

Wiaczesław Andrejczuk

Uniwersytet Warszawski, Wydział Geografii i Studiów Regionalnych, ul. Krakowskie Przedmieście 30,
00-927 Warszawa, Polska; e-mail: czeslaw.andrejczuk@gmail.com

FIZYCZNE EFEKTY TOWARZYSZĄCE POWSTAWANIU ZAPADLISK

Андрейчук В. **Физические эффекты, сопровождающие образование провалов.** Образование провалов это динамический процесс, протекающий часто катастрофически. Образование провалов на земной поверхности практически всегда сопровождается разного рода явлениями (эффектами), среди которых можно отметить: акустические, световые, пневматические, сейсмические и гидродинамические. Базируясь на собственных многолетних наблюдениях в карстовых районах, автор предлагает классификацию явлений, сопровождающих провалообразование. Эти явления упорядочены в классификации в соответствии с несколькими критериями:

- относительно места проявления (локальные – проявляющиеся непосредственно в месте образования провала и местные – в его окружении);
- относительно времени появления (перед образованием, во время образования и после образования);
- относительно физической природы явлений (акустические, световые, пневматические, сейсмические и гидродинамические).

Явления (эффекты), сопровождающие провалообразование, могут иметь диагностическое, прогнозное и общее инженерно-геологическое значение, что указывает на необходимость их более глубокого изучения.

Andreychouk V. **The physical effects accompanying to sinkhole formation.** Sinkhole formation is a dynamic process, often of a catastrophic character. Different kinds of phenomena (effects) such as acoustic, pneumatic, seismic, hydrodynamic etc., usually accompany to ground surface collapse. Based on the multi-year field observations in karst areas, the author proposes the classification of the phenomena accompanying to rapidly-forming sinkholes. Those phenomena are arranged according to some criterions:

- according to the place of appearing (local – directly within the limits of the place of sinkhole formation and areal – in the sinkhole surroundings);
- according to time of appearing (before sinkhole formation – pre-collapse, in the moment sinkhole formation – collapse-time and after sinkhole formation post-collapse);
- according to physical nature of effects (acoustic, pneumatic, seismic, hydrodynamic, lightly).

The phenomena accompanying to sinkhole formation have a diagnostic, predict and generally big engineering-geology importance that points the necessity of their deeper investigation.

Słowa kluczowe: kras, zapadlisko, efekty fizyczne

Ключевые слова: карст, провал, физические эффекты

Key words: karst, sinkhole, physical effects

Zarys treści

Powstawanie zapadliska to proces dynamiczny, często o przebiegu katastrofalnym. Tworzeniu się zapadlisk na powierzchni ziemi prawie zawsze towarzyszą różnego rodzaju zjawiska (efekty), wśród których wymienić można: akustyczne, świetlne, pneumatyczne, sejsmiczne oraz hydrodynamiczne. Na podstawie własnych wieloletnich obserwacji i badań na

obszarach krasowych, autor proponuje klasyfikację zjawisk towarzyszących nagle tworzącym się zapadliskom. Zjawiska te (efekty fizyczne) można klasyfikować na podstawie kilku kryteriów:

- według miejsca pojawiania się (lokalne – występujące bezpośrednio w miejscu tworzenia się zapadliska oraz miejscowe – na obszarze przyległym do miejsca zapadania się powierzchni gruntu);

- według czasu pojawienia się (przed utworzeniem zapadliska, podczas tworzenia się zapadliska i po utworzeniu się zapadliska);
- według fizycznej natury zjawisk (akustyczne, światłne, pneumatyczne, sejsmiczne, hydrodynamiczne).

Zjawiska (efekty) towarzyszące procesom zapadliskowym, mogą mieć znaczenie diagnostyczne, prognostyczne i ogólne inżyniersko-geologiczne, co wskazuje na konieczność ich głębszego poznania.

WSTĘP

Powstawanie zapadlisk nad podziemnymi próżniami to złożony wieloetapowy proces uzależniony od wielu czynników i uwarunkowań geologicznych (budowa geologiczna miejsca występowania próżni, wielkość i kształt próżni, charakter nadkładu i in.) oraz geofizycznych (przede wszystkim rozkładu indukowanych przez próżnie naprężeń) w masywie krasowym, zmieniających się w czasie. W procesie powstawania zapadliska można wyróżnić 3 stadia: przedzapadliskowe, właściwe zapadliskowe oraz pozapadliskowe.

Stadium przedzapadliskowe to zazwyczaj trwały proces „dojrzwiania” próżni podziemnej do aktu zapadliskowego, obejmujący wzrost wielkości próżni, a także stopniowe zbliżanie się jej stropu lub całej próżni ku powierzchni ziemi. Proces ten może trwać setki, tysiące, a nawet miliony lat, przebiegając stabilnie – liniowo lub skokowo (fazy pasywnego rozwoju oraz fazy aktywne, związane np. ze zmianami hydrologicznymi reżimu wód kształtujących próżnie i innymi czynnikami).

Stadium pozapadliskowe również ma charakter trwały i „rozpływa się” w czasie. Istotą tego stadium jest stabilizacja procesu zapadliskowego oraz przekazanie nowo powstałej formy (zapadliska) „pod opiekę” zewnętrznych procesów modelujących jej kształt i dostosowujących do warunków środowiskowych. Na tle stabilizacyjnej tendencji rozwojowej występować mogą jednak okresy aktywizacji procesu zapadliskowego, np. nagłe osiadanie dna zapadliska, powodujące obwały i osuwiska na jego zboczach, powstawanie mniejszych zapadlisk w obrębie większych form, spowodowane grawitacyjnymi i hydrodynamicznymi procesami zachodzącymi pod ziemią i na jej powierzchni, zarówno w obrębie formy, jak i w jej otoczeniu.

Najbardziej interesującym i spektakularnym pod względem procesualnym (fizycznym) i fenomenologicznym (przebieg) jest jednak stadium zapadliskowe: ten krótki, trwający od kilku sekund do kilku

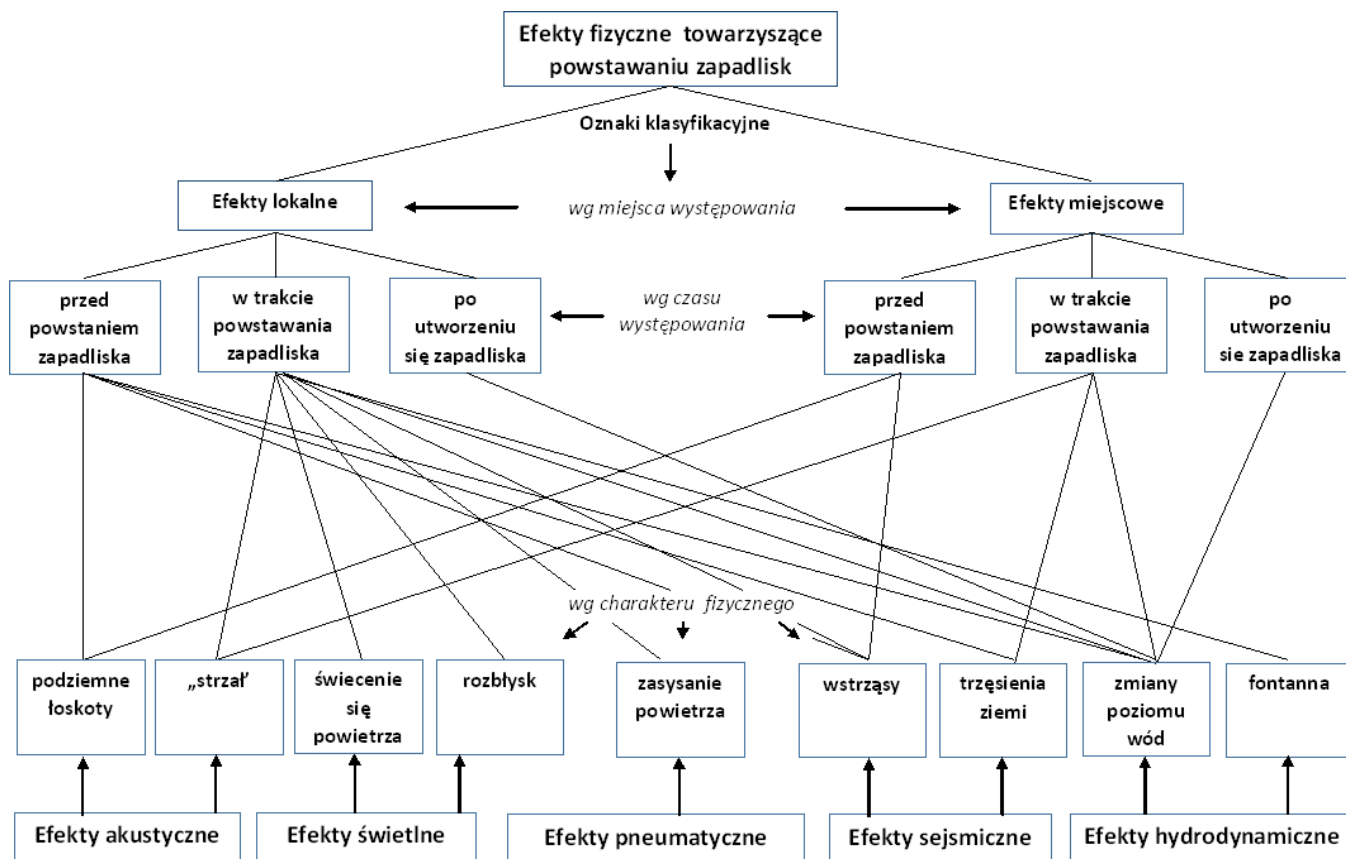
minut – rzadko dłużej – okres, kiedy próżnia krasowa (forma podziemna) gwałtownie przekształca się w zapadlisko i staje się formą powierzchniową. Jest to zjawisko niezwykle fascynujące i na ogół rzadko obserwowane bezpośrednio, głównie z powodu szybkiego, gwałtownego przebiegu.

Procesowi zapadania się gruntu zawsze towarzyszą określone efekty fizyczne. Nie są one jeszcze zbyt dokładnie zbadane, m. in. ze względu na trudno przewidywalny, odnośnie do czasu i miejsca, charakter wystąpienia. Lepiej poznane są fizyczne efekty zapadlisk, powstających podczas podziemnych prób jądrowych, lecz w tym przypadku występujące efekty są specyficzne. Zagadnienia opisane w artykule są częściowo przedstawione w kilku publikacjach (ANDRIEJCZUK, 1992, 1996, 2007; ANDREYCHOUK, TYC, 2013).

KLASYFIKACJA EFEKTÓW TOWARZYSZĄCYCH POWSTAWANIU ZAPADLISK

Przeprowadzone dotychczas celowe oraz okazjonalne obserwacje, w tym też autora, pozwalają na stwierdzenie, że w trakcie zapadania się powierzchni ziemi nad próżniami krasowymi (i nie tylko) prawie zawsze występują te lub inne zjawiska, np. głośny „strzał”, słup pyłu, drgania gruntu, czasami rozbłyski, świecenie powietrza i inne. Określone efekty obserwuje się również przed zapadaniem się (np. podwyższenie lub obniżenie poziomu wód gruntowych, pojawienie się na powierzchni ziemi koncentrycznych szczelin), a także po zapadnięciu się powierzchni (wahania poziomu wód, wypychanie-wsysanie powietrza przez otwór zapadliskowy i inne). Wspomniane oraz inne efekty mogą występować zarówno w obrębie czaszy zapadliskowej, jak i w jej otoczeniu.

Jak wspomniano na wstępie, w kwestii miejsca występowania, efekty zapadliskowe można podzielić na: efekty lokalne występujące w miejscu zapadliska oraz efekty występujące wokół tworzącego się zapadliska. Odnośnie do czasu występowania (kolejności), wyróżnia się efekty przedzapadliskowe (kilka godzin lub dni przed zapadnięciem się powierzchni), właściwe zapadliskowe (występujące podczas zapadania) oraz pozapadliskowe, występujące tuż po powstaniu zapadliska i trwające od kilku godzin do kilku dni. Podstawowym kryterium podziału efektów jest jednak ich fizyczna natura – charakter zjawisk. Pod tym względem można wyróżnić efekty akustyczne, światłne, pneumatyczne, sejsmiczne oraz hydrodynamiczne (rys. 1).



Rys. 1. Klasyfikacja ogólna efektów fizycznych towarzyszących powstawaniu zapadlisk
 Рис. 1. Общая классификация физических эффектов, сопровождающих образование провалов
 Fig. 1. General classification of the physical effects accompanying to sinkhole formation

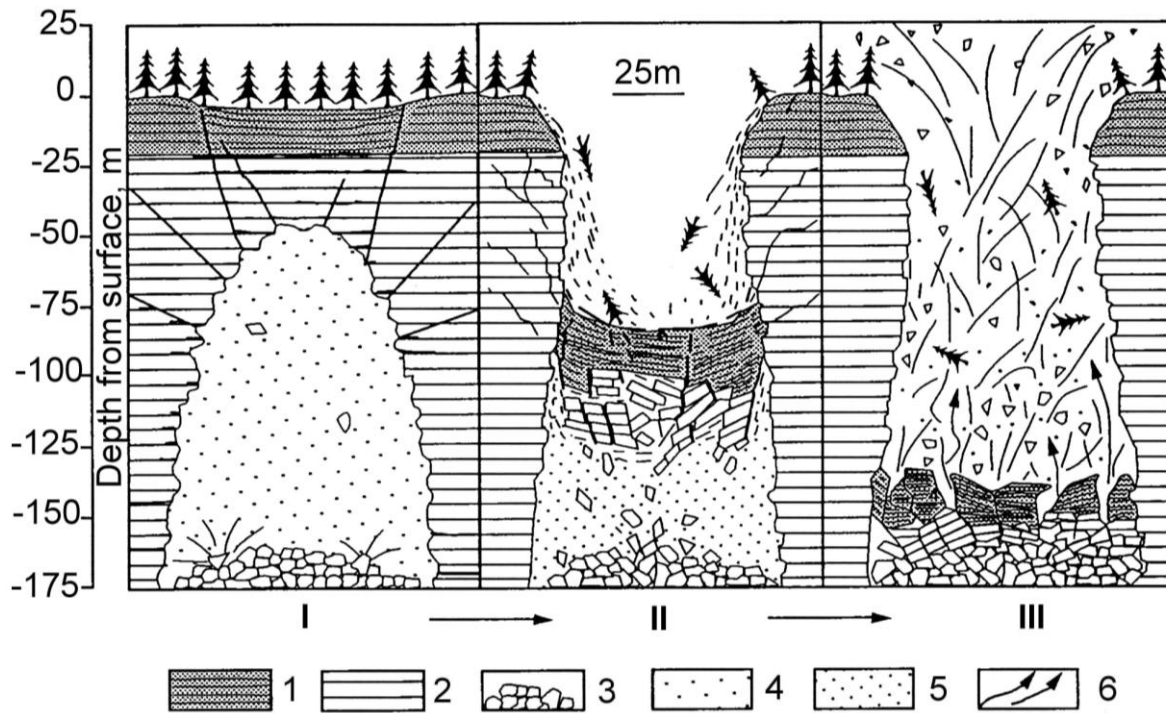
EFEKTY I ICH GENEZA

W przypadku dużych próżni podziemnych o objętości dziesiątek i setek tysięcy m³, przed powstaniem zapadliska często można usłyszeć dochodzący z podziemi, to zanikający, to nasilający się głuhy łoskot. Ten dźwięk jest indukowany przez spadające ze stropu próżni, wkraczającej w stan stopniowego (przechodzącego w lawinowe) zapadania się, warstwy skalne oraz duże bloki, uderzające o dno i ściany próżni. Źródłem dźwięków mogą też być wstrząsy będące skutkiem uderzania bloków o stożek zapaliskowy. Łoskot nasila się wielokrotnie w momencie zapadania się ziemi (otwierania się próżni na zewnątrz), przechodząc czasem w chwilowy grzmot. Takie efekty miały miejsce podczas powstawania dużego zapadliska nad gigantyczną (ponad 1 mln m³ objętości) komorą powstałą na skutek rozpuszczania soli nad jedną z kopalń soli potasowych na terenie Górnokamskiego Zagłębia Solnego na Uralu (Rosja).

Częściej występującym efektem akustycznym towarzyszącym momentowi zapadania powierzchni nad próżnią jest strzał. Stanowi efekt dźwiękowy o znacznej sile, przypominający głuchy strzał. Występuje zazwyczaj przy powstawaniu zarówno małych, jak i większych zapadlisk, szczególnie w przypadku, gdy próżnia nie jest zawodniona. Temu efektowi dźwiękowemu towarzyszy często ślup pyłowy – efekt pneumatyczny, polegający na wyrzuceniu na zewnątrz obłoku pyłu powstającego w trakcie zapadania się gruntu. Efekty akustyczne i pneumatyczne składają się na wspólny efekt dźwiękowo-pyłowy. Występuje on w specyficznych warunkach tworzenia się zapadlisk: kiedy inicjująca zapadlisko próżnia znajduje się w strefie przypowierzchniowej i jest już odizolowana (z powodu odrywania się i odpadania skał przemieszcza się ku powierzchni ziemi) od niżej położonej zasypanej próżni wyjściowej, czyli w przypadku zapadania się stropu nad zamkniętą próżnią, która rozwinęła się jako kupała zawaliskowa w nadkładzie i straciła, poprzez usypanie stożka

zawaliskowego bezpośredni (czyli próżniowy) kontakt z próżnią w niżej zalegających horyzontach skał krasowiejących. W przypadku takich próżni, zapadająca się masa skalna działa jak tłok ściskający powietrze w zamkniętej przestrzeni próżni.

Szybko ściskane „tłokiem skalnym” powietrze wykazuje narastające przeciwdziałanie i w pewnym momencie „strzela” do góry, unosząc ze sobą drobne (przede wszystkim pylaste) cząsteczki gruntu (rys. 2).



Rys. 2. Schemat wyrzucenia na zewnątrz pyłu i fragmentów skalnych podczas powstawania zapadliska bierznikowskiego (Zagłębie Górnokamskie, Ural Zachodni, Rosja) (ANDRIEJCZUK, 1996):

I–III – etapy rozwoju; 1 – luźne osady czwartorzędowe, 2 – warstwy skalne, 3 – spadające fragmenty skalne, 4 – powietrze w próżni, 5 – powietrze pod presją zapadającej się masy skalnej, 6 – kierunki ruchu powietrza – na zewnątrz otworu zapadliskowego

Рис. 2. Схема выброса наружу из провального отверстия пыли и скальных обломков во время образования Березниковского провала (Верхнекамское месторождение калийных солей, Западный Урал, Россия) (ANDRIEJCZUK, 1996):

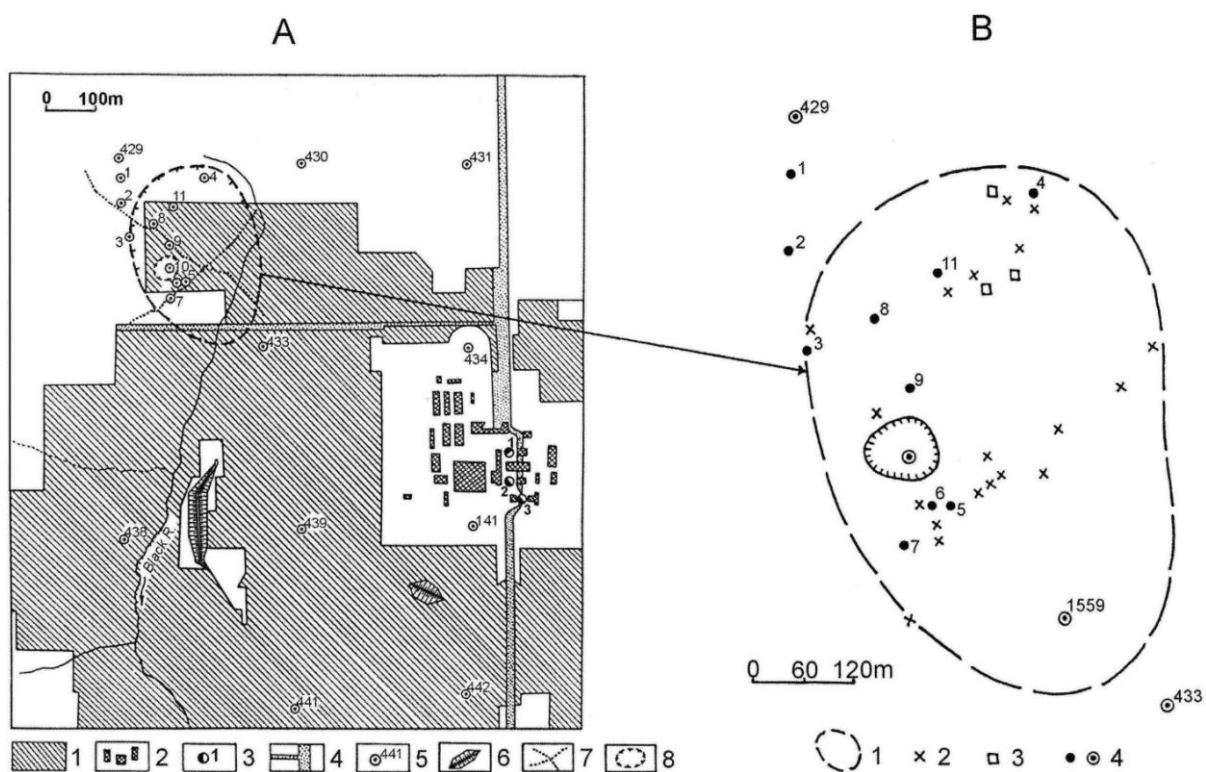
I–III – стадии развития; 1 – рыхлые четвертичные отложения, 2 – слои горных пород, 3 – обрушающиеся скальные блоки, 4 – воздух в полости, 5 – воздух, сжимаемый массой обрушающегося материала, 6 – направления движения воздуха – наружу от провального отверстия

Fig. 2. Scheme of dust and rock fragments extrusion out of the collapse hole during the formation of Bereznikowski sinkhole (Upper-Kama Potas Salt Basin, Western Ural, Russia) (ANDRIEJCZUK, 1996):

1 – III – development stages; 1 – loose Quaternary deposits, 2 – rock layers, 3 – collapsing fragments of rocks, 4 – air in a cavity, 5 – air being under the pressure of collapsing rocky mass, 6 – directions of air movement – to outside of the sinkhole

W szczególnych przypadkach może dojść do wyrzucenia z otworu zapadliskowego nie tylko pyłu, ale też większych fragmentów skalnych. Tak więc, przy powstaniu dużego zapadliska nad izolowaną próżnią w soli (Górnokamskie złożo soli potasowych, Ural, Rosja) doszło również do eksplozji metanu. W wyniku znacznego nasilenia przez tę eksplozję zwykłego efektu pneumatycznego, z wnętrza zapadliska wyrzucone zostały również fragmenty skalne o masie od kilku do

kilkunastu kilogramów, odnajdywane później w promieniu 200–300 m od zapadliska (rys. 3). Największe odłamki osiągały średnicę 0,5–0,8 m. W miejscu ich upadku powstały mini-kratery o średnicy do 2 m i głębokości do 1 m (ANDRIEJCZUK, 1996). Przy powstawaniu takich „eksplozywnych” zapadlisk tworzy się również wybuchowa fala uderzeniowa o prostopadłym do powierzchni ziemi kierunku rozprzestrzeniania się.



Rys. 3. Plan sytuacyjny zapadliska Bierznirowskiego (A) oraz obszar rozrzutu fragmentów skalnych w trakcie jego powstawania (B):

A: 1 – kopalnia, 2 – konstrukcje kopalniane, 3 – szyby kopalniane oraz ich numery, 4 – chodniki wentylacyjne, 5 – otwory wiertnicze oraz ich numery, 6 – nasypy, 7 – profile pomiarów osiadań terenu, 8 – kontur zapadliska;

B: 1 – obszar rozrzutu fragmentów skalnych, 2 – drobne fragmenty, 3 – duże fragmenty, 4 – odwierty

Рис. 3. Ситуационный план Березниковского провала (А) и ареал выброса обломков во время образования провала (В):

A: 1 – шахтное поле, 2 – рудничные сооружения, 3 – шахтные стволы и их номера, 4 – вентиляционные штреки, 5 – скважины и их номера, 6 – насыпные сооружения, 7 – профили измерения оседания земной поверхности, 8 – контур провала ;

B: 1 – ареал разброса обломков, 2 – мелкие обломки, 3 – крупные обломки, 4 – скважины

Fig. 3. The plan of the Bereznikowski sinkhole area (A) and the area of rock fragments extrusion due to its formation (B):

A: 1 – mine field, 2 – mine constructions, 3 – mine shafts and their numbers, 4 – ventilation passages, 5 – boreholes and their numbers, 6 – embankments, 7 – profile of subsidence measuring, 8 – sinkhole contour; B: 1 – area of rock fragments extrusion, 2 – small-size pieces, 3 – big-size pieces, 4 – boreholes

W opisanym wyżej przypadku miały miejsce również rozbłyski świetlne. Ich pochodzenie wiąże się z eksplozją metanu. Są jednak świadectwa (ustne), że nad zwykłymi zapadliskami – w chwili ich powstawania o ciemnej porze doby – również obserwuje się przez moment świecenie powietrza. Natura tego zjawiska (o ile dane są wiarygodne) nie jest jasna.

W przypadku powstawania zapadlisk nad odizolowanymi (od powierzchni) systemami podziemnych próżni, z których została wypompowana woda (np. w obrębie złóż surowców mineralnych) lub które zostały zdrenowane wskutek sztucznego obniżenia poziomu wód, może wystąpić – ja-

ko odmiana efektu pneumatycznego – zjawisko krótkotrwałego zasysania powietrza do otworu zapadliskowego. Jest ono skutkiem rozrzedzenia podziemnej atmosfery w odwodnionych pustkach przy braku dopływu powietrza z powierzchni, np. w sytuacji, kiedy seria krasowa, zawierająca odwodnione próżnie, jest odizolowana od powierzchni terenu warstwami słabo przepuszczalnych osadów.

O wiele bardziej pospolite, zróżnicowane i zdecydowanie lepiej zbadane są efekty sejsmiczne zapadlisk, polegające na występowaniu mniejszych (drżenie ziemi) lub większych (trzęsienia) wstrząsów przed, a szczególnie w momencie powstawa-

nia zapadlisk. Te wstrząsy są najczęściej spowodowane odrywaniem się fragmentów i bloków skalnych od stropu próżni i ich uderzaniem o dno skalne czy zawaliskowy stożek. W przypadku formowania się większych zapadlisk, drgania gruntu i wstrząsy mogą być odczuwalne bezpośrednio w promieniu od kilkuset metrów do kilku kilometrów, seismografy zaś mogą rejestrować te wydarzenia w oddaleniu nawet do kilkuset kilometrów (tzw. krasowe trzęsienia ziemi).

Efekty hydrodynamiczne towarzyszące powstawaniu zapadlisk, dotyczą przede wszystkim wyraźnych chwilowych lub dłuższej obserwowanych zmian poziomu zwierciadła wód podziemnych. Efekt ten występuje nie tylko w momencie tworzenia się zapadliska, ale również kilka godzin lub nawet dni przed jego powstaniem oraz po powstaniu. Zmiany poziomu wód, rejestrowane w miejscu potencjalnego zapadliska tuż przed jego powstaniem lub wokół tego miejsca, najczęściej wykazują jego podnoszenie się. Może to być związane z postępującym wypełnianiem częściowo lub całkowicie zawadzonej próżni przez spadający materiał skalny, wypierający odpowiednią ilość wody w warunkach ograniczonej przestrzeni lub słabej przepuszczalności skalnego otoczenia próżni.

W takich właśnie warunkach, w momencie zapadania się masy skalnej do płytko położonej, całkowicie lub częściowo zawadzonej próżni podziemnej może wystąpić zjawisko fontanny wodnej z otworu zapadliskowego. Po zapadnięciu się powierzchni zazwyczaj następuje powolne obniżenie poziomu wód, lecz ze względu na przenikanie wód atmosferycznych (glebowych, gruntowych) do otworu zapadliskowego, podwyższony poziom wód krasowych, widoczny w jezioru zapadliskowym, może się utrzymywać przez dłuższy czas (tygodnie, a nawet miesiące).

W przypadku występowania wodonośca nad próżniami krasowymi (tzw. wodonośca zawieszonoego – w nadkładzie odizolowanym od skał krasowujących warstwą słabo przepuszczalnych osadów), w okresie przedzapadliskowym możliwe jest występowanie efektu odwrotnego: gwałtownego obniżenia poziomu wód. Może to być związane z wkroczeniem migrującej ku górze pustki (stropu kopuły zawaliskowej) w serię osadów wodonośnych i ich nagłym zdrenowaniem. Taki ukryty podziemny drenaż może spowodować długo-

trwałe obniżenie poziomu wód wodonośca nadkrasowego.

Do wyraźnych efektów towarzyszących powstawaniu zapadlisk (i będących częścią jego natury fizycznej) zaliczyć można też (nie jest ujęty w klasyfikacji) efekt dekompensacyjny. Polega on na powstawaniu w okresie przedzapadliskowym w miejscu przyszłego zapadliska koncentrycznych szczelin. Powstają one na skutek osiadania – uginania się pod wpływem grawitacji – stropu próżni podziemnej. Osiadanie stropu prowadzi do rozluźnienia warstwy nadkładu nad próżnią i tworzenia się szczelin. Mogą się one pojawić tuż przed zapadnięciem powierzchni, ale mogą też rozwijać się stopniowo: w ciągu kilku dni, a nawet miesięcy. Zależy to od miąższości warstwy skał lub osadów nad stropem próżni oraz od jej budowy (masywna, warstwowa itp.), warunków pogodowych i in. Pojawienie się na powierzchni gruntu takich koncentrycznych pęknięć może wskazywać na miejsce, w którym niedługo powstanie zapadlisko. Na obszarach szczególnie zagrożonych powstawaniem zapadlisk krasowych (i nie tylko), o ile jest to możliwe, warto prowadzić regularne obserwacje wizualne powierzchni terenu.

ZAKOŃCZENIE

Obserwowane efekty fizyczne, towarzyszące procesom zapadliskowym, mogą mieć, obok wiedzy teoretyczno-poznawczej, znaczenie praktyczne. Prognostyczne (odnośnie do czasu i miejsca powstania zapadliska) znaczenie może mieć kontrola wstrząsów sejsmicznych, wskazujących na migracje stropu próżni (np. w obrębie pól kopalnianych). Również nagle zmiany poziomu wód podziemnych w otworach monitorowanych, zarówno w kierunku wzrostu jak i obniżania się (przy niezmiennych warunkach pogodowych,) mogą wskazywać na podziemne przemieszczanie się mas skalnych (obwały w próżniach). Z kolei pojawienie się koncentrycznych szczelin na powierzchni gruntu należy do zjawisk bezpośrednio wskazujących na miejsce i potencjalną wielkość (średnice) przyszłego zapadliska.

Skuteczne korzystanie z różnych sygnałów fizycznych, dochodzących z wnętrza Ziemi, jest jednak możliwe tylko w przypadku zorganizowania w obrębie zagrożonego terenu specjalnego monitoringu (sejsmicznego, hydrodynamicznego, wizualnego itp.).

LITERATURA

- Andriejczuk W. N., 1992: Ob effiektach soprowożdajuszczich prowały. W: Karstowyje prowały. Jekaterinburg: 6–12.
- Andriejczuk W. N., 1996: Bierieznikowskij prował. UrO RAN, Piern: 133 s.
- Andriejczuk W. N., 2007: Pieszcziera Zoluszka. Izd. Fakulteta Nauk o Ziemi Silijskiego uniwersiteta i Ukrainского instituta spielieologii i karstologii. Sosnowiec-Simfieropol. 408 s.
- Andreychouk V., Tyc A., 2014: Karst Hazards. In: Bobrowsky Peter T. (Ed.): Encyclopedia of Natural Hazards. Springer, XLI: 571–576.

Wpłynął do redakcji: 19 marca 2018

Поступила в редакцию: 19 марта 2018

Received: 19 March 2018