

УДК 504.54

*А.М.Гайдин*

**ВЛИЯНИЕ ТЕХНОГЕННОЙ  
ДЕЯТЕЛЬНОСТИ  
НА СОЛЯНОЙ КАРСТ**

*ОАО «Институт горно-химической промышленности», Львов*

**У статті розглянутий комплекс проблем, які виникають при розвитку соляного карсту в результаті порушення гідродинамічного режиму надсолевого водоносного горизонту. Запропоновано гідродинамічну модель руху води від місць живлення до місця розвантаження з формуванням зон напірної фільтрації та вільного потоку в підземних каньйонах. Досліджено методи боротьби з техногенним соляним карстом.**

**В статье рассмотрен комплекс проблем, возникающих при развитии соляного карста в результате нарушения гидродинамического режима надсолевого водоносного горизонта. Предложена гидродинамическая модель движения воды от мест питания к месту разгрузки с формированием зон напорной фильтрации и свободного потока в подземных каньонах. Исследованы методы борьбы с техногенным соляным карстом.**

Карст – причина гибели многих соляных шахт [1,2]. Особенно обострилась проблема техногенного соляного карста в последние годы. В декабре 2008 года затоплена шахта № 9 в Солотвине. Назревает авария на руднике №2 в Стебнике. Гибнет и единственный в мире калийный карьер в Калуше. Затопление соляных шахт пресной водой сопровождается образованием огромных провалов земной поверхности, засолением подземных вод и другими негативными последствиями.

В природе поверхность солей изолирована от зоны активного водообмена глинистым «кепроком», образовавшимся вследствие накопления на их поверхности нерастворимых включений [3]. На контакте с кепроком распространена проницаемая зона, заполненная рассолом – надсолевой водоносный горизонт (НВГ). Слабая проницаемость покрывающих пород обуславливает застойный режим НВГ в природных условиях. Движение воды осуществляется в ламинарном режиме. Агрессивная слабо минерализованная вода занимает верхнюю часть потока, а с солью соприкасается насыщенный рассол. Поэтому природные проявления соляного карста встречаются редко. В большинстве случаев карст возникает вследствие нарушения гидродинамического режима подземных вод при проведении горных работ.

**Соляные шахты.** Подземную разработку солей ведут камерным или камерно-столбовым способами, с оставлением целиков. Для предупреждения прорыва воды из НВГ над выработками оставляют водозащитную толщу. Отработку ведут несколькими горизонтами, между которыми оставляют междуэтажные потолочины.

В Солотвине добыча соли ведётся испокон веков. В западной части соляного купола затоплены шахты Кунигунда, Николай, Альберт, Христина, Иосиф, на их месте образовались озёра, ставшие популярным местом отдыха. В центральной части купола расположена шахта № 7 (1808-1952). В 1966 году в период паводка шахта была затоплена. Образовался постоянно растущий провал, диаметр которого уже достиг 250 м. Шахта №8 действует с 1804 г. Объём выработанного пространства 9,4 млн. м<sup>3</sup>. Приток воды в шахту до 150 м<sup>3</sup>/ч. Над восточным крылом шахтного поля водозащитная толща размывта и образовался провал диаметром 170 м. На глубине 300 м в шахте размещена алергологическая больница, из-за неё шахту поддерживают в рабочем состоянии. Шахта № 9 действовала с 1975 г. Отработан только один горизонт на глубине 350 м. В конце 2004 г. на восточном фланге шахтного поля начался приток воды. В июле 2006 г. он достиг 100 м<sup>3</sup>/ч. Откачиваемый рассол сбрасывали в озёра на месте затопленных шахт. Оттуда вода по карстовым каналам возвращалась в шахту, вследствие

чего приток возрос до 500 м<sup>3</sup>/ч. В декабре 2008 г. откачку остановили, шахта погибла.

В Калуше действовали четыре калийных шахты и карьер. Рудник "Калуш" эксплуатировали более ста лет. Его заполнили насыщенными рассолами. Рудник "Голинь" работал с 1930 по 1972 г., объём выработок 1,7 млн. м<sup>3</sup>. Состояние выработок не известно. Рудник "Ново-Голинь" действовал с 1966 по 1995 г., объём выработок 12 млн. м<sup>3</sup>. В 1996 году начато затопление рудника рассолом. Сначала их готовили специально из отходов обогащения, позже стали подавать рассол из карьера. Уже закачано 11 млн. м<sup>3</sup> рассолов. Рудник Пийло проектировали для замены выбывающих мощностей. Пройдено три вертикальных ствола глубиной около 600 м, руддворы и квершлагги. С 1997 г. строительство остановлено, состояние выработок не известно.

В Стебнике начало соляного промысла относится к XII столетию. Вначале добывали каменную соль. В 1843 году заложены стволы рудника № 1. Поскольку соль содержит большое количество нерастворимых примесей, её добывали способом выщелачивания с последующей выпаркой [2]. Образовались 11 «луговень» диаметром до 100 м, самая большая имеет площадь 2,2 га. В 1873 г. впервые раскрыт пласт калийной соли и с 1922 г. ее начали добывать на удобрения. Объём выработок около 12 млн. м<sup>3</sup>. Рудник поддерживается в рабочем состоянии.

В начале шестидесятых вступил в строй рудник № 2. Выработки расположены на 5 горизонтах. Отработаны два верхних горизонта. Объём выработанного пространства 15,8 млн. м<sup>3</sup>. После аварии на хвостохранилище в 1983 г. была остановлена обогатительная фабрика, добыча руды уменьшилась, а с 1990 г вообще прекратилась из-за отсутствия спроса. Водоприток в шахту появился в 1978 году. Для перехвата воды сооружена система дренажных выработок в водозащитной толще. С каждым годом приток увеличивается и уже достиг 1400 м<sup>3</sup>/сутки. В январе 2002 года осушение

прекратили. Разработан проект затопления рудника рассолом из отходов обогащения. Однако эти работы до сих пор не начаты. Происходит самозатопление рудника. В зоне питания водоносного горизонта в долине речки Вышницы возникла серия провалов и образовалось озеро. Создалась угроза разрушения ответственных коммуникаций: дороги, водопровода, электролинии.

**Свойства солей.** Месторождения каменной соли сложены галитом (NaCl) с примесью нерастворимых минералов. Сопротивление сжатию около 30 МПа. Выдерживание образцов чистой соли в насыщенном рассоле вызывает уменьшение прочности с 28 до 18 МПа [4].

Калийные руды Предкарпатья полиминеральны. Основные минералы:

галит;  
лангбейнит (K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>\*2MgSO<sub>4</sub>);  
каинит (KCl\*MgSO<sub>4</sub>\*3H<sub>2</sub>O);  
полигалит (K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>\*MgSO<sub>4</sub>\*2CaSO<sub>4</sub>\*2H<sub>2</sub>O);  
кизерит (MgSO<sub>4</sub>\*3H<sub>2</sub>O);  
нерастворимые примеси в количестве от 10 до 16%.

Прочность калийных руд в среднем 48 МПа. При замачивании каинитовой руды в насыщенном по NaCl рассоле прочность уменьшается до 7-8 МПа. Прочность вмещающих пород - соленосных глин - в тех же условиях уменьшилась с 34 до 4 МПа при влажности 1-9%.

Даже при малых нагрузках в образцах каменной соли проявляется стабильная ползучесть. Когда нагрузка достигает 55% от сопротивления одноосному сжатию, ползучесть через 160 суток переходит в прогрессирующую. Поэтому долговременная прочность соли составляет около 60% от прочности при быстром нагружении.

Растворимость каменной соли в воде около 310 г/л, калийной – до 420 г/л. Быстро растворяются сильвин, карналлит, галит, каинит. Лангбейнит и полигалит растворяются медленно, а кизерит практически не растворим.

Средний состав насыщенного раствора при температуре 15<sup>0</sup>С следующий:

Компоненты	K <sup>+</sup>	Mg <sup>++</sup>	Ca <sup>++</sup>	Na <sup>+</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	H <sub>2</sub> O	Сумма
Содержание, г/л	50	31	0.12	73	192	75	857	420

Скорость растворения солей зависит от ориентации растворяемой поверхности [5]. На наклонной поверхности образуется слой насыщенного рассола, который под влиянием сил гравитации стекает вниз. Толщина слоя уменьшается с увеличением наклона. При затоплении горизонтальных горных выработок быстрее всего растворяется кровля и верхняя часть стенок, отчего последние приобретают наклон. Нерастворимый остаток сначала стекает по наклонной поверхности и образует призму на почве выработки. Когда наклон достигает угла естественного откоса осадка ( $40-45^{\circ}$  к горизонту), поверхность растворения покрывается нерастворимым материалом, процесс прекращается.

Скорость растворения вертикальной стенки каменной соли в пресной воде достигает 70 м/год. Кровля выработок растворяется вдвое быстрее, чем стенки. По данным Я.М. Семчука [6] скорость растворения каинитовой руды в пресной воде составляет 19 м в год. А.Я. Кривоусов [7] в результате крупномасштабных натуральных опытов установил величину скорости растворения каинитовой руды 29,7 м/год. В ненасыщенном рассоле скорость растворения солей пропорциональна дефициту насыщения. Если в насыщенный по NaCl рассол поместить образец калийной руды, соли калия и магния растворяются, образцы разрушаются. При этом галит может частично выпасть в осадок.

**Устойчивость целиков.** Мера устойчивости целиков соляных шахт - запас прочности, который выражается отношением крепости к нагрузке [8]:

$$n = S_n * \sigma / S_y * \gamma * H, \quad (1)$$

де  $S_n$  – площадь столба налегающих на целик пород,  $\sigma$  – сопротивление сжатию с учетом коэффициента формы,  $S_y$  – площадь целика,  $\gamma$  – объемный вес налегающих пород,  $H$  – глубина от поверхности земли до кровли выработки.

Характер деформации целиков зависит от запаса прочности. Различают целики податливые, жестко-пластичные и жесткие [2]. При запасе прочности меньше 1,4 целики только кратковременно сохраняют несущую способность. Деформация целиков с запасом прочности от 1,4 до 2,5 проходит в несколько стадий: начальную, активную и затухающую. В начальную стадию целики оседают без разрушения. Активная стадия

начинается, когда оседание достигает 2-3% от высоты целика. Возникают трещины, стенки обваливаются, заполняя выработанное пространство. В затухающую стадию продукты разрушения уплотняются, а скорость оседания покрывающей толщи уменьшается.

При запасе прочности целиков больше 2,5 в них под действием нагрузки возникают напряжения, вызывающие перестройку структуры солей. Соль уплотняется, её прочность возрастает и деформации затухают. Целик не разрушается, однако вследствие пластических деформаций постепенно расширяется вплоть до схождения стенок камер. Сроки оседания исчисляются веками. Величина конечного оседания зависит от высоты выработанного пространства и коэффициента извлечения. Максимальную скорость оседания (мм/год) по П.К.Гаркушину [8] можно оценить отношением  $V_{\text{макс}} = 100 / (1,4 * n - 1)$ . Здесь  $n$  – коэффициент запаса прочности целиков. Средняя скорость равна половине максимальной. Период, в продолжение которого наблюдается оседание, равен отношению конечного оседания к средней его скорости. Например, для рудника № 2 в Стебнике максимальное оседание составляет 13 м, максимальная скорость 32,7 мм в год, период оседания 397 лет.

**Влияние затопления выработок на состояние целиков.** При затоплении выработок напряженное состояние изменяется под влиянием трёх основных факторов: 1) уменьшения сопротивления пород сжатию вследствие их увлажнения, 2) растворения стенок и кровли, 3) давления жидкости на стенки и потолочину. При увлажнении снижается прочность материала целиков. При растворении уменьшается их поперечный размер. Затопление выработок приводит к уменьшению напряжений под действием Архимедовых сил.

Жидкость давит на кровлю камер с силой  $F = \rho * g * H_{\text{жс}} * S$ , где  $\rho$  – плотность жидкости,  $g$  – ускорение свободного падения,  $H_{\text{жс}}$  – высота столба жидкости над кровлей,  $S$  – площадь потолочины. На величину этой силы уменьшается вес пород, удерживаемых целиком.

В период затопления жидкость давит только на боковые стенки целика. Это уменьшает вертикальную составляющую

напряжения на величину указанного давления [9]:

$$\sigma_z = P - \rho * g * H_{жс}, \quad (2)$$

где  $P$  – давление от веса покрывающих пород и тела целика,  $H_{жс}$  - высота столба жидкости над сечением, в котором определяется напряжение.

Взвешивающее влияние при полном затоплении можно приблизительно выразить коэффициентом уменьшения нагрузки на целики:

$$K = 1 - \rho / \gamma, \quad (3)$$

где  $\gamma, \rho$  – плотности пород и жидкости соответственно.

Например, если плотность соли  $\gamma = 2,2$  г/см<sup>3</sup>, а рассола  $\rho = 1,2$  г/см<sup>3</sup>,  $K = 0,45$ , то

есть напряжение составит только 45% по отношению к напряжению до затопления. Соответственно коэффициент запаса прочности увеличится в  $1/K$  раз, в данном примере в 2,2 раза. Для демонстрации влияния силы взвешивания допустим, что плотность породы и жидкости одинаковы, а уровень жидкости достигает земной поверхности. Тогда  $K=0$ , покрывающие породы плавают!

**Влияние растворения на устойчивость целиков.** Используя формулу (1), оценим на примере Стебницкого рудника № 2 запас прочности целиков второго горизонта в зависимости от глубины растворения стенок. Результаты расчёта без учёта сил взвешивания даются в таблице 1.

Таблица 1- Зависимость коэффициента запаса прочности целиков от глубины растворения

Глубина растворения, м	Ширина целика, м	Уменьшение запаса прочности, %	Запас прочности по горизонтам	
			1	2
0	12	0	3	2,8
0,5	11	11,3	2,66	2,48
1	10	22,3	2,32	2,17
1,5	9	33,2	2,00	1,86
2	8	43,8	1,68	1,57
2,5	7	54,2	1,37	1,28
3	6	64,2	1,07	1,00
3,5	5	73,6	0,79	0,73

Результаты расчёта для второго горизонта иллюстрирует график (рисунок 1), из которого видно, что длительная устойчивость целиков (запас больше 2,5) сохранится только при условии, что глубина растворения не превысит 0,5 м.

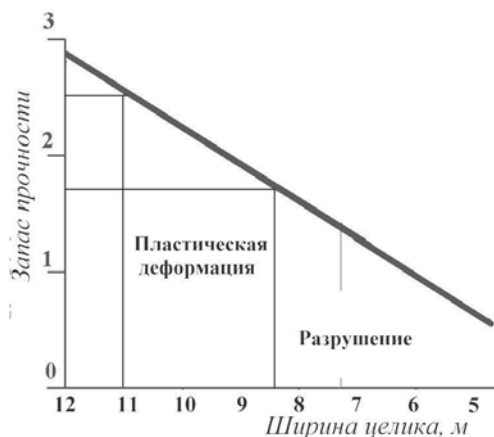


Рисунок 1 - Зависимость запаса прочности целиков от их ширины

При дальнейшем растворении коэффициент запаса становится меньше 2,5 и целик становится жестко-пластичным. Если же глубина растворения достигает 2 м, целик становится податливым и скоро переходит в стадию активного разрушения.

Затопление шахт проходит в динамическом режиме. Вблизи от места поступления вода наиболее агрессивна, а по мере продвижения насыщается солями и её растворяющая способность уменьшается.

**Движение воды в горных выработках.** Течение воды в выработках может быть безнапорным или напорным. Рассмотрим простейшие случаи. Примем, что в горизонтальную тупиковую выработку с постоянным сечением с одного конца поступает жидкость с постоянным во времени расходом  $Q_0$  (рисунок 2). Расход потока  $Q$  в любом сечении уменьшается обратно пропорционально расстоянию от точки налива и равен  $Q = Q_0 * (L-x) / L$ . (4)

Здесь  $L$  - длина выработки,  $x$  - расстояние от места налива.

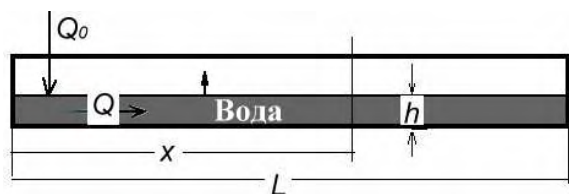


Рисунок 2 - Движение однородной жидкости в тупиковой выработке

В конце выработки  $x = L$ ,  $Q = 0$ . Горизонтальная составляющая скорости течения  $V$  определяется отношением расхода  $Q$  к площади сечения потока. В прямоугольной выработке шириной  $B$ :

$$V = Q/B \cdot h = Q_0 \cdot (L-x)/L \cdot B \cdot h, \quad (5)$$

где  $h$  - глубина потока,  $h = Q_0 \cdot t/L \cdot B$ , где  $t$  - время от начала налива жидкости. С учётом изменения глубины потока  $V = (L-x)/t$ , то есть скорость течения обратно пропорциональна времени от начала затопления.

Скорость поднятия уровня воды  $v$  равна отношению расхода жидкости к площади горизонтального сечения выработок:

$$v = Q_0 / L \cdot B, \quad (6)$$

Длительность затопления равна отношению объёма выработки к расходу воды.

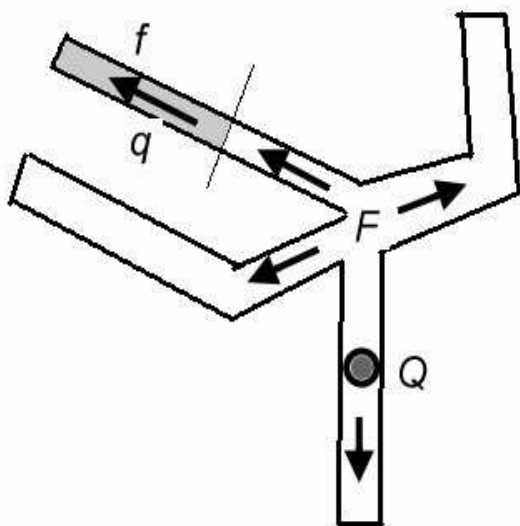


Рисунок 3 - Распределение жидкости в системе разветвлённых выработок

В системе разветвленных (рисунок 3) выработок часть потока, проходящего через сечение любой из выработок равна отношению площади горизонтального сечения выработок ниже по течению  $f$  к общей их

площади  $F$ . Расход потока  $q$  в любом вертикальном сечении

$$q = Q_0 \cdot f/F. \quad (7)$$

При камерной системе разработки после затопления горизонтальных выработок наступает режим, характеризующийся напорным движением в горизонтальных штреках и ортах и вертикальным восходящим течением в камерах (рисунок 4). От места подачи в выработку жидкость течёт по штрекам, заходит в орты и поднимается в камеры. Скорость в горизонтальных выработках постоянна во времени. Расход жидкости  $Q_i$  в штреках около камер с номером  $i$  определяется формулой:

$$Q_i = Q_0 \cdot \Sigma S_{n-1} / \Sigma S_n, \quad (8)$$

где  $Q_0$  - суммарный расход,  $\Sigma S_n$  - сумма площадей всех камер,  $\Sigma S_{n-1}$  - сумма площадей камер от  $i$  до  $n$ , де  $n$  - число камер.

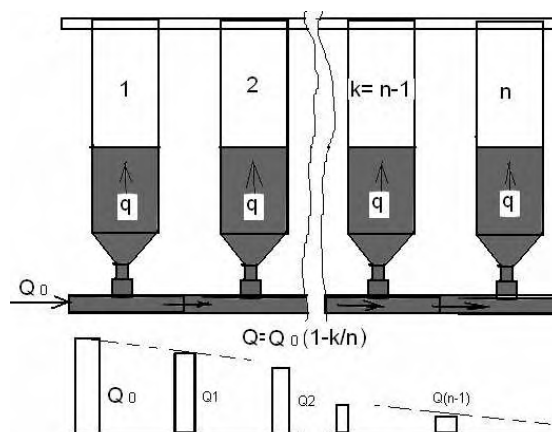


Рисунок 4 - Распространение жидкости при затоплении камер

Расход воды  $Q_i$ , поступающей в камеру с номером  $i$ , равен

$$Q_i = v \cdot S_i, \quad (9)$$

где  $v$  - скорость поднятия уровня,  $S_i$  - площадь горизонтального сечения камеры.

По мере продвижения от камеры к камере расход потока в горизонтальных выработках уменьшается на эту величину. Приведенные закономерности позволяют рассчитать параметры движения жидкости в выработанном пространстве шахт.

**Влияние плотности рассолов.** Движение воды в соляных шахтах сопровождается образованием рассолов различной плотности. Это приводит к усложнению движения, обусловленному конвекцией. В стадию безнапорного движения поверхность

рассолов горизонтальна, а напор увеличивается с увеличением концентрации. В результате в нижней части выработки рассол движется обратно к месту налива воды. В поперечном сечении движение усложняется стеканием насыщенного рассола вниз по стенкам выработки. После затопления горизонтальных выработок движение воды в них приобретает напорный характер. При этом уровни рассола в камерах различаются в зависимости от концентрации. Когда уровень достигает горизонтальных выработок, уровни выравниваются за счёт потока воды из камер с низкой минерализацией.

**Аналитическая модель течения пресной воды в горизонтальной выработке соляной шахты.** Чтобы выявить особенности течения жидкости с учётом расширения выработки за счёт растворения, рассмотрим простейшую модель – движение в горизонтальном цилиндрическом канале при постоянной во времени подаче пресной воды в нулевом сечении. Скорость растворения изменяется в зависимости от дефицита насыщения:  $W = W_0 * D / C_0$ , где  $W_0$  – скорость растворения соли в пресной воде,  $D$  – дефицит насыщения,  $C_0$  – концентрация насыщенного рассола. Для простоты приняли равномерное растворение верхней части выработки и отсутствие растворения в нижней её части из-за изоляции нерастворимым осадком. Выработку разбили на малые отрезки, в каждом из которых концентрация рассола распределяется равномерно. Скорость растворения во входном сечении 0,33 м/сутки.

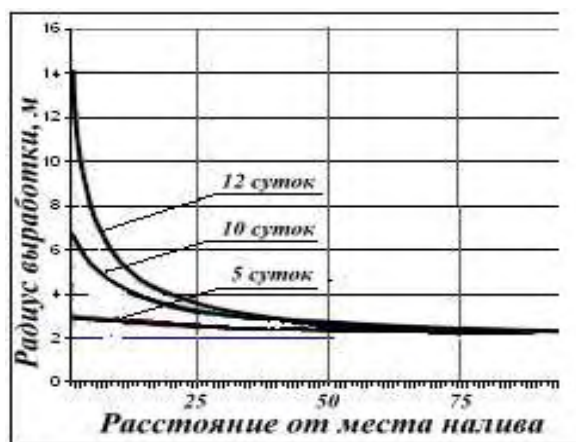


Рисунок 5 - Зависимость радиуса выработки от расстояния до места налива в различные моменты времени

В результате расчёта получен график зависимости сечения выработки от времени, рисунок 5.

Как видно из рисунка, растворение быстрее всего идёт в начале канала, а уже на расстоянии 100 м рассол становится насыщенным и растворение прекращается. Из-за увеличения сечения в начальной части выработки скорость движения воды уменьшается во времени и неравномерность растворения усиливается.

**Физическое моделирование.** Соленосные породы заменили смесью каменной соли с 15% глины с тщательным уплотнением. Воду подавали с таким расходом, что скорость поднятия уровня была меньше скорости растворения, что характерно для реальных условий. Наблюдали за изменением вертикального сечения горизонтальной выработки. На рисунке 6 показано, как выработка сначала приняла овальную форму, а затем из-за накопления нерастворимого осадка стала расширяться и приобрела форму треугольника со сторонами, наклоненными под углом около 45°. По достижении определённой ширины кровля выработки обвалилась, приобретая форму свода.

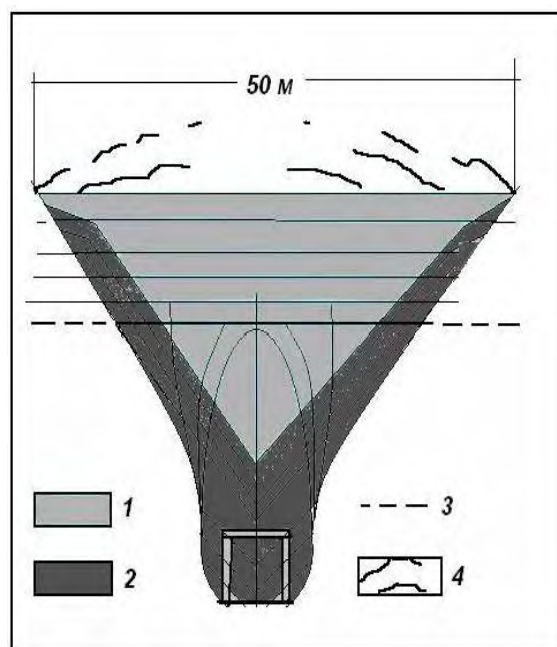


Рисунок 6 - Развитие карста в горизонтальной выработке при скорости затопления, меньшей скорости растворения:  
1 - рассол; 2 - нерастворимый осадок;  
3 - уровни затопления, 4 - трещины в потолочине

Ширину кровли  $B$ , при которой произойдет обрушение, находим по формуле [10]:

$$B^2 = (0,45 \cdot \sigma \cdot Z^2) / (Z + h) \cdot \gamma, \quad (10)$$

где  $\sigma$  - сопротивление породы сжатию,  $Z$  - мощность защитной потолочины,  $h$  - мощность наносов,  $\gamma$  - объёмный вес пород.

Так как треугольник равнобедренный с углом наклона сторон  $45^\circ$ , то искомая ширина будет достигнута при высоте затопления  $B/2$ . На основе натурных наблюдений установлено, что высота свода в соляных отложениях равна 0,35 ширины выработки.

Наглядное представление о механизме техногенного карста даёт модель системы отработки Стебницкого рудника № 2 в масштабе 1:100. Воду подавали в штрек в левой части модели. Она через орты поступала в камеры. На рисунке 7 показаны два момента в развитии карста.

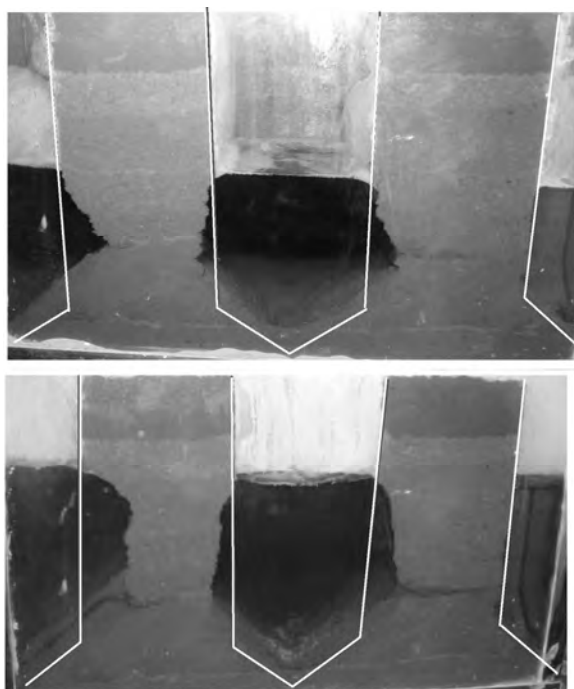


Рисунок 7 - Модель растворения целиков при затоплении пресной водой

Скорее всего, растворяется левая стенка первого целика, расположенная рядом с местом подачи воды. Растворение стенок второй камеры идёт медленнее. Правая стенка второго целика практически не растворяется, так как сюда приходит рассол, уже близкий к насыщенному.

На дно камер осыпаются нерастворимые примеси, которые ложатся под углом  $45^\circ$ ,

защищая нижнюю часть целиков от дальнейшего растворения. После растворения одной трети толщины первого целика в нём образовалась трещина, через которую начался переток рассола. В это же время подводящие выработки - орты - оказались заполненными нерастворимым осадком (рисунок 8). Таким образом, динамику «подрезания» целиков определяет место поступления воды и её агрессивность. Первым разрушается ближайший от места поступления воды целик.

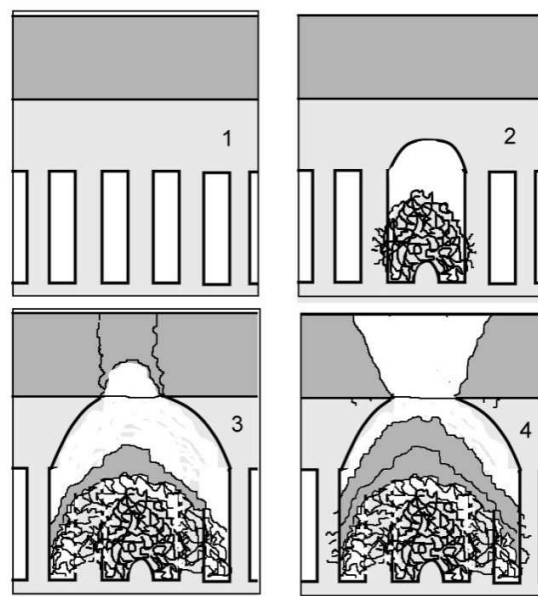


Рисунок 8 - Образование провала над разрушенным целиком:

1-первоначальное состояние, 2-обвал целика, 3-обвал соседних целиков, 4-провал поверхности

#### Последствия разрушения целиков.

Утрата несущей способности одним из целиков приводит к увеличению нагрузки на соседние целики примерно в полтора раза. Соответственно уменьшается запас прочности целиков и они становятся податливыми. Покрывающая толща прогибается, в ней образуется свод.

После того, как разрушатся два соседних целика, междуэтажная потолочина обвалится, а вслед за ней рухнут целики вышележащего горизонта. Нарушится целостность водозащитной толщи, в шахту польётся вода надсолевого водоносного горизонта и обвалятся неустойчивые покрывающие породы. На поверхности образуется провал.





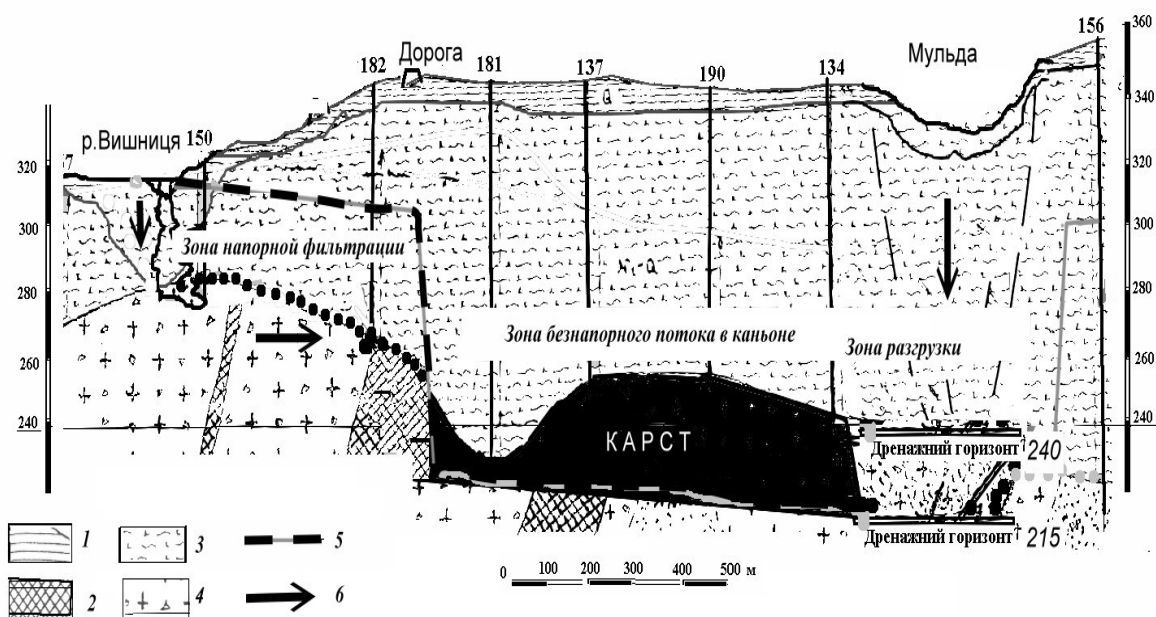


Рисунок 10 - Разрез по линии А-Б:

1-суглинок, 2-калийная соль, 3-гипсово-глинистая шляпа, 4-соленосная брекчия, 5-пъезометрическая поверхность, 6-направление потоков

**Расчёты динамики образования карстовых пустот.** В некоторых случаях можно оценить динамические параметры развития соляного карста. Поток воды разделяется на два участка: от зоны питания до водопада напорный, далее безнапорный. Расход потока  $Q_0$  на участке напорной фильтрации определяется по формуле Дюпюи:

$$Q_0 = \kappa^* m^* S^* B / L, \quad (11)$$

где  $\kappa^* m$  - водопроницаемость,  $S$  - разница напоров водоносного горизонта между источником питания и местом впадения в карстовый каньон,  $B$  - ширина потока,  $L$  - длина напорного участка. Из-за роста каньона длина напорного участка сокращается, а приток увеличивается, так что в следующий период

$$Q = \kappa^* m^* S^* B / x, \quad (12)$$

где  $x$  - переменная длина напорного участка.

Принимая параметры пласта в напорной зоне неизменными, разделим выражение (13) на (14) и получим:

$$Q_0 / Q = x / L, \text{ откуда } x = L * Q_0 / Q. \quad (13)$$

Например на Стебницком руднике № 2 в 1984 году расстояние между источником питания и местом разгрузки было 1500 м, а водоприток  $Q_0$  составлял = 139 тыс. м<sup>3</sup>/год.

В 2007 году приток  $Q$  составил 420 тыс. м<sup>3</sup>/год. Подставляя данные, получим длину напорного участка  $x = 496$  м. В 2008 году приток воды составил 503 тыс. м<sup>3</sup>, длина напорного участка уменьшилась до 414 м, каньон продвинулся на 82 м. Зная расстояние до источника питания, можно определить срок прорыва речки в шахту: 414:82 = 5 лет. По данным многолетних наблюдений приток воды ежегодно увеличивается на 14 000 м<sup>3</sup>. С учётом увеличения водопритока срок прорыва речки в шахту составит не более 4-х лет.

Размеры карстового каньона можно оценить по количеству растворённых солей. Объём пустот, которые образуются в единицу времени в результате движения пресной воды от мест питания к месту разгрузки, определяется по формуле

$$W = Q * (C_2 - C_1), \quad (14)$$

где  $Q$  - водоприток,  $C_2$  концентрация рассола на выходе в горную выработку,  $C_1$  - концентрация солей в источнике питания. Так как  $C_2$  намного больше, чем  $C_1$ , то можно считать, что  $W = Q * C_2$ . Часто  $C_2$  соответствует растворимости солей, которая для галита приблизительно равна 310 кг/м<sup>3</sup>. Плотность соли 2,1 т/м<sup>3</sup>, то есть каждый кубометр воды растворяет 0,15 м<sup>3</sup> соли. Концен-

трация раствора, равновесного с калийной солью, достигает  $420 \text{ кг/м}^3$ , следовательно, кубометр воды растворяет  $0,2 \text{ м}^3$  солей.

Например, на Стебницком руднике № 2 количество воды с минерализацией  $310 \text{ г/л}$ , поступившей в шахту с 1978 года,  $7,5 \text{ млн. м}^3$ . Всего растворено около  $1,1 \text{ млн. м}^3$  солей. Из гидравлического расчёта длина карстового канала составляет  $1086 \text{ м}$ . Разделив объём на длину, получим сечение канала  $1012 \text{ м}^2$ .

Высота канала соответствует высоте падения воды с соляного зеркала в горную выработку на первом горизонте,  $110 \text{ м}$ . Отсюда ширина подземного каньона составляет  $9,2 \text{ м}$ . Этот канал непосредственно наблюдается в камере №115 (рисунок 11). За 2008 год в шахту поступило  $503 \text{ тыс. м}^3$  воды, вынесено  $75 \text{ тыс. м}^3$  солей. Продвижение каньона за год равно отношению объёма растворённой соли к площади сечения канала:  $75000:1012=74 \text{ м}$ .

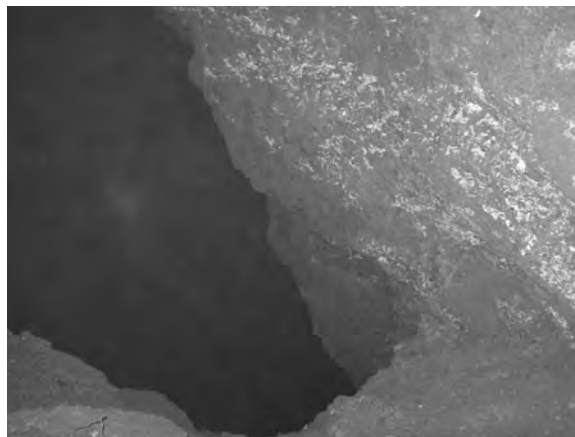


Рисунок 11 - Подземный каньон в Стебницком руднике № 2

Порядок цифр по гидравлическому и гидрохимическому методам расчёта довольно близок. Эти цифры практически совпадают и со скоростью растворения вертикальной стенки каменной соли по данным лабораторных опытов.

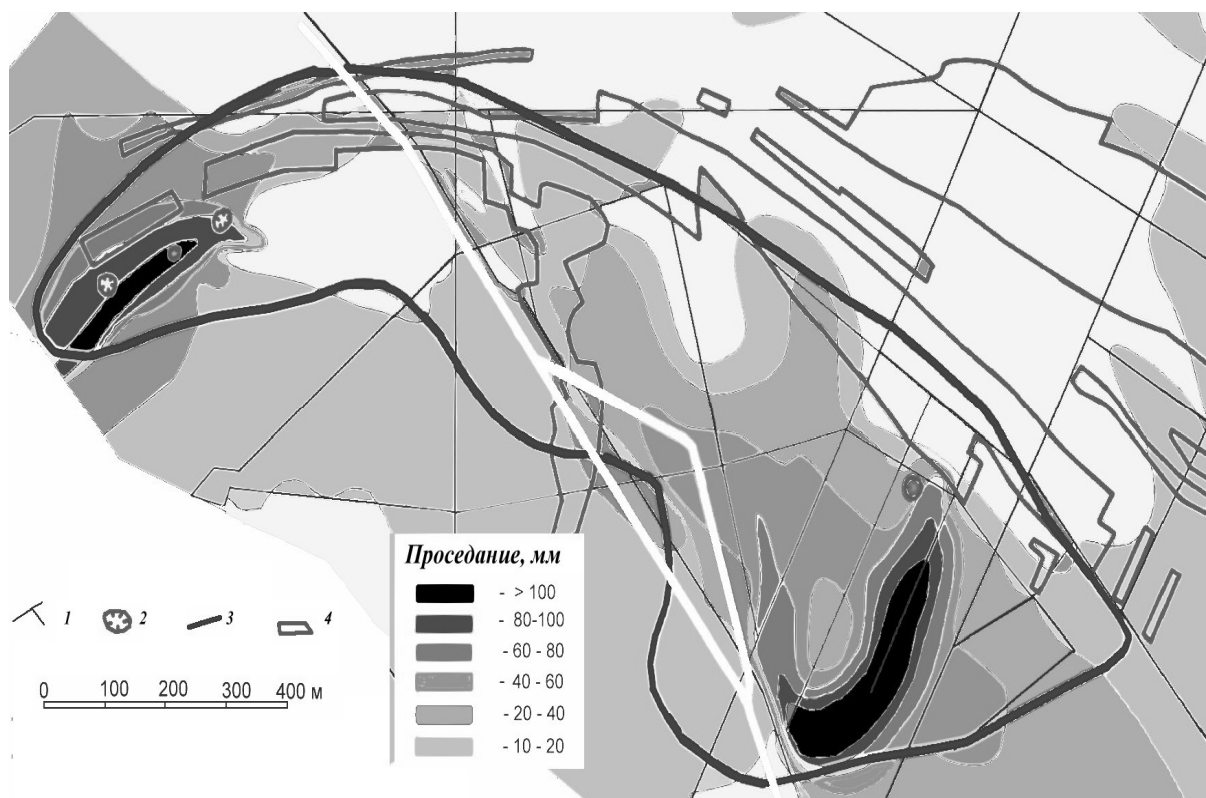


Рисунок 12 - Карта реперной сети и величин проседания земной поверхности:  
1-линии реперов, 2- карстовые провалы, 3-граница депрессии подземных вод,  
4-контуры рудных залежей

**Поверхностные проявления карста.** На шахтных полях наблюдается проседание поверхности, обусловленное деформациями целиков и развитием соляного карста. На рисунке 12 показана карта величин проседания поверхности на шахтном поле Стебницкого рудника № 2 за десятилетний период. Как видно из рисунка, проседание поверхности над горными выработками не превышает 20 мм, что свидетельствует об устойчивости целиков. В то же время на карте чётко видны мульды проседания, вытянутые от мест питания водоносного горизонта в сторону дренажных выработок.

В зоне питания идёт оседание земной поверхности и провалы, обусловленные неравномерным растворением солей. В зоне напорного потока растворение идёт по большой площади и здесь наблюдается плавное оседание покрывающей толщи. Возможность провалов над каньоном в зоне безнапорного потока зависит от ширины каньона и прочности покрывающих пород. Чаще всего провал инициируется некоторыми дополнительными факторами, например, наличием скважин или вертикальных горных выработок, разрушением целика в шахте, землетрясением. При этом развитию провала способствует суффозия и размыв стенок канала в покрывающей толще.

В развитии провала наблюдаются следующие фазы: 1.Образование и рост купола разрушения над карстовой полостью. 2.Купол достигает земной поверхности, образуется провал с субвертикальными или нависающими стенками. 3.Провал дренирует подземные воды четвертичных отложений, в него также поступают поверхностные воды, которые размывают стенки. Формируется воронка с бортами под углом естественного откоса. 4.Пресная вода растворяет соляную стенку, что сопровождается расширением воронки.

Описанный механизм развития провалов наблюдается в бортах Домбровского карьера в Калуше, где провал виден как бы в разрезе (рисунок 13). Сверху мы видим воронку в галечнике, из которого льётся вода, ниже - субвертикальный обрыв в глинисто-гипсовой шляпе. Под ней - ниша в соленосных породах. По поверхности соли течёт вода и соляная стенка отступает. Периодически обваливается гипсово-глинистая по-

рода, вслед за тем с бортов воронки осыпается галька.

В Солотвине расширение провалов происходит по такому же сценарию, но здесь источником пресной воды являются дренажные галереи. Провал растёт навстречу потоку из дренажной галереи.

После формирования воронки в процессе её расширения действует правило: сколько растворилось, столько и провалилось. При этом увеличение площади провала можно прогнозировать по формуле  $F = \kappa * Q * T / H$ , где  $\kappa$  - коэффициент, зависящий от дефицита насыщения воды,  $Q$  - приток воды в провал,  $T$  - время,  $H$  - глубина базиса эрозии – высота от соляного зеркала до уровня воды. Например, если в соляную шахту поступает 3,6 млн.м<sup>3</sup> в год пресной воды,  $\kappa = 0,15$ . За год образуется 0,54 млн.м<sup>3</sup> пустот. При этом растворяется водозащитная толща мощностью 40 м. Площадь ожидаемых провалов за год 1,4 га.

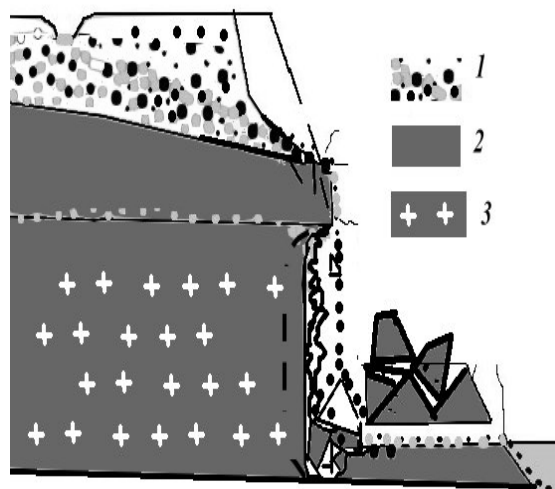


Рисунок 13 - Развитие карста на борту карьера:

1 - галечник, 2 - глинистая шляпа, 3 - соленосная брекчия

**Борьба с карстом.** Соляной карст подобен болезни, которую можно предупредить, но трудно вылечить. Известным способом предупреждения провалов над выработанным пространством является его закладка [2]. Однако стоимость этого мероприятия часто намного больше, чем ожидаемый ущерб. Поэтому в мировой практике совмещают закладочные работы с захоронением

отходов. Более дешевым является затопление отработанных шахт насыщенным рассолом, успешно осуществляемое в Калуше. Этот способ предусмотрен также проектом ликвидации аварийного рудника №2 в Стебнике. Однако ввиду недостаточного финансирования работы до сих пор не начаты, происходит самозатопление рудника. В случае прорыва воды в тупиковую выработку её можно отделить водонепроницаемой перемычкой, что успешно было осуществлено на руднике №1 в Стебнике.

Необходимым мероприятием является засыпка карстовых провалов. Чем раньше это

будет сделано, тем меньше понадобится материала для засыпки. В первую очередь нужно создать препятствие для выноса засыпаемого грунта в горные выработки. Для этого сначала нужно заполнить жерло провала крупногабаритным материалом: булыжником, бетонными блоками, брёвнами. После этого можно засыпать воронку местным грунтом, желательного глинистым.

Если наблюдается проседание поверхности, а провалов ещё нет, можно осуществить закладку карстового канала дисперсным материалом через скважины. Успешный опыт такого мероприятия описан в работе [11].

### Выводы

1. Рассмотрен комплекс проблем, возникающих при развитии карста в результате нарушения гидродинамического режима надсолевого водоносного горизонта в зонах деятельности соляных шахт.

2. Изменение напряженного состояния целиков при затоплении шахт водой обусловлено снижением прочности солей при замачивании, растворением стенок целиков и влиянием сил взвешивания. Оценено влияние глубины растворения на устойчивость целиков.

3. Для прогнозирования растворения необходимо знать динамику движения воды в горных выработках. Предложены формулы для расчётов скоростей потоков, периода перехода от безнапорного к напорному движению, длительности затопления.

4. Показано, что растворение солевых массивов происходит прежде всего в месте поступления воды. Этот процесс быстро за-

тухает на удалении. Соответственно первыми разрушаются целики рядом с местом водопритока.

5. Предложена гидродинамическая модель движения воды от мест питания к месту разгрузки с формированием зон напорной фильтрации, водопада и свободного потока в подземных каньонах.

6. Деформации поверхности наиболее вероятны в зонах питания, где с солями контактируют пресные воды. В зоне водопритока провалы связаны с подрезанием и обрушением целиков. Расширение провалов контролируется притоком пресной воды из четвертичного водоносного горизонта и с поверхности.

7. Соляной карст подобен болезни, которую можно предупредить, но трудно вылечить. Приведены примеры успешной борьбы с техногенным соляным карстом, которые весьма ограничены.

### Перечень ссылок

1. Андреичев А.Н. Разработка калийных месторождений. – М.: Недра, 1966. - 250 с.
2. Пермяков Р.С., Бельды М.П., Романов В.С. Технология добычи солей. - М.: Недра, 1981. – 106 с.
3. Короткевич Г.В. Соляной карст. – Л.: Недра, 1970. - 256 с.
4. Проскураков Н.М., Пермяков Р.С., Черников А.К. Физико-механические свойства соляных пород. – Л.: Недра, 1973. - 272 с.
5. Дудко П.М. Подземное выщелачивание солей. - М.: Недра, 1972. - 160 с.
6. Семчук Я.М. Наукові та методичні основи охорони геологічного середовища в районах розробки калійних родовищ. Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук. - Івано-Франківськ, 1995.
7. Кривоусов А.Я. Результаты наблюдений за процессом выщелачивания и разрушения соляных пород в уступах карьера. - Л.: Изд-во ВНИИГ, 1974. – С. 17.

8. Гаркушин П.К. Расчёт параметров сдвижения земной поверхности при разработке калийных месторождений по камерно-столбовой системе // Горный журнал. – 1995. - № 12. - С. 26-29.
9. Желтов Ю.П. Механика нефтегазоносного пласта. - М.: Недра, 1975. - 230 с.
10. Шашенко А.Н., Майхерчик Т., Сдвижкова Е.А. Геомеханические процессы в породных массивах. - Днепропетровск, Вид-во НГУ, 2005. – 237 с.
11. Гайдін А.М., Рудько Г.І. Сульфатний карст та його техногенна активізація. – К.: Знання, 1998. - 75 с.

**A.M. Gajdin INFLUENCE OF TECHNOGENIC ACTIVITY  
ON HYDROCHLORIC KARSTS**

*PJSC «Institute of mining chemical industry», Lviv*

**The complex of problems, arising up at development of hydrochloric karst as a result of violation of the hydrodynamic mode of overhydrochloric of aquiferous horizon is considered in the article. The hydrodynamic model of motion of water is offered from the places of feed to the place of unloading with forming of areas of pressure filtration and free stream in underground canyons. The methods of fight are investigational against technogenic hydrochloric karst.**

*Надійшла до редколегії 05 листопада 2008 р.  
Рекомендована членом редколегії канд.техн.наук П.І. Копачем*