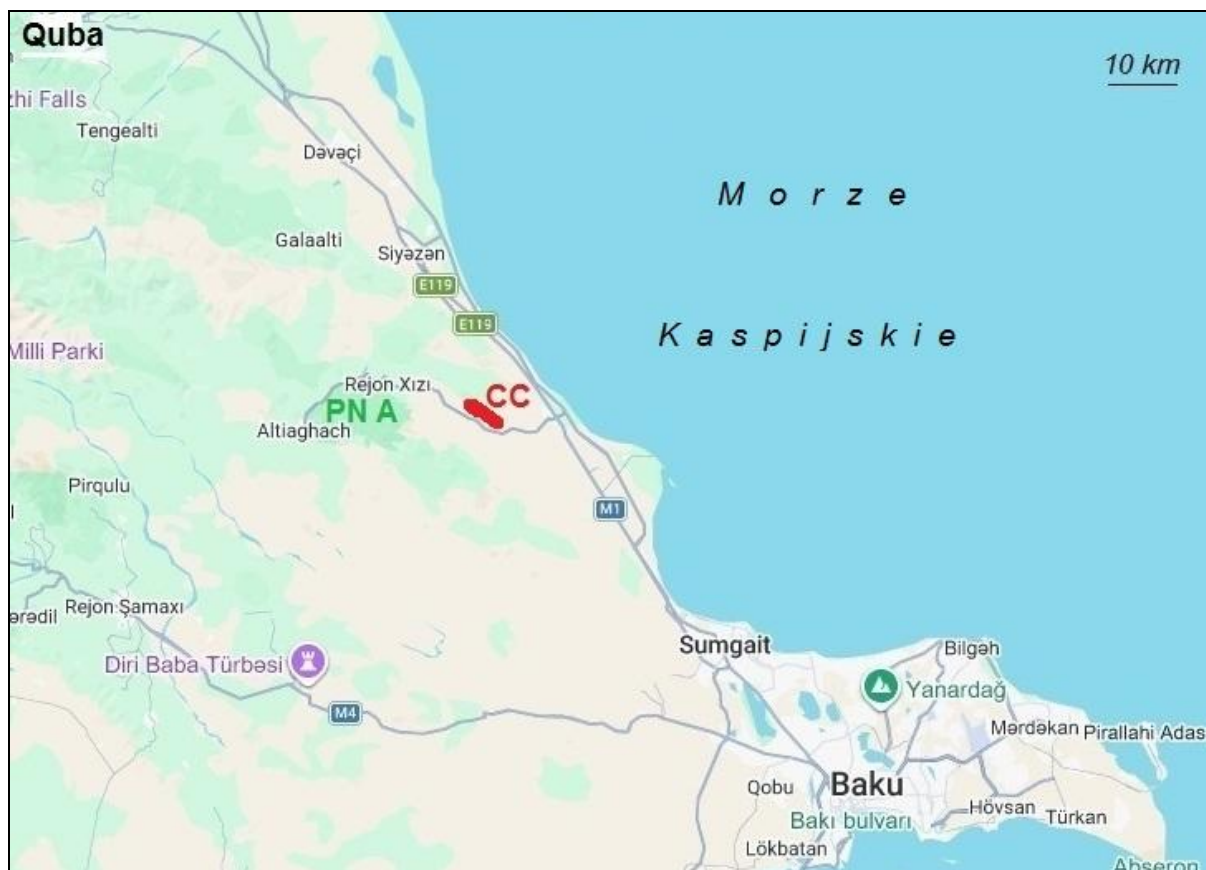
Fig. 4. Simplified cross-section through the Greater Caucasus (about 40 km west of the Candy Cane Mts) with main structures and structural zones (after: BOCHUD et al., 2011):

Tc: Tahircal Z.; Sd: Sudur Z.; Sn: SahdagBesbarmaq Z.; SX: Sahdag-Xizi Z.; Tf: Tufan Z.; ZS: Zaqatala-Sumqayit Z.; QS: Qovdag-Sumqayit Z.; Vm: Vandam Z.; Bq: Basqal Nappe; GA: Ganih-Ayricay Z.; Aj: Ajinour Z.

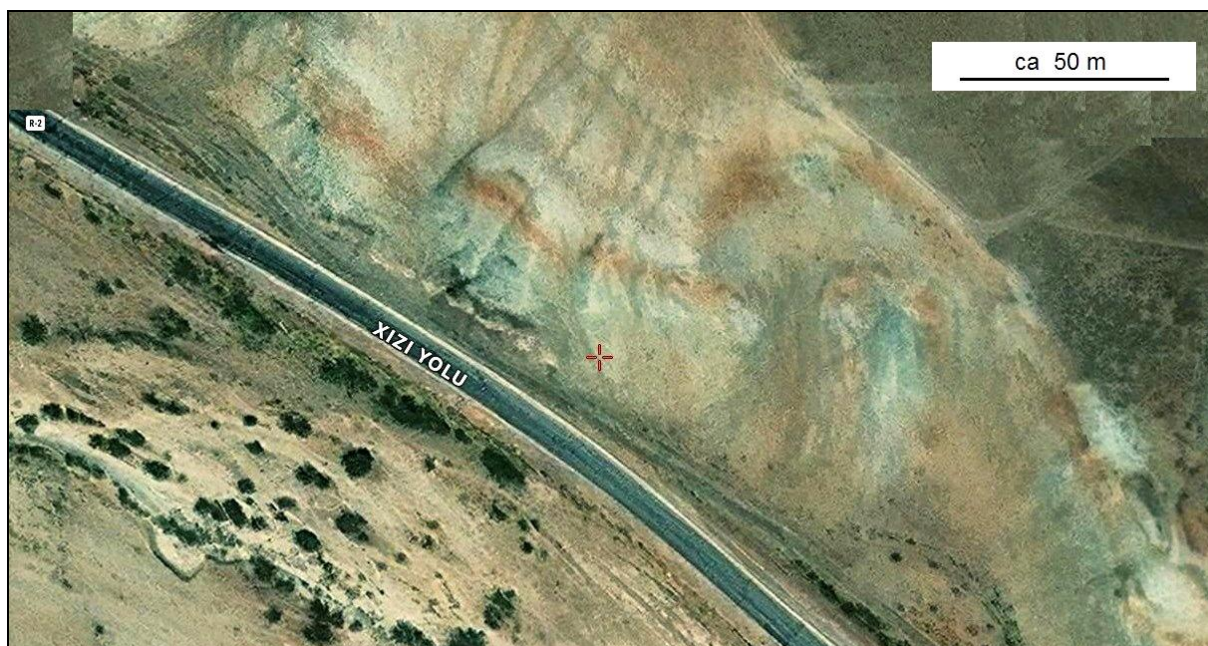
„Góry Cukierkowe” (Леденцовые горы/Карамельные горы/Агатые горы – Candy Cane Mts – Şəkər əsası dağları) leżą w połowie drogi między Baku a Quba, w regionie Xizi (Хызы), przy bocznej drodze do Altiaghach (Алтыгадж – Altiğac), nieco na wschód od Parku Narodowego Altiğac (Алтыгаджский

национальный парк – Altiğac Milli Parkı) (rys. 5).

Powiększony fragment obrazu satelitarnego (fot. 1) demonstruje niewielki wycinek „Gór Cukierkowych” po północnej stronie drogi do Chizi (Xızı yolu) z ich najbardziej charakterystyczną cechą: różnobarwnymi skałami.



Rys. 5. – Рис. 5 – Fig. 5: Lokalizacja Gór Cukierkowych **CC** (PN A – Park Narodowy Altiaghac; 1 – Wielki Kaukaz, 2 – Mały Kaukaz, 3 – G. Tałyskie) – Местопо-
ложение Леденцовых гор **CC** (PN A –
Алтыгаджский национальный парк;
1 – Большой Кавказ, 2 – Малый Кавказ,
3 – Талышские горы) – Location of the
Candy Cane Mountains **CC**; PN A – Alti-
aghac National Park; 1 – Great Caucasus, 2 –
Lesser Caucasus, 3 – Talysh Mountains
(podkład kartograficzny – картографи-
ческий фон – cartographic background:
<https://www.google.com/search?client=firefox-b-e&q=baku>)



Fot. 1. Fragment „Gór Cukierkowych” na obrazie satelitarnym
(źródło: https://satellites.pro/Altiagac_map#40.870781.49.205232.29)
Фот. 1. Фрагмент „Леденцовых гор” на спутниковом снимке
(источник: https://satellites.pro/Altiagac_map#40.870781.49.205232.29)
Photo 1. A fragment of the "Candy Cane Mountains" in a satellite image
(source: https://satellites.pro/Altiagac_map#40.870781.49.205232.29)

„Góry Cukierkowe” leżą na wysokości około 200–900 m n.p.m., w północnej części Półpustyni Gobustańskiej (por. SZCZYPEK i in., 2025), a więc w strefie dość łagodnego klimatu kontynentalnego i półpustynnego z gorącym suchym latem i chłodną zimą, kształtującego się pod wpływem M. Kaspijskiego. Średnia roczna temperatura powietrza w **Quba** (600–650 m n.p.m.) wynosi 10,4°C, średnie letnie temperatury powietrza około 21°C, średnie maksymalne są rzędu 26°C (<https://ru.climate-data.org/азия/азербайджан/кубинский-район/куба-23897/> – za okres 1991–2021), w **Baku** (-28 m.n.p.m.) – odpowiednio: 14,5°C, około 25°C i około 29°C (<https://ru.wikipedia.org/wiki/Баку> – brak okresu pomiarów). Z kolei średnie temperatury zimowe wynoszą: w **Quba** – około 0,3°C (w styczniu są ujemne) (<https://ru.climate-data.org/азия/азербайджан/кубинский-район/куба-23897/>), w **Baku** – około 5°C (<https://ru.wikipedia.org/wiki/Баку>).

Średnia roczna suma opadów w **Quba** (źródło: j.w.) wynosi 846 mm, suma letnia – 264 mm, w **Baku** (źródło: j.w.) – odpowiednio: 201 mm i (zaledwie) 16 mm. Zapewne bardziej wiarygodne dla „Gór Cukierkowych” są dane z punktów znacznie bliżej położonych:

Altiaghach (1 150–1 200 m n.p.m.) – suma roczna 405 mm i suma letnia – 106 mm oraz dla **Chizi** (700–750 m n.p.m.) – suma roczna 340 mm i suma letnia – 88 mm (SULTANOV, AGABALAYEV, 2015 – bez podanego okresu pomiarów).

Powyższe warunki termiczne oraz opadowe powodują, że w omawianych górach i w ich sąsiedztwie panuje skąpa roślinność półpustynna (fot. 2), a podłoże jest w większości pocięte szczelinami z wysychania (fot. 3).



Fot. 2. Skąpa roślinność półpustynna w „Górach Cukierkowych” (fot. T. Szczypek, 2024)

Фот. 2. Редкая полупустынная растительность „Леденцовых гор” (фот.: Т. Щипек, 2024)

Photo 2. Sparse semi-desert vegetation in the Candy Cane Mountains (phot. by T. Szczypek, 2024)



Fot. 3. Grunt w „Górach Cukierkowych” pocięty szczelinami z wysychania (fot. B. J. Merta, 2024)

Фото 3. Земля в „Леденцовых горах”, изрытая трещинами усыхания (фот.: Мэрта Б. Йо., 2024)

Photo 3. The ground in the "Candy Cane Mountains" cut with shrinkage cracks (phot. by B. J. Merta, 2024)

Główną górską strefą strukturalną, w której granicach znajdują się „Góry Cukierkowe” jest Szachdag-Xizi (*Shahdag-Xizi / Şahdağ-Xizi / Шахдаг-Хизи*) (por. SX na rys. 4).

Pod względem litologicznym składa się ona głównie z jurajskich i górnokredowych utworów wapiennych i ilastych. Pod względem strukturalnym natomiast jest zaburzona licznymi nasunięciami i przykryta płaszczwiną Szachdag-Besbarmaq (*Sahdag-Besbar-*

maq / Şahdağ-Besbarmaq/Шахдаг-Бешбармаз) (por. Sn na rys. 4). Z tego powodu na większości obszaru utwory strefy Szachdag-Xizi są w zasadzie niewidoczne na powierzchni. Sytuacja dość radykalnie zmienia się na wschód od miejscowości Xizi, gdzie pojawiają się wychodnie skalne tej strefy w postaci „Gór Cukierkowych” (BOCHUD i in., 2011) (por. rys. 5).

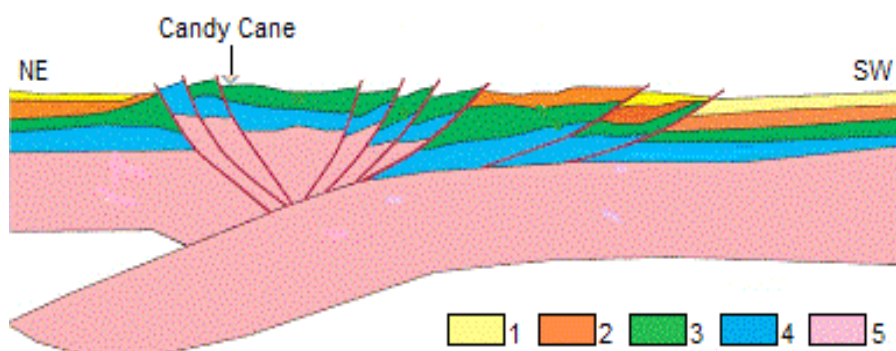


Fot. 4. „Góry Cukierkowe”
– widok ogólny
Фот. 4. „Леденцовые горы” – общий вид
Photo 4. “Candy Cane Mountains” – general view
(wg – по – after:
<https://testour.az/blog/candy-cane-mountains>)

Charakterystycznymi cechami „Gór Cukierkowych” są:

- różnobarwne osady: drobnoziarniste łupki i łyły tworzące białe, szare i zielonkawe pasy, wapienie i piaskowce również w jasnych odcieniach. Z kolei związki żelaza (tlenki żelaza – hematyt Fe_2O_3) powodują jasnoczerwone, różowe i pomarańczowe zabarwienie skał w wyniku oddziaływania wód podziemnych (por. fot. 1, 2, 4 i dalsze),
- układ pasowy wspomnianych kolorowych skał,

- wiek skał: osady z okresu kredowego, głównie z piętra albu i cenomanu (młodszy od albu), czerwone i zielonkawe warstwy łupków pochodzą z górnego aptu (BOCHUD i in., 2011; SEYIDOVA i in., 2019a, b; <https://dustoftheworld.com/travel-blog/midst-azerbaijans-incredibly-colorful-candy-cane-mountains/>; <https://www.atlasobscura.com/places/candy-cane-mountains>; www.science.gov.az) (rys. 6 i 7),



Rys. 6. Schematyczny przekrój przez pasmo Wielkiego Kaukazu na linii Candy Cane (wg: SEYIDOVA i in., 2019a):

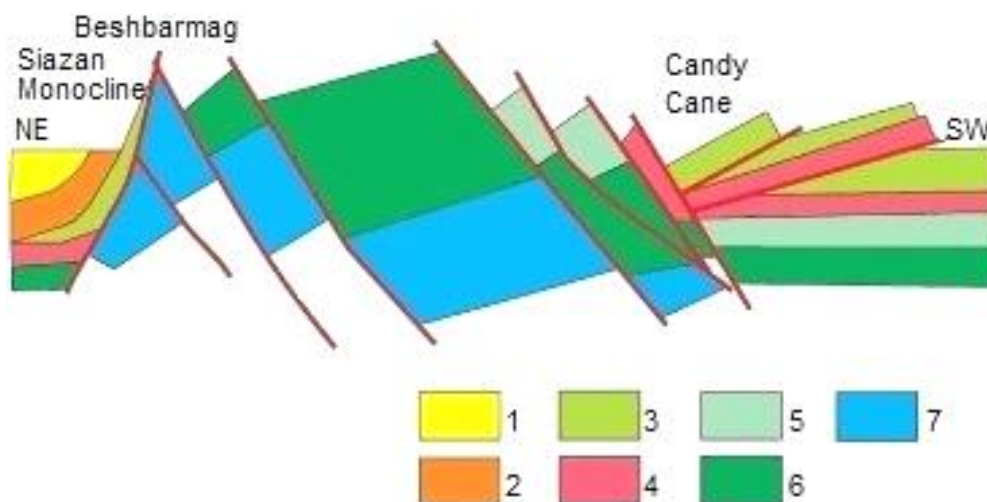
1 – neogen, 2 – paleogen, 3 – kreda, 4 – jura, 5 – starsze skały podłoża

Рис. 6. Схематический поперечный разрез Большого Кавказского хребта вдоль линии „Леденцовых гор” (по: SEYIDOVA и др., 2019a):

1 – неоген, 2 – палеоген, 3 – мел, 4 – юра, 5 – более древние породы субстрата

Fig. 6. Schematic cross-section across Greater Caucasus along the Candy Cane Mts line (after: SEYIDOVA et al., 2019a):

1 – Neogene, 2 – Paleogene, 3 – Cretaceous, 4 – Jurassic, 5 – older substrate rocks



Rys. 7. Schematyczny przekrój przez Candy Cane i najbliższe okolice (wg: SEYIDOVA i in., 2019a):

1 – neogen, 2 – paleogen; górna kreda: 3 – alb, 4 – apt, dolna kreda: 5 – berias/walanżyn, 6 – hoteryw/barrem, 7 – jura

Рис. 7. Схематический поперечный разрез через „Леденцовые горы” и их окрестности (по: SEYIDOVA и др., 2019a):

1 – неоген, 2 – палеоген; верхний мел: 3 – альбский ярус, 4 – аптский ярус; нижний мел: 5 – берриасский/валанжинский ярус; 6 – гаутеривский/барренский ярус, 7 – юра

Fig. 7. Schematic cross-section through Candy Cane Mts and the immediate vicinity (after: SEYIDOVA et al., 2019a):

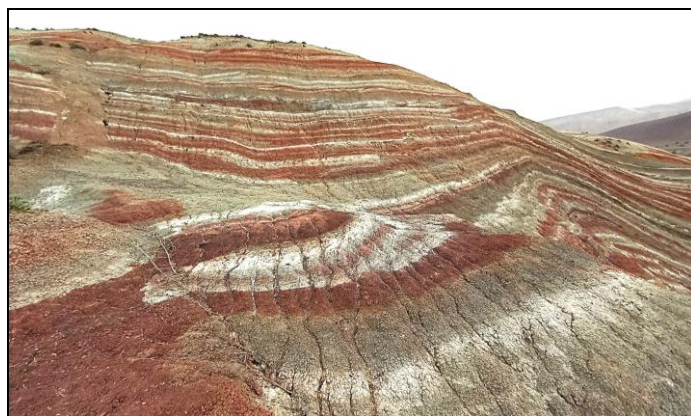
1 – Neogene, 2 – Paleogene; Upper Cretaceous: 3 – Albian, 4 – Aptian, Lower Cretaceous: 5 – Berriasian/Valanginian, 6 – Hauterivian/Barrenian, 7 – Jurassic

- złożona struktura: silnie sfałdowane i nachylone warstwy osadowe poprzecinane licznymi uskokami (por. rys. 6 i 7 oraz fot. 2 i 4, a także 5–7) (BOCHUD i in., 2011; SEYIDOVA i in., 2019a, b; www.science.gov.az),
- obecność skamieniałości: bogactwo kredowych belemnitów – wymarłych morskich głowonogów z rzędu Decabrachia, a także i innych skamieniałości,
- wiek „Gór Cukierkowych”: góry te powstały w wyniku wypiętrzających ruchów orogenicznych w neogenie, a więc w czasie orogenezy alpejskiej (SEYIDOVA i in., 2019a, b; www.science.gov.az),
- wpływ egzogenicznych procesów geomorfologicznych: barwne utwory budujące omawiany obszar pod względem litologicznym należą do scementowanych spoiwem (przeważnie węglanowym, możliwie

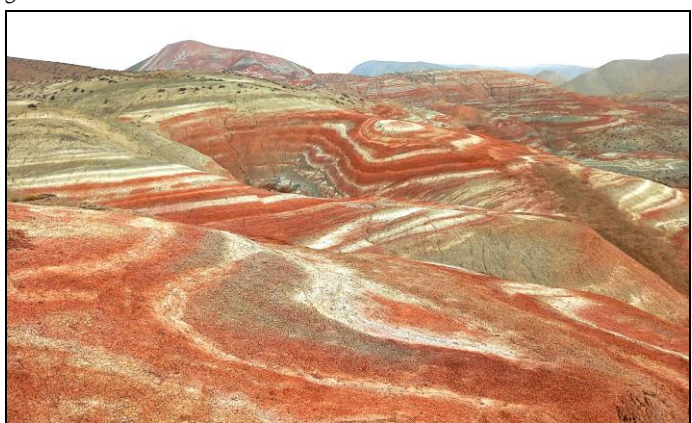
też gipsowym i solnym), reliktowych łąk osadzonych zapewne w strefie przybrzeżnej wysychającego akwenu (zatoki morskiej), ewentualnie na dnie jeziora. Słaba konsolidacja osadów sprzyja ich niszczeniu przez erozję i tworzeniu się charakterystycznej (szczególnie dla – panujących tu – warunków suchych, półpustynnych) rzeźby typu „badland” z dolinami erozyjno-denudacyjnymi (por. fot. 4). Z kolei obecność w składzie osadów rozpuszczalnego składnika mineralnego (spoiwa) stanowi przyczynę rozwoju w nich procesów sufozycznych (tzw. erozja tunelowa/kanałowa/podziemna). Ich skutkiem są licznie występujące formy zarówno powierzchniowe (leje o głębokości, do 5–8 m, ślepe dolinki i ponory, małe zapadliska), jak i podziemne (kanałowe jaskinie o długości do 5–15 m, nisze i niewielkie komory) (por. fot. 8–20).



5



6



7

Rys. 5-7. Przykłady różnych deformacji skał „Gór Cukierkowych”

Рис. 5-7. Примеры различных деформаций горных пород „Леденцовых гор”

Fig. 5-7. Examples of various deformations of the rocks of the "Candy Cane Mountains"

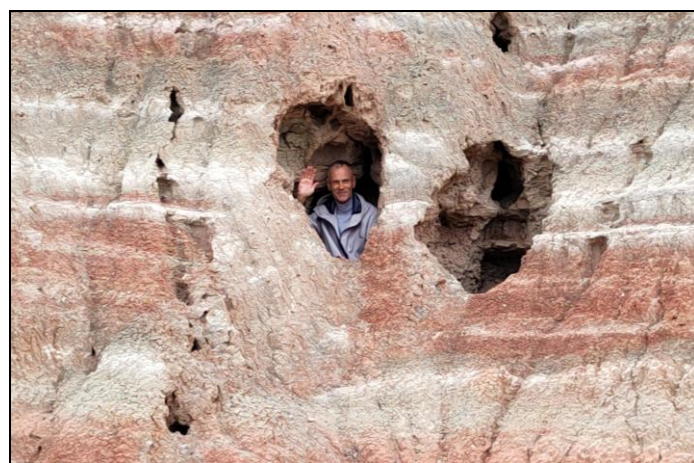
(Fot. – Фот. - Photo by:

5 – W. Puczejda (В. Пухэйда),

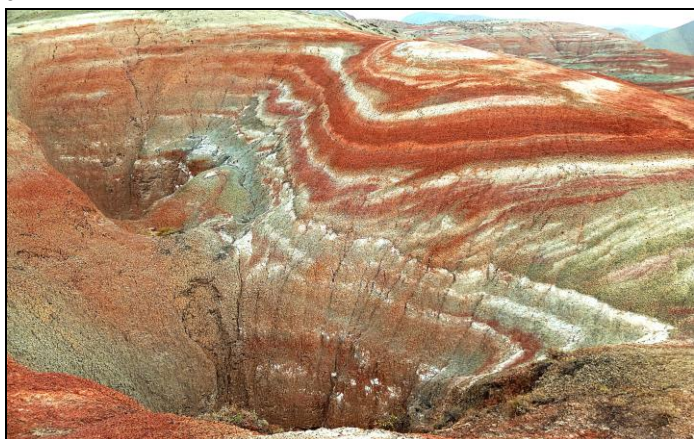
6-7 – W. Andrejczuk (В. Андрейчук/V. Andreychouk)



8



9



10



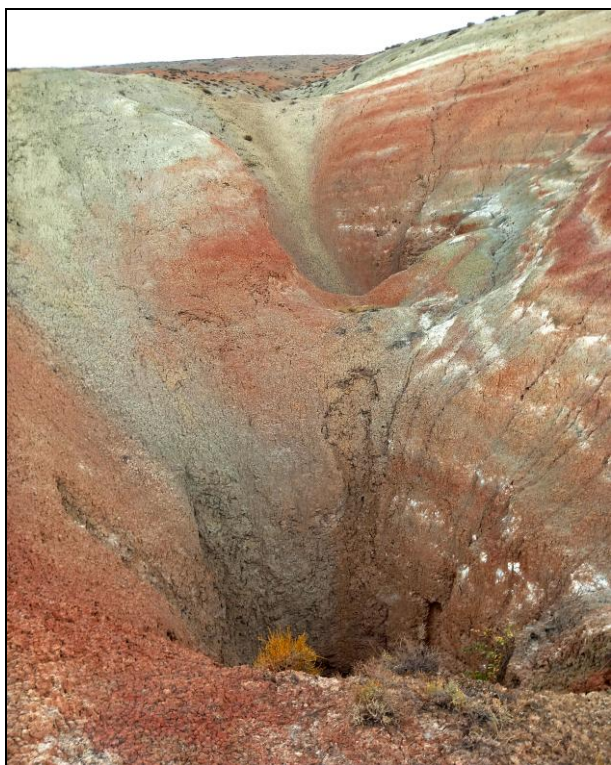
11



12



13



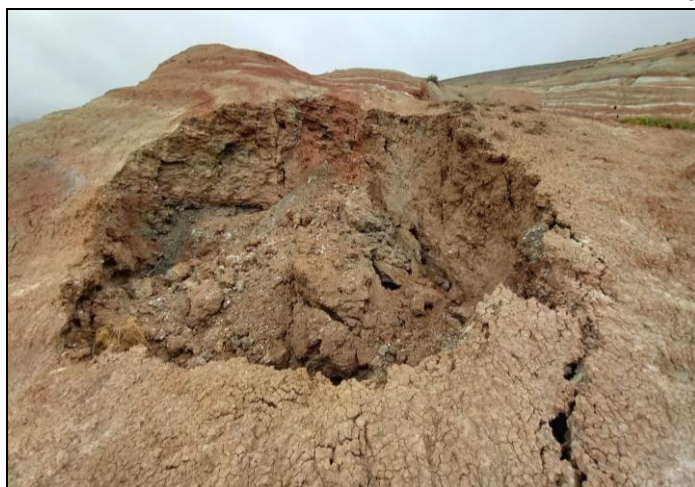
14



15



16



17



18



19



20

Z biegiem czasu – po trwającym wiele milionów lat dość spokojnym osadzaniu się materiału skalnego, równie długotrwałe ruchy tektoniczne zaburzyły te osady i razem z egzogenicznymi procesami erozyjno-denudacyjnymi spowodowały odsłonięcie warstw barwnych skał osadowych i ich pojawienie się na powierzchni terenu. Stworzyło to wizualną „księgę” historii geologicznej tego obszaru. I właśnie ta kolorowa skomplikowana

Fot. 8–20. Wybrane przykłady form erozyjno-sufozyjno-denudacyjnych powstałych w „Górach Cukierkowych”
 Фото 8–20. Избранные примеры эрозионно-суффозионно-денудационных форм, образовавшихся в „Леденцовых горах”.

Photo 8–20. Selected examples of erosional-suffusion-denudational forms formed in the "Candy Cane Mountains"

(Fot. – Фото. - Photo by:

8 – T. Szczypek (Т. Щипек)

9 – W. Puchejda (В. Пухэйда),

10–20 – W. Andrejczuk (В. Андрейчук/V. Andreychouk)

„księga” ze swymi walorami estetycznymi, włączając w to możliwość poszukiwania i zbierania skamieniałych belemnitów, spowodowała, że „Góry Cukierkowe” – jako dość rzadki obiekt w skali światowej – stały się popularnym celem podróży odwiedzanym przez turystów (fot. 21), którzy przyjeżdżają tu specjalnie, albo zatrzymują się po drodze do pobliskiego Parku Narodowego Altağac (por. rys. 5).



Fot. 21. Grupa turystów na stokach „Gór Cukierkowych” (fot. T. Szczypek, X.2024)

Фот. 21. Группа туристов на склонах „Леденцовых гор” фот.: Т. Щипек, октябрь 2024)

Photo 21. A group of tourists on the slopes of the "Candy Cane Mountains" (phot. by T. Szczypek, October 2024)

„Pstre” góry w innych obszarach świata

Przedstawione wyżej azerskie „Cukierkowe Góry” należą do geologiczno-geomorfologicznych zjawisk tzw. „pstrych” lub „kolorowych” gór. Nie są one wielką rzadkością na świecie: można je spotkać na różnych kontynentach i w wielu krajach. Często pstre formacje geologiczne zyskują własne nazwy. Na przykład w Chinach, gdzie takich obszarów jest szczególnie dużo, są one nazywane – bez względu na pewne różnice – zbiorowo jako Danshia (Danxia). Pod taką nazwą weszły one do literatury geologicznej.

Wspólną cechą pstrych obszarów jest występowanie warstw skalnych, zazwyczaj o luźniejszej strukturze (piaskowców, aleuritów, aleurolitów, argillitów, margli, łupków, gipsów, anhydritów, soli kamiennej i potasowej i in.), znacznie różniących się kolorem, co nadaje warstwowanym formacjom wyrazistego (pstrego, kolorowego, pasiastego) charakteru. W większości przypadków osadami wiodącymi w „symfonii” kolorów są warstwy o charakterystycznym czerwonym lub żółtym, pomarańczowym, bordowym, niekiedy fioletowym zabarwieniu spowodowanym dużym udziałem w ich składzie utlenionych związków żelaza, przeważnie limonitu i hematytu. Związki innych metali, jak również zawartość żelaza dwuwartościowego, siarczków (piryt, chalkopiryt), siarczanów (gips, anhy-

dryt, epsomit, mirabilit) i chlorków (halit, sylwinit, karnalit) również przyczyniają się do zabarwiania warstw w postaci różnych odcieni kolorów jasnych (biały, kremowy, szary), żółtawych, zielonkawych i niebieskawych. W niektórych przypadkach kolory warstw są tak intensywne, szczególnie te czerwone, że nasuwa się myśl o ich przepełnieniu tlenkami żelaza do tego stopnia, że stanowić mogą rudę tego metalu. Tak jednak nie jest, ponieważ żelazo jest pierwiastkiem bardzo chromotwórczym (kolorotwórczym): już niewielkie jego ilości w wodzie czy w osadzie potrafią zabarwić je na żółto i czerwono.

Pstre formacje zazwyczaj powstają w określonych warunkach sedymentacyjnych. Najczęściej są związane ze środowiskiem limnicznym (jeziornym), gdzie w zmiennych (cyklicznych, ewolucyjnych) warunkach sedymentacji odbywa się stopniowe gromadzenie utworów terygenicznych: piaszczystych, gliniastych, organogenicznych, o zróżnicowanej zawartości związków żelaza, węglanów oraz organicznych. Inne środowisko sedymentacyjne stanowią wysychające laguny morskie, gdzie wśród wyżej wymienionych rodzajów osadów duży udział mają utwory siarczane i solne (sole: kamienna, potasowa i inne). Jeszcze inne – nieco odmienne – środowisko formowania się pstrych utworów litologicznych, to kopuły solne (diapiry), których wierzchołki wskutek wypierania (tzw. haloki-

nezy, tektoniki solnej) odsłaniają się na powierzchni Ziemi. Pod wpływem czynników środowiskowych (opady, wietrzenie, krasowienie) ich górne części ulegają przeobrażeniom polegającym na rozpuszczaniu soli i pozostawianiu na miejscu – w postaci rezyduum – materiału ilastego i gliniastego, zazwyczaj wzbogaconego w żelazo. Z upływem czasu utlenianie żelaza nadaje „czapom” solnym zróżnicowanych kolorów, przeważnie o ciepłych odcieniach. Rzadziej areną tworzenia się pstrych serii stają się warstwowe osady deltowe i eoliczne.

Formowaniu się „tęczowych” gór i krajobrazów sprzyja klimat pustynny. W suchych warunkach o ekstremalnym charakterze parametrów klimatycznych (gorąco latem i chłódno zimą) oraz często gwałtownym przebiegu procesów atmosferycznych (ulewy, trąby powietrzne i inne) procesy wietrzenia, zarówno fizycznego, jak i chemicznego, przebiegają z dużą intensywnością. Sprzyja to w znacznej mierze utlenianiu pierwiastków chromotwórczych (Fe, Cu) oraz „koloryzacji” odsłaniających się utworów litologicznych. Innym powodem występowania pstrych gór przeważnie na obszarach pustynnych jest to, że na pustyni nie ma gleb (w tradycyjnym tego słowa znaczeniu) i roślinności kamuflujących podłoże i chroniących je przed bezpośrednim oddziaływaniem zewnętrznych czynników środowiskowych.

Zawartość składnika rozpuszczalnego w warstwach tworzących kolorowe serie ma duży wpływ na procesy geomorfologiczne zachodzące na powierzchni oraz wewnątrz pstrych formacji. Przy braku lub niewielkich ilościach składnika solnego, czyli gipsu, halitu, węglanu wapnia i innych, masywy zbudowane z pstrych utworów warstwowych ulegają przeważnie erozyjnemu rozczłonkowaniu. Na ich powierzchni powstają różnego rodzaju bruzdy, rynny, z których większe z czasem przekształcają się w wąwozy i doliny. Jeśli osady są dość luźne, a ilość opadów w danym miejscu jest wysoka lub cechuje je gwałtowny charakter, obszary te mogą stać się te-

renami określanymi w literaturze geomorfologicznej jako *bedlends* – złe ziemie (ang. *badlands*). Najczęściej taki charakter mają masywy zbudowane z utworów limnicznych. W przypadku, gdy serie zawierają w tej lub innej postaci (rozproszonej, krystalicznej, w kształcie soczewek i warstw) minerały rozpuszczające się w wodzie (kalcyt, aragonit, dolomit, gips, anhydryt, epsomit, mirabilit, halit, karnalit, sylwinit i inne), wskutek rozpuszczania tych składników dochodzi do rozwoju sufozji. Wody opadowe spływające po powierzchni masywów w pewnym momencie znikają w pustkach powstających na skutek rozpuszczania i kontynuują spływ w ich (masywów, warstw) wnętrzu tworząc podziemne kanały i tunele (stąd określenie sufozji jako „erozji tunelowej” – ang. *piping*). Pod wpływem grawitacji oraz na skutek chemicznego rozluźnienia warstw, nad próżniami i tunełami powstają różnej wielkości zapadliska, mini-wąwozy o stromych ścianach, ślepe dolinki i inne formy indukowane obecnością pustek. Z takim właśnie obszarem mamy do czynienia w przypadku opisanego wyżej obszaru „Gór Cukierkowych”. Z kolei, w przypadku kopuł solnych (czap wietrzeniowych na ich wierzchołkach), rzeźba na ich powierzchni ma już charakter typowo krasowy. Rozpuszczanie mas solnych pod rezydualnymi osadami terygenicznymi powoduje rozwój typowych form krasowych – bruzd korozyjnych i rynien, zapadlisk, lejów, kanionów i wąwozów, grot i jaskiń itp.

Poniżej przedstawiono krótką charakterystykę kilku obszarów pstrych gór z różnych regionów świata, gdzie wspomniane zjawiska geomorfologiczne występują w klasycznej postaci i na dużą skalę.

Pierwszy region to południowo-zachodnie Chiny, gdzie kolorowe góry i krajobrazy typu *Danxia* wieku kredowego, układają się fragmentarycznie w strefę okalającą łukiem o długości około 1 700 km północno-wschodnie i wschodnie podnóża Wyżyny Tybetańskiej – od prowincji Guizhou na zachodzie do

provincji Zhejiangna wschodzie (są to obszary: Chishui, Taining, Langshan, Danxiashan, Longhushan, Jianglangshan). Litologicznie za pstre kolory odpowiadają tu żelaziste ilowce, konglomeraty i piaskowce wystawione na oddziaływanie środowiska zewnętrznego od okresu neogenu. Z uwagi na wysokie walory estetyczne, niezwykle charakter oraz unikatowość przyrodniczą (geomorfologiczną, kraj-

obrazową i ekosystemową) obszary te zostały wpisane na listę światowego dziedzictwa IUNESCO. Jednym z najbardziej spektakularnych jest obszar Zhangye (fot. 22a-b), stanowiący zarówno rezerwat, jak i Park Narodowy oraz Geopark, położony w górach Qilian (Qilian Shan). Inna nazwa obszaru to Góry Tęczowe (np. https://en.wikipedia.org/wiki/Zhangye_National_Geopark#CITEREFGSJW2013).



22a



22b

Fot. 22. Góry Zhangye (Tęczowe) w górach Qilian Shan – Chiny (fot. W. Andrejczuk)
 Фот. 22. Радужные горы Чжанье в горах Цзяньшань – Китай (фот. В. Андрейчука)
 Photo 22. Zhangye Rainbow Mountains in the Qilian Shan Mountains – China (phot. by V. Andreychouk)



23a



23b

Fot. 23. Pstre utwory skalne w obszarze Czerwonego Kanionu, Kalifornia, USA (fot. W. Andrejczuk, 2026)
 Фот. 23. Разноцветные скальные образования в районе Красного каньона, Калифорния, США (фот. В. Андрейчука)
 Photo 23. Coloured rock formations in the Red Canyon area, California, USA (phot. by V. Andreychouk, 2026)

Kolejny przykład pochodzi z Kalifornii, z obszaru położonego u południowego podnóża grzbietu Sierra Nevada. Podobnie jak w Chinach, głównym „nośnikiem” jaskrawych

czerwonych kolorów są warstwy piaskowcowe, natomiast pozostałe utwory – głównie margliste i gliniaste, stanowią jaśniejsze tło pięknej scenerii krajobrazowej i geomorfo-

gicznej (fot. 23a-b). Z uwagi na wysokie walory krajobrazowe oraz unikatowość, obszar ten o nazwie Czerwony Kanion został objęty ochroną prawną jako park narodowy na poziomie stanowym (Red Rock Canyon State Park). Pstre formacje w tej lub innej postaci dość szeroko występują na pustynnych obszarach USA i Meksyku (np. HARRIS, 2010).

Spektakularny przykład pstrych formacji tworzących się – tym razem – na kopułach solnych stanowią bardzo liczne wierzchołki (czapy krasowo-wietrzeniowe) diapirów.

Szczególnie dużo ich występuje w południowym Iranie i są one związane z tektoniką solną – litostatycznym wypieraniem soli ku powierzchni Ziemi. Odślaniając się na powierzchni, sole budujące kopuły-protruzje, ulegają rozpuszczaniu przez wody atmosferyczne (opady, kondensat) tworząc typową rzeźbę krasową. Nierozpuszczony składnik terygeniczny pozostający po rozpuszczeniu soli – ił, glina, anhydryt i in. – gromadzi się na powierzchni form, a związki występujące w nich utleniają się i „barwią” krajobraz (fot. 24a-b) (np. KHODABAKHSHNEZHAD, ARIAN, 2016).



24a



24b

Fot. 24. Pstre krajobrazy litologiczne rozwinięte na podłożu solnym, Iran Południowy
(fot. Saeed Zochary, Internet)

ФОТ. 24. Разноцветные литологические ландшафты, сформировавшиеся на соляных породах, Южный
Иран (фот.: Саид Зохари, Интернет)

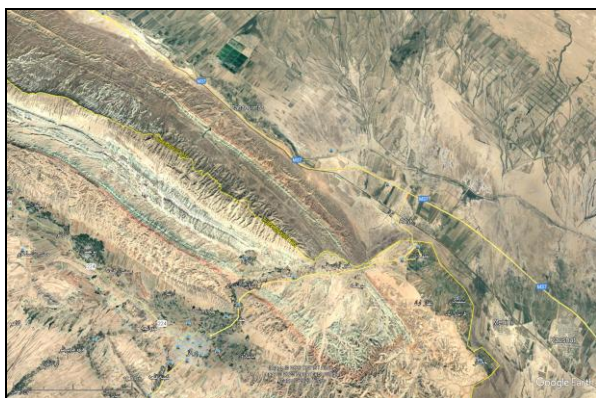
Photo 24. Coloured lithological landscapes developed on salt bedrock, Southern Iran
(phot. by Saeed Zochary, Internet)



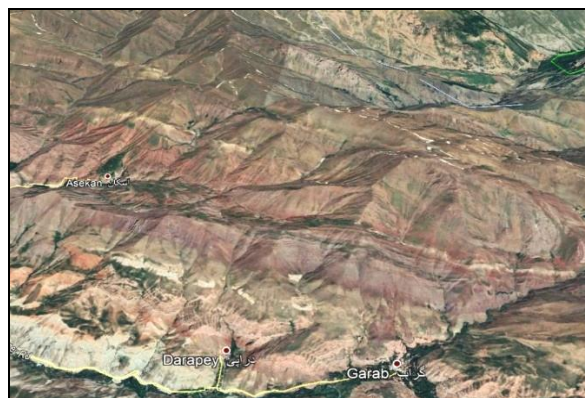
25a



25b



25c



25d

Fot. 25. Widok z kosmosu na wybrane kolorowe pasma górskie Iranu:

a – Płaskowyż Kelat (Kalat), Wschodni Kopet-dag (Kelat, Chorasane Rezawi), b – obszar w okolicach Toryan, 100 km na SE od Tebriz w stronę Teheranu, c – pstre góry na zachód od Kalat, Wschodni Kopetdag, d – górzysty obszar u podnóża Pasma Elburs (źródło: *Google Earth*)

Фот. 25. Вид из космоса на выбранные пестроцветные горные хребты Ирана:

a – плато Келат (Калат), Восточный Копетдаг (Келат, Хорасан-е Резави), b – район около Торяна, в 100 км к юго-востоку от Тебриза в сторону Тегерана, c – пестрые горы к западу от Калата, Восточный Копетдаг, d – горный район у подножия хребта Альборз (источник: *Google Earth*)

Photo 25. View from space of selected colored mountain ranges of Iran:

a – Kelat Plateau (Kalat), Eastern Kopet-dag (Kelat, Khorasan-e Rezawi), b – area near Toryan, 100 km SE of Tabriz towards Tehran, c – motley mountains west of Kalat, Eastern Kopetdag, d – mountainous area at the foot of the Alborz Range (source: *Google Earth*)

Należy zauważyć, że pstre utwory geologiczne (litologiczne) bardzo licznie występują w Iranie i innych obszarach Bliskiego Wschodu i Azji Centralnej (Turcja Wschodnia, Arabia Saudyjska, Turkmenistan, Afganistan i Pakistan) i związane są nie tylko z wychodniami soli, ale też z innymi formacjami terygenicznymi. Łatwo je zauważyć z perspektywy satelitarnej: na obrazach z kosmosu kolorowe warstwy wyraźnie podkreślają zróżnicowane struktury geologiczno-tektoniczne (fot. 25a-d).

Pstre formacje skalne znane są również z innych kontynentów i państw – Ameryki Południowej (Peru, Chile, Argentyna – Patagonia), Australii oraz Afryki (Sahara, Namibia). Namiastkę pstrych krajobrazów litologicznych odnaleźć można też w Południowej Europie, m.in w Andaluzji (Almería).

Literatura

- Bochud M., J. Mosar J., Kangarli T., Rast A., 2011: Structural geology, stress and strain across the Eastern Greater Caucasus (Azerbaijan). In: Bochud M., 2011: Tectonics of the Eastern Greater Caucasus in Azerbaijan. Department of Geosciences – Earth Sciences, University of Fribourg (Switzerland). *GeoFocus*, 30: 50–107.
- Elliott M., 1999: Azerbaijan With Georgia. Trail Blazer Pubns: 317 p.
- Harris W., 2010: Red Rock Canyon State Park. Geological Gems of California State Parks, *Gem Note*, 38.
<https://www.parks.ca.gov/pages/734/files/GemNote38RedRockCanyonStatePark.pdf>
- Kaszka M.-A., Alijew G. (red.), 1945: Fizическая география Азербайджанской ССР. Изд. АЗФАН, Баку: 279 s.
- Khodabakhshnezhad A., Arian M., 2016: Salt Tectonics in the Southern Iran. *International Journal of Geosciences*, 7: 367–377.
- Seyidova A., Hamzayeva T., Aliyeva L., Najafzadeh G., Ismayilzadeh S., Naghiyev R., Mahyaddinli E., Karimov E., Mammadov I.,

- Huseynova D., Bagirov E. B., 2019a: Structural Styles and Tectonic History of the Candy Cane Mountains (Eastern Part of the Greater Caucasus). Conference Proceedings, Third International Conference on Geology of the Caspian Sea and Adjacent Areas. European Association of Geoscientists & Engineers, Baku: 117–121 (DOI: <https://doi.org/10.3997/2214-4609.201952024>)
- Seyidova A., Hamzayeva T., Aliyeva L., Najafzadeh G., Ismayilzadeh S., Naghiyev R., Mahyaddinli E., Karimov E., Mammadov I., Huseynova D., Bagirov E. B., 2019b: Sequence Stratigraphic Framework of the Upper Jurassic-Cretaceous Section of Khizi-Altyagaj Area (Eastern Part of the Greater Caucasus). Conference Proceedings, Third International Conference on Geology of the Caspian Sea and Adjacent Areas. European Association of Geoscientists & Engineers, Baku: (DOI: <https://doi.org/10.3997/2214-4609.201952022>)
- Sultanov E. H., Agabalayev F. A., 2015: General characteristics of the natural-ecological condition of Altiagac National Park. Journal of Qafqaz University – Chemistry and Biology, 3, 1: 32–41.
- Szczypek T., Andrejczuk W., Puchejda W., Merta B. J., 2025: Góry Tałyskie i regiony przyległe, południowo-wschodni Azerbejdżan. Wybrane aspekty. Acta Geographica Silesiana, 19/3-4 (59–60). WNP UŚ, Sosnowiec: 47–74.
- Tarichazer S. A., 2024: Fizическая география Азербайджана. Изд. МАКС Press, Москва: 256 s.
- <https://www.mountain.ru/useful/dictionaries/2006/klass/img/Image1037.jpg>
- https://fedoroff.net/load/maps/karta/karta_khrebto_v_kavkaza/90-1-0-567
- <https://www.google.com/search?client=firefox-b-e&q=baku>
- https://satellites.pro/Altiagac_map#40.870781.49.205232.29
- <https://ru.climate-data.org/азия/азербайджан/кубинский-район/куба-23897/>
- <https://dustoftheworld.com/travel-blog/midst-azerbaijans-incredibly-colorful-candy-cane-mountains/>
- <https://www.atlasobscura.com/places/candy-cane-mountains>
- <https://ru.wikipedia.org/wiki/Баку>
- <https://testour.az/blog/candy-cane-mountains>
- www.science.gov.az
- https://en.wikipedia.org/wiki/Zhangye_National_Geopark#CITEREFGSJW2013

Wpłynął do redakcji: 10 kwietnia 2026

Поступила в редакцию: 10 апреля 2026

Received: 10 April 2026

Надежда А. Озерова

Институт истории естествознания и техники им. С. И. Вавилова Российской академии наук (ИИЕТ РАН),
ул. Балтийская 14, 125315 Москва, Россия; ozerova-nad@yandex.ru ORCID: 0000-0002-5144-8695

(S.I. Vavilov Institute for the history of science and technology of the Russian Academy of Sciences (IHST RAS),
Baltiyskaya street, 14, 125315, Moscow, Russia; ozerova-nad@yandex.ru ORCID: 0000-0002-5144-8695)

Из истории изучения атмосферы Земли в период до начала Первой мировой войны

Ozierowa N. A. **Z historii badań atmosfery ziemskiej w okresie do I wojny światowej.** Niniejszy artykuł poświęcony jest początkowemu etapowi badań naukowych nad atmosferą Ziemi (przed 1914 rokiem). Po udowodnieniu istnienia ciśnienia atmosferycznego w XVII wieku, otworzyły się teoretyczne możliwości konstruowania urządzeń zdolnych do utrzymywania się w powietrzu. Już w 1709 roku odbył się pierwszy udany start balonu na ogrzane powietrze. Najśłynniejsze loty balonem odbyły się we Francji pod koniec XVIII wieku, w wykonaniu braci Montgolfier i Jacques'a Charles'a. W 1783 roku po raz pierwszy ludzie bezpiecznie wznieśli się w powietrze i wylądowali balonami Montgolfier i Charlier, co odkryło wielkie perspektywy odnośnie do badań atmosfery. Podczas pierwszych lotów badawczych na początku XIX wieku przeprowadzono szeroki zakres obserwacji naukowych: barometrycznych, termometrycznych, elektrycznych, magnetycznych, stanu fizjologicznego ciała człowieka i zwierząt itp. W rezultacie ustalono jednorodność składu gazowego atmosfery na różnych wysokościach, wykazano, że temperatura powietrza spada wraz z wysokością, co jest właściwością atmosfery, która nie ma związku z topografią podłoża. Opisano mechanizm powstawania opadów atmosferycznych. Podczas wznoszenia się na wysokości powyżej 7 000 m n.p.m. ludzie odczuwali dolegliwości spowodowane niskim ciśnieniem atmosferycznym i niedoborem tlenu. Katastrofy, w których ginęli aeronauci, przyczyniły się do rozwoju technologii teledetekcyjnych. Dane, uzyskane na przełomie XIX i XX wieku za pomocą rejestratorów umieszczonych na balonach i latawcach pozwoliły na udoskonalenie prognoz pogody, wykrycie obszarów inwersji temperaturowej oraz wyróżnienie dwu warstw atmosfery: troposfery i stratosfery.

Ozerova N. A. **From the history of research of the Earth's atmosphere in the period before the outbreak of the First World War.** This article is devoted to the initial stage of scientific study of the Earth's atmosphere (before 1914). After the existence of atmospheric pressure was proved in the 17th century, theoretical possibilities opened up for the design of devices capable of staying in the air. Already in 1709, the first successful launch of a thermal balloon took place. The most famous were the balloon flights of the Montolifier brothers and Jacques Charles, undertaken at the end of the XVIII century in France. In 1783, people first ascended and descended safely on the balloons Montgolfier and Charlier, which opened up great prospects in the field of atmospheric research. During the first research flights of the early 19th century, a wide range of scientific observations were carried out: barometric, thermometric, electricity, magnetism, the physiological state of the human and animal body, etc. As a result, the uniformity of the gaseous composition of atmospheric air at different heights was established, and it was proved that the drop in air temperature with altitude is a property of the atmosphere that is not related to the relief of the underlying surface. The mechanism of formation of liquid precipitation has been established. When climbing to heights of more than 7,000 m, people experienced ailments due to low atmospheric pressure and lack of oxygen. Disasters, accompanied by the death of balloonists, contributed to the creation of remote observation technologies. The data obtained at the turn of the XIX–XX centuries. By launching self-recording devices on balloons and kites, they made it possible to re-

fine weather forecasts, detect an area of temperature inversion and isolate two layers in the atmosphere: the troposphere and the stratosphere.

Ключевые слова: атмосфера Земли, история метеорологических наблюдений, воздушный змей, аэростат, воздухоплаватель

Słowa kluczowe: atmosfera ziemska, historia obserwacji meteorologicznych, latawiec, balon, aeronauta

Keywords: Earth's atmosphere, history of meteorological observations, kite, balloon, the balloonist

Аннотация

Настоящая статья посвящена начальному этапу научного изучения атмосферы Земли (до 1914 года). После того, как в XVII веке было доказано существование атмосферного давления, открылись теоретические возможности для конструирования аппаратов, способных удерживаться в воздухе. Уже в 1709 году состоялся первый успешный запуск теплового аэростата. Самыми известными стали полёты воздушных шаров братьев Монгольфье и Жака Шарля, предпринятые в конце XVIII века во Франции. В 1783 году на шарах монгольфьеры и шарльеры впервые поднялись и благополучно спустились люди, что открыло большие перспективы в области изучения атмосферы. В ходе первых исследовательских полётов начала XIX века проводился широкий диапазон научных наблюдений: барометрических, термометрических, электричества, магнетизма, физиологического состояния организма человека и животных и др. В результате была установлена однородность газового состава атмосферного воздуха на разных высотах, доказано, что падение температуры воздуха с высотой – это свойство атмосферы, не связанное с рельефом подстилающей поверхности. Был описан механизм образования атмосферных осадков. При подъёме на высоты более 7 000 м люди столкнулись с недомоганиями, обусловленными низким атмосферным давлением и нехваткой кислорода. Катастрофы, сопровождавшиеся гибелью воздухоплавателей, способствовали созданию технологий дистанционных наблюдений. Данные, полученные на рубеже XIX–XX вв. путем запуска на воздушных шарах и змеях самопишущих приборов, позволили уточнять прогнозы погоды, обнаружить область температурной инвер-

сии и вычленили в атмосфере два слоя: тропосферу и стратосферу.

Введение

В русскоязычной научной литературе известно не так много работ, посвящённых истории становления метеорологии как науки. Книжные издания, доступные в библиотеках, и электронные ресурсы в интернете подробно описывают строение, состав и свойства атмосферного воздуха, известные физические явления и закономерности, свойственные атмосфере Земли, но лишь изредка в них упоминается о том, когда и кем были открыты известные современной науке факты.

В трудах, считающимися классическими по истории географии, сведения по истории метеорологии не всегда полны. Например, говоря о становлении метеорологии как частной географической науки, имеющей для географии вспомогательное значение, известный немецкий методолог географии Альфред Геттнер (1859–1941) в 1927 году сообщал лишь то, что „оформление метеорологии началось уже во второй половине XVIII в.; развитию её в большей мере способствовало появление синоптических карт погоды в 70-х годах прошлого столетия; эти карты давали возможность охватывать в целом погоду значительных пространств Земли” (ГЕТТНЕР, 1930, с. 128–129). При этом он не акцентировал внимание на научном вкладе отдельных учёных в развитие метеорологии. В Советском Союзе в разные годы издавались сводки представлений античных авторов в области географии, переводы трудов европейских авторов по истории естествозна-

ния, сборники статей и коллективные монографии, в которых прямо или косвенно рассматривались некоторые вопросы становления климатологии и метеорологии. Однако в них материалы по истории науки тоже могли быть представлены отрывочно и касались в основном изысканий в Российской империи и СССР, описывали частные вопросы, отдельный период исследований, вклад учёных или научных учреждений (ВОРОБЬЁВ, 1937; *Сто лет...*, 1949; *Атмосфера...*, 1953; БОДНАРСКИЙ, 1953; *Развитие...*, 1967; *Развитие...*, 1975 и др.). Нередко это были научно-популярные издания.

Среди советских публикаций следует выделить работу историка науки Бориса Никитича Воробьёва (1882–1965) (ЛИМАНОВА, 2021), изданную в 1937 году и посвящённую истории изучения высоких слоёв атмосферы (ВОРОБЬЁВ, 1937). Следует отметить, что она была написана как пояснительная статья к русскому переводу книги о полётах американских стратонавтов и издана в то время, когда СССР и западные страны находились в остром политико-экономическом противостоянии. Поэтому на полноту изложения и оценку исторических фактов, изложенных в этой статье, некоторое влияние оказала идеологическая пропаганда сталинского режима. Из трудов второй половины XX века наиболее глубоким научным исследованием, пожалуй, является работа историка географии Юрия Александровича Демидовича (1919–?) (ОЗЕРОВА, 2024). В ней сделан акцент на приборах, доступных для учёных в разное время, описаны методики метеорологических наблюдений, их постепенная унификация, способствовавшая формированию Всемирной метеорологической организации, развитие теоретических представлений о формировании и преобразовании климата Земли, вклад известных учёных в становление климатологии и метеорологии. Тем не менее, в работе ДЕМИДОВИЧА (1975) совсем не уделено внимание истории аэрологи-

ческих исследований, их значению для развития метеорологии и климатологии.

В первой четверти XXI века российские исследователи продолжают заниматься изучением частных вопросов по истории метеорологии. Например, рассматривают вклад отечественных учёных рубежа XIX–XX вв. в её развитие — Александра Ивановича Воейкова, Михаила Александровича Рыкачёва (САВЕНКОВА, 2014; САВЕНКОВА, СНЫТКО, 2018; СМЕРНОВ, 2012, 2013 и др.). Из работ, касающихся истории начального этапа изучения атмосферы, следует упомянуть публикации коллектива латышских авторов и Елены Леонидовны Желтовой (р. 1956) о полётах первых воздухоплателей на территории Российской империи (STRADIŅŠ, STRADIŅA, СЕВЕРЕ, 2006; ЖЕЛТОВА, 2021a, b). Но в этих работах акцент сделан на социокультурных аспектах, и почти не рассмотрены научные результаты первых полётов на воздушных шарах, произведённых с целью исследования атмосферы Земли. История аэрологических исследований кратко освещена в некоторых специализированных учебных пособиях, поскольку использование радиозондов в метеорологических наблюдениях сохраняет свою актуальность до настоящего времени (КУНЯЕВА, 2011).

Данная работа посвящена начальному этапу научного изучения атмосферы Земли в период до начала Первой мировой войны (до 1914 года), и значению этих работ в становлении метеорологии как науки.

Научно-технические предпосылки к началу изучения атмосферы Земли

Эпоха Ренессанса ознаменовалась многими открытиями, изобретениями и путешествиями, причём последние стали источником обширных сведений о разнообразии климатов Земли. В XVII веке были установлены многие законы физики, введены но-

вые аналитические методы в математике, появились новые физические приборы. Так, огромное значение имело изобретение Галилео Галилеем (1564–1642) в 1597 году термометра, усовершенствованного через сто лет Андерсом Цельсием (1701–1744). Изобретённый в 1644 году Эвангелистом Торричелли (1608–1647) барометр многократно модифицировался и стал основным прибором наблюдений наряду с применявшимися ещё с глубокой древности дождемером и гигрометром. Указатель направления ветра – флюгер – был дополнен анеометром, разнообразие конструкций которого было чрезвычайно велико (ДЕМИДОВИЧ, 1975).

После того, как в 1643 году Торричелли провёл опыт, доказывающий существование атмосферного давления, благодаря дальнейшим работам Блеза Паскаля (1623–1662), Отто фон Герике (1602–1686) и других учёных вскоре выявилась применимость к атмосферному воздуху известного закона Архимеда, объясняющего явления плавания

в жидкости погружённых в неё тел. В свою очередь, это открывало принципиально новые возможности в области полёта на основе аэростатического принципа и конструирования летательных аппаратов легче воздуха. Такие проекты не заставили себя долго ждать. Уже 9 августа 1709 году бразило-португальский священник и естествоиспытатель Бартоломеу Лоренсу де Гусмао (1685–1724) произвёл подъём бумажной модели аппарата, наполненной нагретым воздухом (ВОРОБЬЁВ, 1937).

Куда большую известность получил полёт теплового аэростата братьев Монгольфье – Жозефа-Мишеля (1740–1810) и Жака-Этьенна (1745–1799) (рис. 1 и 2). 4 июня 1783 года во французском городке Аннон шар из холста, оклеенный обоями, наполняемый тёплым воздухом от сжигания особой смеси из шерсти и соломы, за 10 минут взлетел на высоту 1 500–2 000 м и плавно опустился на расстоянии около 2 км от места подъёма (рис. 3).

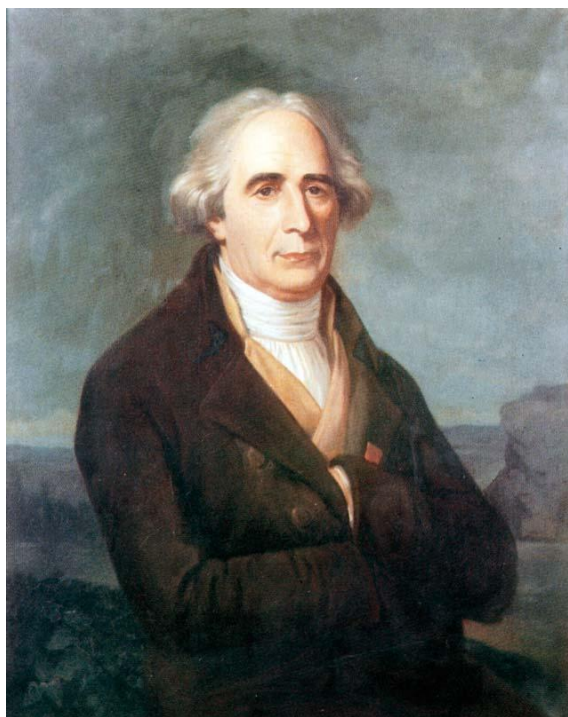


Рис. 1 – Rys. 1 – Fig. 1: Жозеф-Мишель Монгольфье (1740–1810) – Joseph-Michel Montgolfier (1740–1810) – Joseph-Michel Montgolfier (1740–1810)

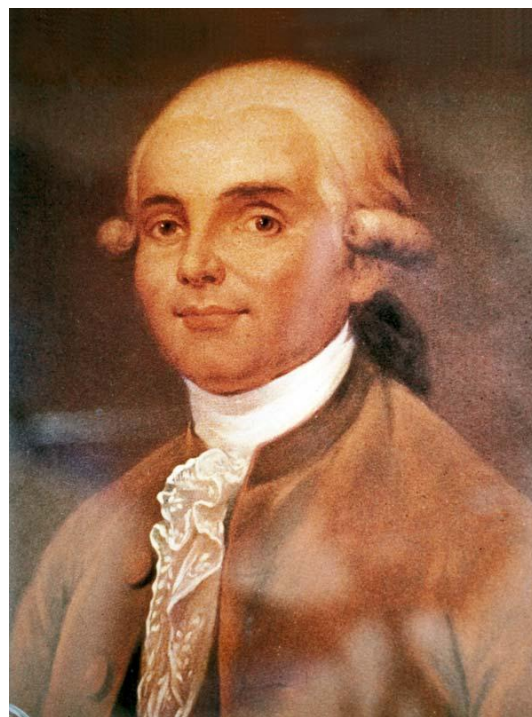


Рис. 2 – Rys. 2 – Fig. 2: Жак-Этьенн Монгольфье (1745–1799) – Jacques-Étienne Montgolfier ((1745–1799) – Jacques-Étienne Montgolfier (1745–1799)



Рис. 3. Испытания воздушного шара „монгольфьера” братьев Монгольфье в садах бумажной фабрики Ревейон, 19 октября 1783 года

Rys. 3. Testowanie balonu na ogrzane powietrze braci Montgolfier w ogrodach papierni Réveillon, 19 października 1783 r.

Fig. 3. Testing the Montgolfier brothers' hot air balloon in the gardens of the Réveillon paper mill, October 19, 1783

Благодаря достижениям в области химии, к концу XVIII века уже был выяснен состав атмосферного воздуха, выделены газообразные химические элементы (кислород, азот, водород), начато изучение их свойств (СОЛОВЬЕВ, 1983). Все эти знания в совокупности позволили французскому изобретателю и учёному Жаку Александру Сезару Шарлю (1746–1823) (рис. 4) вместе с помощником Николя-Луи Робером (1761–1828) 27 августа 1783 года совершить успешный запуск шара, наполненного газом легче воздуха – водородом (рис. 5). 21 ноября 1783 года на монгольфьере и 1 декабря того же года на шарльере впервые поднялись и благополучно спустились лю-

ди. Эти события, известия о которых облетели весь мир, открыли большие перспективы в области завоевания воздуха (ИВАНОВ, 1937; STRADIŃŠ, STRADIŃA, SEBERE, 2006).

К середине XVIII века сведения о свойствах атмосферного воздуха и происходящих в нем процессах на высоте ограничивались немногочисленными наблюдениями, произведенными в ходе восхождений на вершины Альп. Скучные наблюдения объяснялись большими сложностями из-за с необходимостью нести с собой в горы по бездорожью тяжелые, дорогие, хрупкие и громоздкие приборы.



Рис. 4 – Rys. 4 – Fig. 4: Жак Александр Сезар Шарль (1746–1823) – Jacques Alexandre César (1746–1823) – Jacques Alexandre César (1746–1823)

В 1749 году типограф университета в Глазго и астроном Александр Вильсон (1714–1786) и студент того же университета Томас Мелвил (1726–1753) организовали серию запусков воздушных змеев, с помощью которых в течение года доставляли в высокие слои атмосферы минимальные термометры для измерения температуры воздуха. Эти исследования считаются первым зарегистрированным случаем использования воздушных змеев для проведения метеорологических наблюдений. В 1752–1753 годы Бенджамин Франклин (1706–1790) и Жак де Рома (1713–1776) с помощью воздушных змеев изучали в США атмосферное электричество. Однако результаты исследований атмосферного воздуха, полученные к 1780-м годам, оказались весьма скромными. Вот почему появление первых воздушных судов-аэростатов, способных поднять человека, открывало совершенно новые возможности для изучения атмосферы.

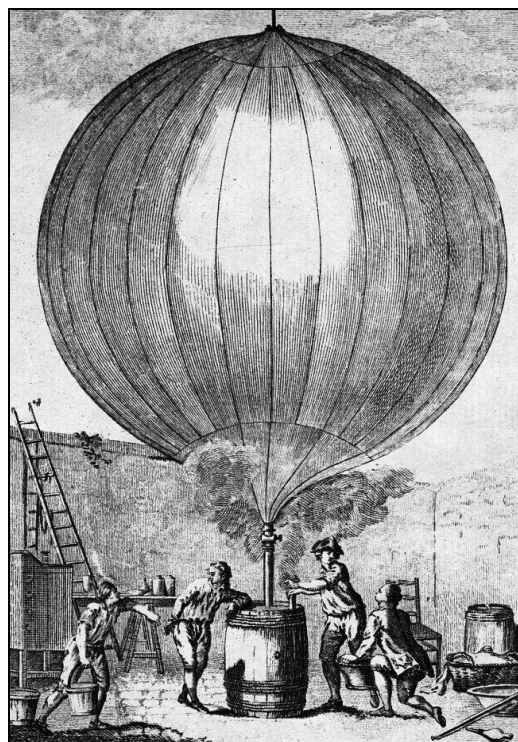


Рис. 5. Надувание первого водородного шара „шарльера”

Rys. 5. Nadmuchiwanie pierwszego balonu wodorowego „Charlière”

Fig. 5. Inflating the first hydrogen balloon "Charlière"

Сразу после первого запуска большого воздушного шара, способного поднять в воздух человека, во Франции возникло всеобщее увлечение воздушными шарами. Вскоре, однако, стало очевидно, что управлять можно лишь подъёмом и спуском шара, в то время как направление и скорость полёта полностью зависели от направления и силы ветра. В результате шары опускались случайным образом в плотной городской застройке, создавая угрозу пожаров. Ещё одной проблемой для органов власти стало неконтролируемое поведение массы людей, желавших наблюдать эти полёты. Вот почему в 1784 году во многих странах, включая Российскую империю, были изданы указы, запрещающие запуски воздушных шаров без разрешения властей. Что касается российской императрицы Екатерины II (1729–1796), то она до сентября 1784 года получала исчерпывающие известия о полётах воздушных шаров во Франции и, по-видимому, пришла к выводу, что прак-

тической пользы от них нет и не предвидится. В дальнейшем она твердо следовала своей позиции не поощрять полёты на воздушных шарах (ЖЕЛТОВА, 2021b).

В 1785 году, после неудачной попытки пересечь Ла-Манш на воздушном шаре, закончившейся гибелью воздухоплавателей, увлечение шарами резко пошло на спад. Политические события предреволюционной Франции и события Великой французской революции привели к тому, что до начала XIX века интерес к полётам на воздушных шарах ни во Франции, ни в других европейских странах не возобновлялся.

Первые научные исследования атмосферы воздухоплавателями

Уже во время подъёма на воздушном шаре 1 декабря 1783 года Шарль и Робер проводили измерения температуры воздуха и атмосферного давления. Вероятно, именно таким образом они установили, что шарльер, наполненный водородом, достиг высоты 2 700 м.

Одним из первых воздухоплавателей, предпринявших полёт на воздушном шаре с научными целями, стал Этьен-Гаспар Робер (1763–1837) – физик и фокусник бельгийского происхождения, более известный под своим сценическим псевдонимом Робертсон (рис. 6). Он получил образование в Лёвенском университете и некоторое время преподавал в нём физику. В последующие годы Робертсон экспериментировал с гальванизмом, публично демонстрировал физические и оптические опыты. В самом конце XVIII века он прославился в Париже тем, что открыл публичное оптическое зрелище под названием „Фантазмагория“. Одним из увлечений Робертсона стало воздухоплавание (ЖЕЛТОВА, 2023).

В 1801 году влиятельный русский дипломат граф Аркадий Иванович Морков



Рис. 6. Этьен-Гаспар Робер (Робертсон) (1763–1837)
Rys. 6. Étienne-Gaspard Robert (Robertson) (1763–1837)
Fig. 6. Étienne-Gaspard Robert (Robertson) (1763–1837)

(1747–1827) был назначен официальным послом во Франции. Известно, что Морков ещё с 1783 года желал, чтобы полёты на воздушных шарах были продемонстрированы и в России, но до восшествия императора Александра I (1777–1825) на российский престол в 1801 году такой возможности не было. В 1803 году, когда в Российской империи был снят запрет на полёты, и Императорская Санкт-Петербургская Академия наук проявила интерес к воздушным шарам, Робертсону по рекомендации Моркова было направлено официальное приглашение от её имени (STRADIŃŠ, STRADIŃA, SEBERE, 2006; ЖЕЛТОВА, 2021a).

18 июля 1803 года, уже будучи в Гамбурге, на пути в Россию, Робертсон совершил рекордный подъём на 7 300 м (ЖЕЛТОВА, 2023). Во время пятичасового путешествия он провел измерения температуры воздуха и атмосферного давления (с помощью термометра Реомюра и барометра), наблюдал изменения в восприятии звуков в разреженном воздухе, некоторые оптические явления, отметил угнетенное состояние птиц и описал испытываемое им недомогание,

провел серию физических опытов для изучения атмосферного электричества, химические опыты (ROBERTSON, 1833, p. 70–71).

30 июня (12 июля) 1804 года состоялся перелет Робертсона на воздушном шаре из Санкт-Петербурга в Гатчину. Вместе с Робертсоном должен был лететь химик и академик Императорской Санкт-Петербургской академии наук Товий Егорович Ловиц (1757–1804). Именно он отвечал за переписку с Робертсоном, который благосклонно принял предложение о проведении полёта в России с научной целью при условии, что материальное обеспечение предприятия возьмёт на себя принимающая сторона. В итоге Императорская Санкт-Петербургская академия наук профинансировала строительство шара в Санкт-Петербурге и его заполнение водородом, предоставила приборы для научных исследований (термометр, барометр, склянки для отбора проб воздуха, часы, компас и др.). Однако Ловиц заболел, и его место занял более молодой российский химик и академик Яков Дмитриевич Захаров (1765–1836). В ходе упомянутого полёта – первого в России, предпринятого с научной целью, – проводился широкий диапазон научных наблюдений: барометрических, термометрических, электричества, магнетизма. В своем рапорте Захаров отметил снижение температуры воздуха с высотой, наблюдал уже известное науке явление перемены направления ветра на высоте. Также им были опробованы способы навигации с помощью „бумажного путеуказателя“, по которому можно было легко отследить не только направление движения, но и быстрее, чем по барометру, заметить подъём или спуск шара (ПОПОВ, 1956, с. 34–35).

Метеорологическое значение ранних полётов воздушных шаров было невелико, так как измеренные температуры сильно искажались влиянием солнечной радиации. Однако полёт академика Захарова в 1804 году начался вечером и завершился после захода солнца, поэтому измеренные им значе-



Рис. 7. Жозеф Луи Гей-Люссак (1778–1850)

Rys. 7. Joseph Louis Gay-Lussac (1778–1850)

Fig. 7. Joseph Louis Gay-Lussac (1778–1850)

ния температуры оказались верными (ПОПОВ, 1956; КУНЯЕВА, 2011) и вызвали живой интерес в научном сообществе. Вскоре, 23 августа, а затем 16 сентября 1804 года, в Париже состоялись два полёта известных физиков Жозефа Луи Гей-Люссака (1778–1850) (рис. 7) и Жана-Батиста Био (1774–1862): первый – на высоту 4 000 метров, второй – на 7 016 м. Оба они были предприняты с целью проверки результатов опытов Захарова и Робертсона, взятия на разных высотах проб воздуха, измерения магнитного поля Земли, изучения физиологического воздействия разреженного воздуха на организм человека (STRADIŃŚ, STRADIŃA, SEBERE, 2006).

Замеры температуры воздуха, проведенные Гей-Люссаком, подтвердили, что с высотой она снижается. Этот факт позволил французскому учёному доказать, что снега, покрывающие высочайшие вершины, не являются результатом действия гор на окружающий воздух.

Кроме этого, результаты химического анализа проб воздуха, взятых с высоты

6 636 м, показали, что содержание кислорода и азота одинаково не только у поверхности Земли на разных широтах, но и на высоте. Эти данные имели важное значение для формирования представлений о трёхмерной картине явлений, происходящих в атмосфере, так как однородность газового состава косвенно свидетельствовала о существовании неких глобальных динамических процессов, способствовавших непрерывному перемещиванию толщи воздуха. Недаром пионер динамической метеорологии Генрих Вильгельм Дове (1803–1879), анализируя данные наземных наблюдений, спустя несколько десятилетий после выхода работ Захарова и Гей-Люссака смог развить представления Генриха Брандеса (1777–1834) о бурях средних широт – циклонах, а также сформулировать понятие о двух основных воздушных течениях (полярном и экваториальном). По его мысли, в тропиках они расположены одно над другим (первое внизу, второе наверху), а в средних и высших широтах – одно рядом с другим, и погода зависит от вытеснения одного из этих воздушных течений другим. Работы Дове сыграли важную роль в развитии климатологических представлений в 1840–1850-е годы (ДЕМИДОВИЧ, 1975).

После 1804 года число полётов на воздушном шаре в разных странах Европы только увеличивалось, хотя большая их часть предпринималась с увеселительными, а не научными целями. По подсчётам французского физика и воздухоплователя Жана-Франсуа Дюпюи-Делькура (1802–1864), с 1805 по 1822 годы состоялось 40 полётов, то есть в среднем более 2 полётов в год. Накопленный за это время опыт способствовал усовершенствованию конструкции воздушных шаров: англичанин Чарльз Грин (1785–1870) предложил и ввел в практику применение гайдропа – каната, использовавшегося при посадке.

Исследования атмосферы в середине XIX — начале XX веков

1850-е годы ознаменовались активизацией исследований верхних слоев атмосферы с помощью воздушных шаров. В 1850–1852 годы английские и французские воздухоплователи независимо друг от друга предприняли несколько подъёмов для исследований вышележащих слоев атмосферы, в которых участвовали метеорологи и химики Джон Уэлш (1824–1859), Джеймс Глешер (1809–1903), Жан-Огюстьен Барраль (1819–1884). В ходе полётов, один из которых достиг высоты 7 000 м, проводились измерения температуры и определение химического состава воздуха.

В 1862–1868 годы Глешер, один из пионеров научного воздухоплавания в Англии, предпринял серию полётов, во время которых изучал атмосферу на максимально возможной высоте подъёма аэростата. В 1862 году ему удалось достигнуть высоты более 8 000 м, при этом и сам ученый, и его спутник пилот Генри Трейси Коксвелл (1819–1900) едва не погибли из-за нехватки кислорода и низкого атмосферного давления (рис. 8).

После этого Глешер совершил ещё 21 исследовательский полёт. Собирая влагу по пути на землю, он описал механизм образования дождевых капель, провел множество наблюдений за ходом температуры, влажности воздуха, силой и направлением ветра, другими элементами погоды, изучение которых стало приобретать всё большую важность из-за роста значимости прогнозов погоды, которая была обусловлена бурным научно-техническим прогрессом европейской цивилизации. Исследования Глешера привлекли внимание многих учёных, в том числе тогда ещё малоизвестного русского метеоролога Михаила Александровича Рыкачёва (1840/1841–1919), который в 1865 году проходил стажировку в Грин-



Рис. 8. Джеймс Глешер (слева) и Генри Трейси Коксвелл (справа) на воздушном шаре, 1864 год
 Rys. 8. James Glaisher (po lewej) i Henry Tracey Coxwell (po prawej) w balonie na ogrzane powietrze, 1864 r.
 Fig. 8. James Glaisher (left) and Henry Tracey Coxwell (right) in a hot air balloon, 1864.

вической обсерватории у Глешера и наблюдал за ночным подъёмом своего наставника на воздушном шаре (СМИРНОВ, 2012). Иностранный опыт, особенно в Германии, Франции и США, помог Рыкачёву положить начало и активно продвигать аэрологические исследования в России. В 1868–1873 годах он совершил несколько полётов на аэростате для исследований свободной атмосферы. По его инициативе русские воздухоплаватели стали проводить наблюдения за формой и движением облаков, что имело важное практическое значение. Труды Рыкачёва в области метеорологии получили признание мирового научного сообщества (СМИРНОВ, 2013).

В 1870 году во время сентябрьской революции во Франции неожиданно выявились большие возможности применения аэростатов в военном деле. Во время осады Парижа французы смогли организовать производство небольших сферических аэ-

ростатов, снабжённых обычно несколькими голубями, с помощью которых через линию фронта было доставлено не менее 10 т почты и 150 человек. Эти события вновь привлекли внимание к воздухоплаванию во всем мире, а во Франции – побудили интерес к научным исследованиям атмосферы на аэростатах. Однако подъём, предпринятый 15 апреля 1875 года Гастоном Тиссандье (1843–1899), Жозефом Кроке-Спинелли (1845–1875) и Теодором Сивелем (1833–1875) с целью достижения максимальной высоты, несмотря на то, что воздухоплаватели запаслись мешками с кислородом, закончился трагически. На высоте 8 600 м все они потеряли сознание. Аэростат был предоставлен самому себе, и когда через 2,5 часа он опустился на землю, из троих аэронавтов выжил лишь Тиссандье.

Гибель воздухоплавателей показала, какие огромные трудности лежали на пути к изучению и освоению воздушного

океана. Это заставило учёных и инженеров изыскивать способы их преодоления. Определенный вклад внесли и русские ученые. Так, в 1875 году Дмитрий Иванович Менделеев (1834–1907), придававший особенное значение изучению земной атмосферы, предложил на заседании Русского физико-химического общества устройство большого аэростата для высотных полётов с герметически закрытой металлической гондолой для защиты аэронавтов от губительного действия разреженных слоев атмосферы (ВОРОБЬЁВ, 1937).

В 1887 году, после того, как немецкий метеоролог Рихард Ассман (1845–1918) изобрел вентиляционный психрометр, получивший всеобщее признание, оказалось возможным производить надежные измерения температуры на аэростатах (КУНЯЕВА, 2011). В 1891 году были тщательно обработаны результаты 80 полётов, организованных воздухоплавательным отделом Русского технического общества, и таким образом впервые в мире были получены надёжные данные о температуре атмосферы не только у поверхности Земли, но и на разных высотах (ДЗЕРДЗЕЕВСКИЙ, 1953).

В 1892 году во Франции были произведены первые опыты по подъёму в атмосферу легких самопишущих приборов – метеорографов, непрерывно записывающих показатели атмосферного давления, температуры и относительной влажности воздуха, которые важны для составления прогнозов погоды, стрельбы артиллерии и выполнения других задач. После этого научное сообщество вернулось к идее использования шаров-зондов, первые запуски которых состоялись ещё в 1783 году. В России регулярные выпуски шаров-зондов проводились с 1901 года в Павловской обсерватории, находившейся недалеко от Санкт-Петербурга.

Самопишущие приборы, подвешенные к шарам-зондам, позволили получать сведения о состоянии атмосферы на больших высотах, не рискуя жизнью людей, хотя

и этот способ наблюдения не был лишён недостатков. Так, он имел низкую оперативность, и его невозможно было применять в малонаселенной местности, поскольку результаты измерений можно было получить только после обнаружения и возврата приборов в обсерваторию.

Также во многих странах использовали оснащённые самопишущими приборами воздушные змеи, хотя они обычно не могли подняться выше 4–5 км. Рекорд высоты, достигнутой воздушным змеем, составил 9 км (ВОРОБЬЁВ, 1937; ДЗЕРДЗЕЕВСКИЙ, 1953).

Кроме этого, применялись небольшие наполненные водородом шары-пилоты диаметром 1–2 м. Поднимаясь вверх, такой шар уносился ветром. Наблюдая за его движением с поверхности земли с помощью двух теодолитов, удавалось довольно точно определить направление и скорость ветра на разных высотах (ВОРОБЬЁВ, 1937; ДЗЕРДЗЕЕВСКИЙ, 1953), а также высоту нижней границы облачности.

Благодаря наблюдениям при помощи шаров-зондов французский учёный Леон Тейсерен-де-Бор (1855–1913) в 1899 году обнаружил в земной атмосфере область, в которой наблюдалась температурная инверсия – уменьшение температуры с высотой сменялось её медленным увеличением. Доклад об этом важном открытии Тейсерен-де-Бор сделал в Берлине в мае 1902 года, продемонстрировав данные наблюдений за несколько лет, и его выводы подтвердил Ассман, только что получивший точно такие же результаты. Тейсерен-де-Бор и Ассман считаются первооткрывателями стратосферы. К заслугам Тейсерена-де-Бора относят создание специального термина „тропосфера“, который был введён им в 1908 году для обозначения слоя атмосферы, лежащего ниже обнаруженной им точки температурной инверсии.

Заключение

С появлением технической возможности подъёма измерительных приборов и наблюдателя в воздух человек получил первые представления о химическом составе и физических свойствах нижнего слоя атмосферы, благодаря чему научное знание стало вытеснять бытовавшие до этого домыслы.

В начале XIX в. было экспериментально доказано, что падение температуры воздуха с высотой – это естественное свойство атмосферы, не связанное с рельефом подстилающей поверхности. Было также установлено, что на высоте может меняться направление или сила ветра, но при этом сохраняется однородность газового состава атмосферного воздуха. Произведённые наблюдения за влагой на больших высотах позволили описать механизм формирования жидких атмосферных осадков. Все эти факты, дополнявшие результаты наземных наблюдений, стали прочным фундаментом для развития теоретических представлений в XIX веке о формировании погоды и климата.

При подъёме на высоты более 7 000 м люди столкнулись с физическими ограничениями организма человека и животных, обусловленными низким атмосферным давлением и нехваткой кислорода. Несколько катастроф, сопровождавшихся гибелью воздухоплавателей, способствовали созданию технологий дистанционных наблюдений при помощи самопишущих приборов, а также появлению первых проектов герметических гондол для аэростатов. В свою очередь, продолжительные наблюдения свойств атмосферы дистанционными методами на различных высотах позволили получить многочисленные данные, пригодные для обработки, которые составили прочные знания о свойствах нижней атмосферы. Эти данные имели значение как с практической точки зрения (например, при составлении прогнозов погоды), так и с теоретической. В частности, обна-

ружение слоя температурной инверсии позволило на рубеже XIX–XX вв. вычленивать в атмосфере два слоя: тропосферу и стратосферу.

Литература

- Атмосфера Земли: Сборник. Государственное издательство культурно-просветительской литературы, Москва, 1953: 423 с.
- Боднарский М. С. (сост.), 1953: Античная география. Книга для чтения. Государственное издательство географической литературы, Москва: 368 с.
- Воробьёв Б., 1937: Завоевание воздушных высот (исторический обзор). Стивенс А. Два полёта американских стратостатов. Издание ЦС Союза ОСОАВИАХИМ СССР, Москва: 3–13.
- Геттнер А., 1930: География. её история, сущность и методы. Под ред. Н. Баранского. Государственное издательство, Москва-Ленинград: 416 с.
- Демидович Ю. А., 1975: Климатология. Развитие физико-географических наук (XVII–XX вв.). Наука, Москва: 174–208.
- Дзержевский Б. Л., 1953: Строение земной атмосферы. Атмосфера Земли: Сборник. Государственное издательство культурно-просветительской литературы, Москва: 7–76.
- Желтова Е. Л., 2021a: Воздухоплавание в России и Франции в 1783–1785 гг.: „пересборка социального“. Социология науки и технологий, 12 (2): 7–25.
- Желтова Е. Л., 2021b: Методологические и фактологические ошибки в исследованиях истории воздухоплавания в России в конце XVIII века. Институт истории естествознания и техники им. С. И. Вавилова. XXVII Годичная научная международная конференция Института истории естествознания и техники им. С. И. Вавилова РАН, Москва: 449–452.
- Желтова Е. Л., 2023: К истории первого полёта на воздушном шаре в научных целях в России, организованного Императорской академией наук в Санкт-Петербурге (1804): неизвестные источники и факты. История науки и техники: источники, памятники, наследие: четвертые чтения по историографии и источниковедению истории науки и техники. К 300-летию Российской академии наук: материалы международной научной конференции. Ивово: 25–27.

- Куняева В. П., 2011: Профессиональный модуль ПМ.02. Проведение аэрологических наблюдений. Междисциплинарный курс 02.01. Технология аэрологических наблюдений и обработки аэрологической информации. Москва: 140 с.
- Лиманова С. А., 2021: По «дороге к звездам», или вдохновленные К.Э. Циолковским: переписка студента Б.В. Ляпунова с инженером Б.Н. Воробьевым. Архивный поиск: Сборник научных статей и публикаций, 4. Архив РАН, Москва: 116–142.
- Озерова Н. А., 2024: Демидович Юрий Александрович.
<https://ihst.ru/employees/демидович-юрий-александрович/>
 (дата размещения: 10.05.2024; дата обращения: 05.01.2026).
- Попов В. А. (ред.), 1956: Воздухоплавание и авиация в России до 1907 г. Сборник документов и материалов. Оборонгиз, Москва: 952 с.
- Развитие наук о Земле в СССР. Наука, Москва, 1967: 715 с.
- Развитие физико-географических наук (XVII–XX вв.). Наука, Москва, 1975: 435 с.
- Савенкова В. М., 2014: М.А. Рыкачев и гидрометеослужба России. Современные проблемы геологии, геофизики и геоэкологии Северного Кавказа: Материалы III Всероссийской научно-технической конференции. Академия наук Чеченской Республики, Грозный: 327–329.
- Савенкова В. М., Снытко В. А., 2018: Международный семинар «Научное наследие и развитие идей А. И. Воейкова (к 175-летию со дня рождения)». Вопросы истории естествознания и техники, 39, 2: 402–406.
- Смирнов В. Г., 2012: Академик М.А. Рыкачев — гринвичский путь в науку. Клио, 3 (63): 117–125.
- Смирнов В. Г., 2013: Академик М.А. Рыкачев и его деятельность в международных научных организациях на рубеже XIX–XX вв. Русское научное наследие за рубежом России: Материалы научной конференции. Брянский государственный университет имени академика И.Г. Петровского, Брянск: 152–163.
- Соловьев Ю. И (отв. ред.), 1983: Становление химии как науки. Всеобщая история химии. Наука, Москва: 464 с.
- Сто лет Главной Геофизической обсерватории имени А. И. Воейкова. 1849–1949: Краткий исторический очерк. Типолитография № 2 ГИМИЗ, Ленинград, 1949: 20 с.
- Robertson E. G., 1833: Mémoires récréatifs, scientifiques et anecdotiques du physicien-aéronaute connu par ses expériences de fantasmagorie, et par ses ascensions aérostatiques dans les principales villes de l'Europe. 2. Paris: 432 p.
- Stradiņš J., Stradiņa L., Cebere D., 2006: Robertsona 1804 gada lidojums no Rīgas uz Ropažiem Latvijas kultūrvēsture. Latvijas universitātes raksti. 693 sējums. Zinātņu vēsture un muzejniecība. Latvijas Universitāte, Rīga: 18–25.

Поступила в редакцию: 20 января 2026

Wpłynął do redakcji: 20 stycznia 2026

Received: 20 January 2026