ФИЗИЧЕСКИЕ И ХИМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ ГОРНОГО ПРОИЗВОДСТВА. АЭРОГАЗОДИНАМИКА

УДК 624.131.1:551.252

DOI: 10.21440/0536-1028-2020-6-48-57

Техногенный соляной карст

Гайдин А. М.¹

¹ Институт горно-химической промышленности, г. Львов, Украина

e-mail: anatoliy.haydin@gmail.com

Реферат

Введение. В карстоведении различают два направления: спелеологическое и инженерно-геологическое. Последнее в свою очередь содержит два аспекта: поверхностный – строительство наземных сооружений на карстоопасных территориях и подземный – предупреждение возникновения карста и борьба с ним при разработке месторождений полезных ископаемых. Несмотря на то что шахты на соляных месторождениях работают со времен Средневековья, соляной карст по-прежнему является причиной гибели множества соляных шахт.

Целью работы является раскрытие физико-химического механизма развития соляного карста и причин аварий и затопления соляных шахт.

Методология. Проводился анализ регулярных маркшейдерских измерений деформаций земной поверхности, документация расслопроявлений в горных выработках, химические анализы рассолов, гидрометрические работы на поверхностных водотоках, прямые определения агрессивности рассолов, геофизические исследования методом естественного поля и вертикального электрического зондирования и т. д. В последние годы для контроля деформаций земной поверхности использовали данные космической радарной съемки.

Результаты. Ключом к раскрытию механизма соляного карста, являющегося причиной аварий, служит основанное А. М. Овчинниковым учение о гидродинамических системах, элементами которых являются области питания, транзита и разгрузки. Движение рассолов происходит в надсолевом коллекторе. Траектория движения рассолов определяется рельефом соляного зеркала. Напорный поток занимает приподнятые участки рельефа. Области питания приурочены к долинам водотоков, прорезающих слабопроницаемую толщу, покрывающую соли. В области транзита различаются зона напорного потока и вертикальная щель, в которой рассолы движутся в безнапорном турбулентном режиме. Областью разгрузки служат горные выработки. В них под действием агрессивных рассолов образуются ниши треугольной формы. Подрезание целиков приводит к их обрушению и провалам земной поверхности.

Выводы. Раскрытие механизма развития соляного карста позволило предложить методы прогнозирования его последствий и способы предупреждения затопления соляных шахт.

Ключевые слова: соляной карст; шахты; целики; аварии; кепрок; рассолы; гидродинамические системы.

Введение. Под термином «карст» понимают как процессы растворения горных пород, так и последствия этих процессов – подземные пещеры, провалы и проседания земной поверхности [1]. В природе развитие карста контролируется медленными тектоническими процессами, которые нарушают равновесное состояние гидродинамических систем. В индустриальную эру в зонах горнодобывающей деятельности и подземного строительства происходят быстрые и масштабные изменения гидрогеологических условий. Там, где распространены растворимые породы, развивается карст и сопутствующие ему геодинамические явления.

Карст, который возник или интенсифицировался в природно-технических системах, называют антропогенным или техногенным [2]. Полезно различать эти два термина. Антропогенным предлагается называть карст в районах древних рассолопромыслов, где преобладал ручной труд. Техногенный карст отличается крупномасштабным техническим воздействием на геологическую среду.

В карстоведении различают два направления: спелеологическое и инженерно-геологическое. Последнее в свою очередь содержит два аспекта: поверхностный – строительство наземных сооружений на карстоопасных территориях и подземный – предупреждение возникновения карста и борьба с ним при разработке месторождений полезных ископаемых. Наибольшую опасность представляет техногенный соляной карст. Несмотря на то что шахты на соляных месторождениях работают со времен Средневековья, соляной карст по-прежнему является причиной гибели множества соляных шахт.

Рис. 1. Контакт соли с кепроком (соль пронизана многочисленными вертикальными трещинами). Солотвинское месторождение

Fig. 1. Salt and cap rock contact (salt is permeated with numerous vertical fissures). Solotvino deposit

Обзор литературы. Проблемам техногенного соляного карста посвящены многочисленные публикации. В 1931 г. на базе Соляной лаборатории АН СССР был создан Всесоюзный институт галургии, обеспечивший успешное развитие соляной промышленности СССР. Одна из первых работ, посвященных соляному карсту – статья А. Э. Ходькова [3], в которой впервые указано на наличие водопроницаемых зон на контакте соляных залежей с покрывающими породами. Особое значение имеет посвященная техногенному соляному карсту книга Г. В. Короткевича [1]. Обзор аварийных ситуаций на соляных шахтах Германии дан в книгах А. Н. Андреичева [4] и М. И. Шимана [5]. В этих работах освещены обстоятельства, при которых за 70-летний период была затоплена 81 шахта из общего числа 254.

В последние десятилетия в исследованиях техногенного соляного карста наблюдалась определенная пауза, связанная с изменениями социально-экономических условий. В этот период на некоторых шахтах прекратились научные исследования, ослабела технологическая дисциплина [6].

Это послужило одной из причин нескольких крупных аварий. В России произошла серия провалов в Березниках, на Украине затоплены калийные рудники

в Калуше и Стебнике, а также две соляные шахты в Закарпатье. Это обусловило всплеск публикаций, посвященных анализу причин произошедших аварий и способов ликвидации негативных последствий [7–12]. В этих работах высказаны две гипотезы о механизме провалов. В одной из них причиной провалов считается суффозия и карст в пределах покрывающей толщи [11], в другой – обвал целиков шахты [9].

В Германии исследованиями соляного карста и его последствий занимаются сотрудники института Kali Umwelttechnik GmbH. В работах немецких специалистов большое внимание уделяется современным методам мониторинга (сейсмическим станциям, радарной космической съемке и др.), обеспечивающим кратковременный прогноз деформаций [13]. Подобные исследования ведутся в Польше [14–16]. Следует отметить, что в большинстве работ до сих пор преобладает описательный характер.

Рис. 2. Обобщенная схема гидродинамической системы при затоплении рудника № 2 в Стебнике: 1 – зона питания; 2, 3 – зоны напорного и безнапорного транзита; 4 – зона разгрузки; а – четвертичный водоносный горизонт; б – глинистый водоупор; в – соленосные породы; з – нерастворимый осадок; д – пресная вода и рассол

Fig. 2. Generalized chart of the hydrodynamic system during Stebnik mine no. 2 flooding: 1 – accumulation area; 2, 3 – areas of pressure flow and gravity transit; 4 – discharge area; а – quaternary water-bearing strata; б – argillaceous confining bed; в – saliniferous rock; з – insoluble sediment; д – fresh water and brine

Методика исследований. В течение последних десятилетий автором работы проведены исследования соляного карста в зонах деятельности калийных предприятий Предкарпатья и соляных шахт в Закарпатье. Проводился анализ регулярных маркшейдерских измерений деформаций поверхности, документация рассолопроявлений в горных выработках, химические анализы рассолов, гидрометрические работы на поверхностных водотоках, прямые определения агрессивности рассолов, геофизические исследования методом естественного поля и вертикального электрического зондирования и т. д. В последние годы для контроля деформаций земной поверхности использовались данные космической радарной съемки.

Накопленный материал позволил предпринять попытку установить некоторые количественные закономерности развития техногенного карста [17] и сопутствующих ему деформаций земной поверхности [12].

Гидрогеология месторождений соли. Залежи соли образуются в результате испарения морской воды в отрезанных от океана бассейнах. Сначала в осадок

выпадают карбонаты, за ними – сульфат кальция и хлорид натрия. Завершается цикл выпадением калийных и магниевых солей [18]. При рассолении бассейнов может наблюдаться обратный порядок выпадения солей. В ходе геологической истории залежи солей подвергаются размыву, складкообразованию, дизъюнктивным и пликативным тектоническим деформациям. Вследствие пластических свойств солей они могут выдавливаются из глубоких залежей, прорывая более молодые покрывающие породы с образованием соляных куполов, нередко выходящих на поверхность.

Рис. 3. Зона питания в разрезе:
1 – аллювиальные отложения; 2 – глинистый водоупор;
3 – соленосная порода
Fig. 3. Accumulation area in section:
1 – alluvial sediments; 2 – argillaceous confining bed;
3 – saliniferous rock

Те же пластические свойства обуславливают плотное сложение солей [19]. Возникающие в них под влиянием стресса трещины закрываются под давлением налегающих пород. Поэтому соляные массивы непроницаемы и могут содержать только незначительное количество насыщенных рассолов в замкнутых гнездах. Однако часто в геологическом прошлом соли выходили на поверхность, подвергались размыву и растворению. При этом на поверхности образовывалась проницаемая зона выщелачивания – коллектор (рис. 1). Над ним накапливались нерастворимые включения (элювий), которые называют кепроком. В дальнейшем залежи соли покрывались толщей водоупорных пород, защитивших соль от дальнейшего растворения в течение миллионов лет даже в районах с гумидным климатом.

Таким образом, основным гидрогеологическим элементом в соляных месторождениях является надсолевой коллектор. Рассол, насыщающий коллектор, в природных условиях характеризуется застойным режимом. Однако на многих неглубоко залегающих участках месторождений застойный режим надсолевого рассольного горизонта нарушен антропогенным карстом – результатом деятельности древних рассолопромыслов. Под действием откачки рассол приходит в движение, и к рассолозаборным колодцам подтягиваются агрессивные воды, проникающие через слабопроницаемые покрывающие отложения в местах с их минимальной толщиной. Так формируется гидродинамическая система с очагом разгрузки – рассолопромыслом – и зонами питания и транзита.

Примером могут служить рассолопромыслы в Стебнике. Уже в 1500–1770 гг. здесь действовала «Лесная шахта» глубиной 47 м с годовой производительно-

стью 2300 м³ соли. В 1770 г. вступила с действие «Дорфшахта» глубиной 46 м с производительностью 4700 м³/год, а с 1911 г. производительность выросла до 10 500 м³/год. До 1932 г. было добыто более 1 млн м³ рассола с минерализацией порядка 300 кг/м³, из чего следует, что образовалось 150 тыс. м³ карстовых пустот. В 1924 г. в долине речки образовался провал и вода ушла под землю.

Рис. 4. Схема зоны напорной фильтрации в условиях Стебницкого месторождения:

1 – кепрок; 2 – зона ненасыщенного рассола; 3 – зона насыщенного рассола; 4 – продукты обваливания покрывающих пород; 5 – калийная руда; 6 – соленосная брекчия

Fig. 4. Scheme of pressure filtration zone in the conditions of Stebnitsky deposit:

1 – cap rock; 2 – zone of nonsaturated brine; 3 – zone of saturated brine; 4 – top rock cave-in products; 5 – potash ore; 6 – saliferous breccia

В Пермской губернии первые солеварни появились в 1430 году, а с 1882 до 1972 г. действовал солеварный завод на берегу р. Камы [20].

Соляные шахты. Самая древняя соляная шахта «Величка» в Польше имеет 800-летнюю историю [16, 21]. Большинство шахт были построены в XIX веке. Первые шахты были неглубоки, а размеры поддерживающих покрывающую толщу целиков недостаточны, что явилось причиной обрушений кровли выработок и затопления. Так, например, на Солотвинском месторождении в Закарпатье работали и были затоплены старые шахты «Кунигунда», «Николай», «Альберт», «Христина», «Йосиф». Множество мелких соляных шахт были затоплены в Германии [5]. В современных шахтах над выработками оставляют мощный (порядка 50 м) водозащитный слой соли и предусматривают трехкратный запас надежности целиков. Также оставляют целики вокруг разведочных скважин.

Причины аварий на соляных шахтах. Из описания аварий на соляных шахтах следует, что основными причинами прорывов воды являются: 1) вскрытие выработками надсолевого коллектора; 2) вскрытие выработками некачественно затампонированных скважин; 3) разрушение межкамерных целиков, приведшее к нарушению целостности водозащитной толщи. Приведем примеры.

1) Бурение разведочных скважин создает опасность их вскрытия при эксплуатации. Приходится оставлять вокруг скважин целики, что ведет к потерям эксплуатационных запасов. Поэтому сеть скважин очень разрежена и не позволяет детально картировать рельеф соляного зеркала. Как выяснилось уже при проведении горных работ в Стебнике, в указанном рельефе имеются углубления, достигающие 50 м. На руднике № 1 одно из таких углублений было вскрыто передовой скважиной при проходке квершлага. Несмотря на ряд принятых мер, в 2003 г. приток рассола достигал 280 м³/сут и в течение года возрос до 1400 м³/сут. Приток в 900 м от места прорыва воды на берегу пруда произошел провал, через

который вода из водоема вытекла в шахту. Прорыв был ликвидирован путем засыпки провала и возведения перемычки в квершлагае.

2) Для предупреждения прорывов воды через скважины правилами безопасности предусмотрено оставление вокруг них целиков. Однако в силу различных причин документация о давних разведочных скважинах не сохранилась. В Солотвине выработки шахты № 9 приблизились к одной из таких скважин, что привело к прорыву воды, образованию провала и затоплению шахты.

Рис. 5. Щель глубиной 400 м в солях, промытая водопадом над шахтой № 8 в Солотвине
Fig. 5. 400 m deep fissure in salt washed by the waterfall over mine no. 8 in Solotvino

3) В октябре 2006 г. на руднике Первого Березниковского калийного рудоуправления произошел прорыв воды и началось его затопление. В верхней части целиков шириной 12 м были пройдены выработки шириной 3 м. Таким образом, фактическая ширина целиков составила всего 4,5 м. Целики потеряли несущую способность, что привело к обрушению междупластья и вышележащих горизонтов [9, 22, 23].

Гидродинамические системы. Ключом к раскрытию механизма образования соляного карста, являющегося причиной аварий, служит основанное А. М. Овчинниковым [20] учение о гидродинамических системах, элементами которых являются области питания, транзита и разгрузки (рис. 2).

Области питания надсолевого рассольного горизонта обычно образуются в долинах рек и ручьев, где мощность покрывающих соль слабо проницаемых отложений минимальна.

Здесь происходит вертикальный переток пресной воды из аллювиальных отложений в надсолевой коллектор. В результате растворения солей на их контакте с покрывающими породами формируется субгоризонтальная полость (рис. 3). На нижней ее поверхности накапливаются нерастворимые остатки и продукты обваливания покрывающих пород. Эти отложения препятствуют растворению солей, поэтому полость распространяется преимущественно по горизонтали. Над ней оседают вышележащие отложения, и на земной поверхности образуются блюдцеобразные озера. Поглощение поверхностных вод может быть установлено гидрометрическими замерами.

Рис. 6. Подрезание целиков агрессивным рассолом (модель)
Fig. 6. Pillars undercut with aggressive brine (model)

Область транзита простирается от зоны питания до места притока воды в шахту. В начальный период движение воды происходит в напорном режиме, поток занимает все сечение надсолевого коллектора. По мере продвижения вода, поступающая из области питания, насыщается солями. Наивысшей концентрацией отличается нижняя часть потока, контактирующая с солью. Менее плотная соленая вода вытесняется в повышенные участки надсолевого коллектора (рис. 4). Кроме того, подошва потока кольматируется нерастворимым осадком. Из-за этого область транзита занимает самую приподнятую часть поверхности соляного зеркала. *Траектория потока может быть установлена просто по карте изогипс подошвы покрывающей толщи.* Эта закономерность подтверждается геофизическим методом ЕП (естественного поля).

В месте притока рассола в шахту образуется водопад. При этом рассол из верхней и нижней частей напорного потока смешивается и приобретает агрессивные свойства. Поток прорезает в солях узкую вертикальную щель (рис. 5) глубиной от соляного зеркала до места шахтного водоотлива. Течение приобретает безнапорный характер и турбулентный режим. Вертикальная щель растет навстречу потоку подобно оврагу. Когда она достигает области питания, образуются большие провалы поверхности. Наблюдались случаи, когда в провалы полностью поглощался сток малых рек. В работе [17] приведена методика гидродинамического и гидрохимического расчетов скорости продвижения водопада и размеров карстовой щели.

Ширина щели зависит от расхода потока. На поверхности вдоль щели обычно прослеживается ложбина. Если щель достаточно широкая, над ней образуются провалы покрывающих пород.

Зоной разгрузки потока служат горные выработки. При затоплении выработок агрессивным рассолом их подошва не растворяется, так как в основании потока накапливаются нерастворимые осадки. В стенках выработок и в основе целиков образуются ниши треугольной формы, углубляющиеся по мере поднятия уровня рассолов (рис. 6). Подрезание основы целиков продолжается до тех пор, пока целики не утрачивают несущую способность и не происходит их обрушение. В работе [12] дается методика прогнозирования обрушения. В соответствии с прогнозом на Стебницком руднике обвалились четыре целика и образовался провал поверхности диаметром 200 м и глубиной 40 м.

Заключение. Раскрытие механизма развития соляного карста позволило предложить методы прогнозирования его последствий и способы предупреждения затопления соляных шахт. Однако предложенные меры не были реализованы по причине недостаточного и несвоевременного финансирования, что явилось причиной упадка калийной и соляной промышленности Украины.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Короткевич Г. В. Соляной карст. Л.: Недра, 1970. 256 с.
2. Толмачев В. В., Троицкий Г. М., Хоменко В. П. Инженерно-строительное освоение закарстованных территорий. М.: Стройиздат, 1986. 120 с.
3. Ходьков А. Э. Геологическая роль процессов подземного выщелачивания галогенных пород // Труды ВНИИГ. 1959. Вып. 35. С. 395–421.
4. Андреичев А. Н. Разработка калийных месторождений. М.: Недра, 1966. 250 с.
5. Шиман М. И. Предотвращение затопления калийных рудников. М.: Недра, 1992. 150 с.
6. Павлюк В. И. Соляні родовища Передкарпаття і світу та особливості розвитку і активізації карсту на ділянках їхнього видобування // Строительство и техногенная безопасность. 2011. Вып. 37. С. 97–108.
7. Барях А. А., Телегина Е. А. Анализ условий разрушения водозащитной толщи при различных вариантах камерной системы разработки // ГИАБ. 2013. № 1. С. 34–40.
8. Барях А. А., Самodelкина Н. А. Геомеханическая оценка интенсивности деформационных процессов над затопленным калийным рудником // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2017. № 4. С. 33–46.
9. Борзаковский Б. А., Мараков В. Е., Теннисон Л. О. Прогноз негативного влияния затопления рудника БКПРУ-1 ОАО «Уралкалий» на городскую и промышленную застройку г. Березники // ГИАБ. 2009. № 7. С. 381–386.
10. Методические указания по выбору мер охраны для существующих и проектируемых объектов на территориях, подрабатываемых калийными рудниками. Л.: ВНИИГ, 1976. 266 с.
11. Осипов В. И., Барях А. А., Санфиоров И. А., Мамаев Ю. А., Ястребов А. А. Гидрогеомеханические условия формирования карстовых провалов на территории калийных рудников в г. Березники Пермского края // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геоэкология. 2016. № 2. С. 142–148.
12. Рудько Г. І., Гайдін А. М. Провали. Деформації земної поверхні над гірничими виробками і карстами. Київ–Чернівці: Букрек, 2019. 192 с.
13. Thoma H., Seifert G., Kuehn F. Example of the development of sinkholes above flooding salt mines in central Germany and ways of remote detection of areas with a potential risk of fall // Fall 2000 meeting. San Antonio, Texas, USA. 15–18 October 2000. P. 163–181.
14. Milczarek W. Of post induced seismic deformation of the 2016 MW 4/2 Tarnowek Poland mining tremor based on DinSAR and SBAS method. Acta Geodin. Geomater. 2019. No. 2. P. 183–193.
15. Malinowska A. A., Witkowski W. T., Guzy A., Heymanowski R. Mapping ground movements caused mining-induced earthquakes applying satellite radar interferometry. Eng. Geol. 2018. No. 246. P. 402–411.
16. Трофимов В. И., Кочнева М. Н. Гидрогеологическое прогнозирование карстовых процессов на шахтном поле БКПРУ-1 ОАО «Уралкалий» // Горное эхо. 2012. Вып. 2. С. 33–45.
17. Гайдін А. М., Рудько Г. І. Техногенний карст. Київ–Чернівці: Букрек, 2016. 200 с.
18. Валяшко М. Г. Геохимические закономерности формирования месторождений калийных солей. М: МГУ, 1962. 397 с.
19. Константинова С. А., Аптуков В. Н. Некоторые задачи механики деформирования и разрушения соляных пород. Новосибирск: Наука, 2013. 100 с.
20. Технология добычи солей / Р. С. Пермяков [и др.]. М.: Недра, 1981. 272 с.
21. Мацяшек Я., Шевчик Я., Ермоленко В. Рудник Величка (X–XX вв.). Краков–Минск, 1997. 28 с.
22. Овчинников А. М. Общая гидрогеология. М.: Госгеолтехиздат, 1955. 260 с.
23. Кутепов В. М., Кожевникова В. Н. Устойчивость закарстованных территорий. М.: Наука, 1989. 151 с.
24. Физико-механические свойства соляных пород / Н. М. Проскуряков [и др.]. Л.: Недра, 1973. 272 с.

25. Шокин Ю. П. О нарушениях сплошности подработанной водозащитной толщи на калийных рудниках // Горный журнал. 2019. № 1. С. 56–58.

26. Maciaszek J. Rezultaty badan gorotworu i powerchni terenu w strefach przyszbowych kopalni soli „Weliczka”. Kwartalnik „Gornictwo”. Z. 4. Krakow. 1996. 104–110.

Поступила в редакцию 14 мая 2020 года

Сведения об авторах:

Гайдин Анатолий Маркович – кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник, руководитель научного центра Института горно-химической промышленности. E-mail: anatoliy.haydin@gmail.com

DOI: 10.21440/0536-1028-2020-6-48-57

Technogenic salt karst

Anatolii M. Gaidin¹

¹ Institute of Mining and Chemical Industry, Lvov, Ukraine.

Abstract

Introduction. There are the speleological and engineering-geological areas in karst studies. Engineering-geological area has two aspects, the surface aspect including the construction of surface buildings in the areas with the karst hazard and the subsurface aspect of prevention and protection from karstification when developing mineral deposits. Although shafts in salt mines has been working since the Middle Ages, the salt karst is still the reason for the destruction of a lot of salt mines.

Research aim is to reveal the physical and chemical mechanism of salt karst development and the reasons for accidents and flooding in salt mines.

Methodology included the analysis of regular survey measurements of surface deformation, recording of brine manifestations in mine workings, chemical analyses in brines, hydraulic measurements at surface watercourses, direct determinations of brine aggression, geophysical research by the natural field method, vertical electrical sounding, etc. In recent years, in order to control surface deformation, the data from the radar survey have been used.

Results. A clue to the mechanism of salt karst responsible for accidents is the theory of hydrodynamic systems by A. M. Ovchinnikov, the elements of which are the areas of accumulation, transit, and discharge. Brine motion is in the supra-salt reservoir. The trajectory of brine motion is determined by the relief of the salt table. Pressure flow take up the elevated terrain. Accumulation areas are confined to stream corridors permeating the low-permeability strata which covers the salt. The area of transit distinguishes between the zone of the pressure flow and the vertical slot where the brines move in the gravity turbulent conditions. Mine workings make up the discharge area. Within them under the action of aggressive brines triangular niches develop. Pillars undercut results in their collapse and surface sink.

Summary. Salt karst development mechanism disclosure has made it possible to propose the methods for predicting its effect and the ways of predicting flooding in salt mines.

Key words: salt karst; mines; pillars; accidents; cap rock; brines; hydrodynamic systems.

REFERENCES

1. Korotkevich G. V. *Salt karst*. Leningrad: Nedra Publishing; 1970. (In Russ.)
2. Tolmachev V. V., Troitskii G. M., Khomenko V. P. *Construction-engineering development of karstified territories*. Moscow: Stroiizdat Publishing; 1986. (In Russ.)
3. Khodkov A. E. Geological role of halogen rock underground leaching processes. *Trudy VNIIG = Proceedings of VNIIG*. 1959; 35: 395–421. (In Russ.)
4. Andreichev A. N. *Development of potash deposits*. Moscow: Nedra Publishing; 1966. (In Russ.)
5. Shiman M. I. *Potash mines flood prevention*. Moscow: Nedra Publishing; 1992. (In Russ.)
6. Pavliuk V. I. Salt deposits of the Carpathian region and the world and features of the development and activation of karst in the areas of their production. *Stroitelstvo i tekhnogennaia bezopasnost' = Construction and Industrial Safety*. 2011; 37: 97–108.
7. Bariakh A. A., Telegina E. A. The research on failure condition for various kinds of heading-and-stall method. *Gornyi informatsionno-analiticheskii biulleten (nauchno-tekhnicheskii zhurnal) = Mining Informational and Analytical Bulletin (scientific and technical journal)*. 2013; 1: 34–40. (In Russ.)
8. Bariakh A. A., Samodelkina N. A. Geomechanical estimation of deformation intensity in rock mass above the flooded potash mine. *Fiziko-tekhnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh = Journal of Mining Science*. 2017; 4: 33–46. (In Russ.)
9. Borzakovskii B. A., Marakov V. E., Tennison L. O. The forecast of the negative influence of BKPRU-1 JSC “Ural-Kaliy” mine flooding on the city and industrial buildings of Berezniki town. *Gornyi informatsionno-analiticheskii biulleten (nauchno-tekhnicheskii zhurnal) = Mining Informational and Analytical Bulletin (scientific and technical journal)*. 2009; 7: 381–386. (In Russ.)

10. *Procedural guidelines on protection measures selection for existing and designed facilities at the territories undermined with potash mines*. Leningrad: VNIIG Publishing; 1976. (In Russ.)
11. Osipov V. I., Bariakh A. A., Sanfirov I. A., Mamaev Iu. A., Iastrebov A. A. Hydrogeomechanical conditions of karst sinkhole formation in the area of potassium mines in Berezniki town, Perm krai. *Geoekologiya. Inzhenernaya geologiya. Gidrogeologiya. Geokriologiya = Environmental Geoscience*. 2016; 2: 142–148. (In Russ.)
12. Rudko G. I., Gaidin A. M. *Sinkhole. Deformations of the earth's surface over mine workings and karsts*. Kiev–Chernivtsi: Bukrek Publishing; 2019.
13. Thoma H., Seifert G., Kuehn F. Example of the development of sinkholes above flooding salt mines in central Germany and ways of remote detection of areas with a potential risk of fall. In: *Fall 2000 meeting. San Antonio, Texas, USA. 15–18 October 2000*. P. 163–181.
14. Milczarek W. Of post induced seismic deformation of the 2016 MW 4/2 Tarnowek Poland mining tremor based on DinSAR and SBAS method. *Acta Geodin. Geomater.* 2019; 2: 183–193.
15. Malinowska A. A., Witkowski W. T., Guzy A., Heymanowski R. Mapping ground movements caused mining-induced earthquakes applying satellite radar interferometry. *Eng. Geol.* 2018; 246: 402–411.
16. Trofimov V. I., Kochneva M. N. Hydrogeological prediction of karstification at the take of BKPRU-1 of JSC Uralkali. *Gornoe ekho = Echo*. 2012; 2: 33–45. (In Russ.)
17. Gaidin A. M., Rudko G. I. *Technogenic karst*. Kiev–Chernivtsi: Bukrek Publishing; 2016. 200 c.
18. Valiashko M. G. *Geochemical patterns of potash deposits formation*. Moscow: MSU Publishing; 1962. (In Russ.)
19. Konstantinova S. A., Aptukov V. N. *Some problems of salt rock deformation and fracture mechanics*. Novosibirsk: Nauka Publishing; 2013. (In Russ.)
20. Permiakov R. S et al. *Technology of salt mining*. Moscow: Nedra Publishing; 1981. (In Russ.)
21. Matsiashek Ia., Shevchik Ia., Ermolenko V. *Velichka mine (X–XX centuries)*. Krakov–Minsk, 1997.
22. Ovchinnikov A. M. *General hydrogeology*. Moscow: Gosgeoltekhisdat Publishing; 1955. (In Russ.)
23. Kutevov V. M., Kozhevnikova V. N. *Karstified territories stability*. Moscow: Nauka Publishing; 1989. (In Russ.)
24. Proskuriakov N. M. et al. *Physical and mechanical properties of salt rock*. Leningrad: Nedra Publishing; 1973. 272 c.
25. Shokin Iu. P. Undermined water-impervious strata discontinuity in potassium mines. *Gornyi zhurnal = Mining Journal*. 2019; 1: 56–58.
26. Maciaszek J. Rezultaty badan gorotworu i powerchni terenu w strefach przyszbowych kopalni soli “Weliczka”. Kwartalnik “Gornictwo”. Z. 4. Krakow. 1996. 104–110.

Received 14 May 2020

Information about authors:

Anatolii M. Gaidin – PhD (Geology and Mineralogy), senior researcher, Head of the Research Center, Institute of Mining and Chemical Industry. E-mail: anatoliy.haydin@gmail.com

Для цитирования: Гайдин А. М. Техногенный соляной карст // Известия вузов. Горный журнал. 2020. № 6. С. 48–57. DOI: 10.21440/0536-1028-2020-6-48-57

For citation: Gaidin A. M. Technogenic salt karst. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = News of the Higher Institutions. Mining Journal*. 2020; 6: 48–57 (In Russ.). DOI: 10.21440/0536-1028-2020-6-48-57