

УДК 629.039.58: 551.2. 3

Назимко В.В., д-р техн. наук, профессор
(ИФГП НАН Украины)

**ИССЛЕДОВАНИЕ ЭКОЛОГИЧЕСКИ ОПАСНЫХ НЕОБРАТИМЫХ
СДВИЖЕНИЙ МАССИВА ГОРНЫХ ПОРОД НАД ВЫРАБОТКАМИ
СОЛЕВЫХ ШАХТ**

Назимко В.В., д-р техн. наук, професор
(ИФГП НАН України)

**ДОСЛІДЖЕННЯ ЕКОЛОГІЧНО НЕБЕЗПЕЧНИХ НЕЗВОРОТНИХ
ЗРУШЕНЬ МАСИВУ ГІРСЬКИХ ПОРІД НАД ВИРОБКАМИ СОЛЬОВИХ
ШАХТ**

Nazimko V.V., D.Sc. (Tech.), Professor
(IPMP NAS of Ukraine)

**INVESTIGATION OF ECOLOGICALLY HAZARDOUS IRREVERSIBLE
SUBSIDENCE OVER SALT MINES**

Аннотация. Комплексные исследования позволили установить существенные особенности развития и активизации сдвижений массива вокруг солевых шахт под действием обводнения контакта солевого купола с вышележащими породами в результате утечки сточных вод. Процесс зарождения разрушения протекает в глубине массива, после чего он выходит на земную поверхность. Активизация сдвижений сопровождается эволюцией кластерной мозаики приращений сдвижений, которая меняет свое поведение от несогласованного к согласованному и наоборот. Именно этот механизм содействует, во-первых, разрушению, во-вторых, разделению массива на отдельные составляющие, в-третьих, противоположному движению этих составляющих друг относительно друга, и, в-четвертых, зарождению и развитию провалов земной поверхности. Это сопровождается экологической катастрофой на земной поверхности, которая имеет тенденцию к устойчивому развитию и весьма трудно поддается управлению.

Ключевые слова: провалы земной поверхности, экологическая опасность, моделирование.

Введение. Еще в 19 веке в окрестности городка Солотвино началось развитие соляных разработок камерно-столбовой системой разработки. Месторождение имеет сложную форму и поэтому камеры характеризуются пространственным расположением, разной длиной и разной ориентацией. Вследствие утечки сточных вод в канализационной системе города начали происходить чрезвычайно опасные провалы земной поверхности над заброшенными выработками. Необратимые сдвигения породной толщи приобрели неуправляемый характер, а сам процесс обрушений угрожает жилым домам, находящимся в непосредственной близости к провалам (рис.1).

В данной статье описаны результаты исследования механизма зарождения и развития провалов земной поверхности, которые представляют серьёзную экологическую угрозу для жилых районов [1].



Рисунок 1 - Общий вид одного из типичных провалов земной поверхности над выработанными пространствами

Описание геологических условий отработки солевого месторождения.

Для изучения механизма возникновения провалов проводились комплексные исследования, включающие изучение и анализ геологической структуры, натурные инструментальные наблюдения за процессом сдвижений земной поверхности, а также компьютерное моделирование. На рис. 2 показан геологический вертикальный разрез шахты № 9.

На разрезе рис. 2 показано солевое месторождение в районе отработки шахты № 9. Геологическое формирование месторождения было весьма сложным и многоэтапным. В течение пермского периода происходило отложение солевой залежи и перекрытие ее вышележащими породами. Они представлены слоистыми алевролитами. Процесс отложения был многоэтапным, поэтому само рудное тело состоит из нескольких слоев, которые перемежаются достаточно большими слоями алевролитов (рис. 2), мощность которых достигает 20-50 м и более.

После формирования залежи происходил многоэтапный тектоногенез, в процессе которого месторождение подвергалось активным тектоническим силам и масштабным подвижкам.

В результате этого горизонтальное залегание превратилось в наклонное и даже крутое. В данный момент можно констатировать тот факт, что солевое месторождение преобразовалось в соляной купол, верхняя часть которого размыта, выветрена и покрыта наносами, причем угол залегания самих солевых пластов достигает 35-40 градусов. Расположение слоев соли и вышележащего алевролита не совсем согласные. Угол между слоистостью алевролитов и солевых слоев достигает 30 градусов. Все это существенно усложняет саму геологическую структуру месторождения и механизм деформирования массива под действием горных разработок.

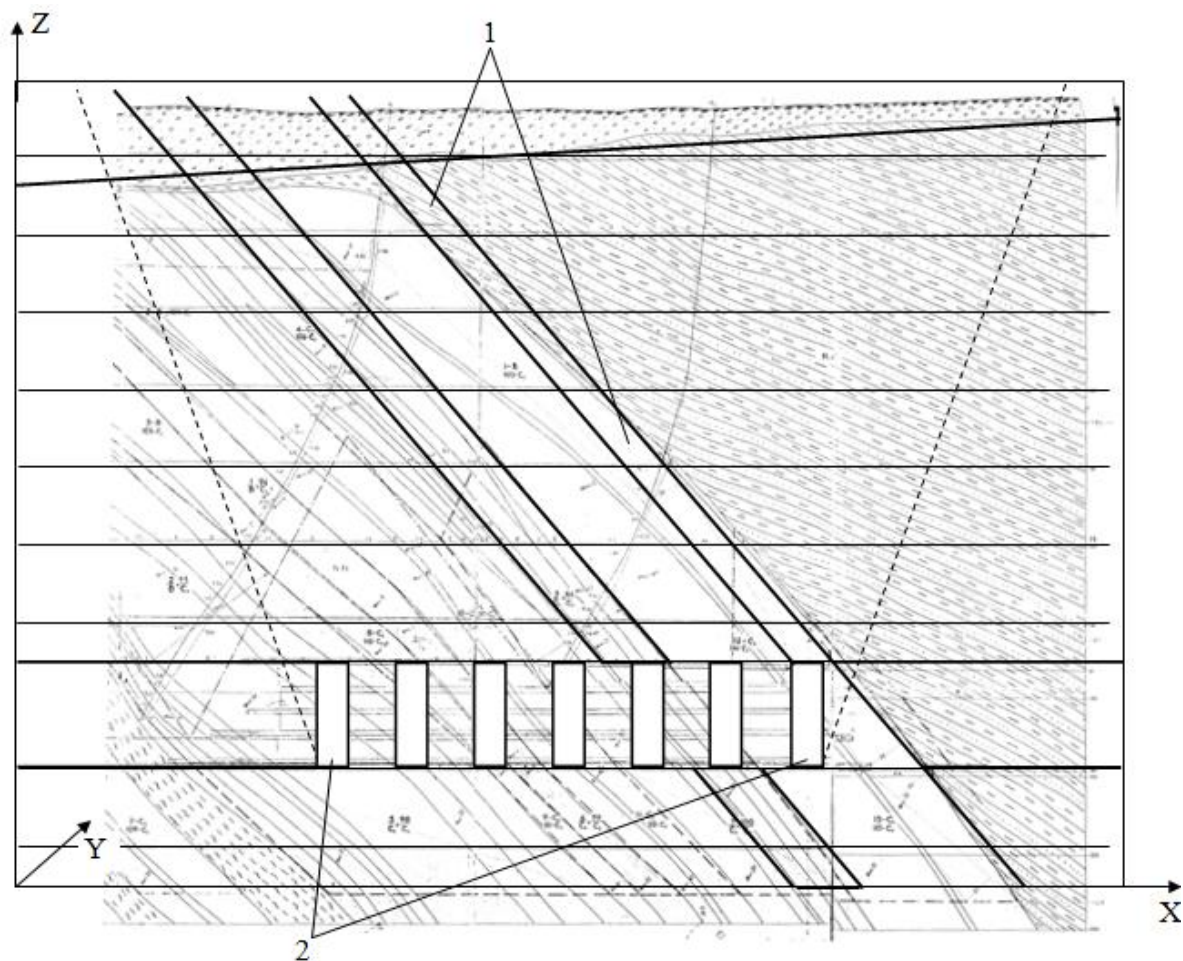


Рисунок 2 - Вертикальный геологический разрез толщи в окрестности шахты №9

Предел прочности соли на одноосное сжатие изменяется в пределах 50-60 МПа, деформационные показатели вышележащих алевролитов близки к таковым показателям соли, а предел прочности на одноосное сжатие несколько изменяется от 40 до 55 МПа. Коренные породы, состоящие из солевого купола и алевролитов, перекрыты наносами, мощность которых изменяется в пределах от 20 до 60 м. Наносы представлены песчаными суглинками, которые не имеют ярко выраженной слоистости, по свойствам ближе к грунтам, а их предел прочности на одноосное сжатие достаточно низкий и не превышает 15-20 МПа. Характерно, что коэффициенты фильтрации в наносах существенно выше, чем в коренных породах, а также наблюдается значительное повышение коэффициента фильтрации вдоль контакта солевого купола и вышележащих алевролитов. Эти контакты являются потенциальными проводниками влаги, что может негативно сказаться на устойчивости всего подработанного массива, что и будет исследоваться в данной работе.

Диаметр воронки провалов изменяется от 50 до 150 м, а глубина в пределах 30-40 м. При этом процесс обрушения находится в активной стадии и уже затрагивает жилые массивы. Провалы заполнены насыщенным раствором соли. Эти объекты представляют большую экологическую опасность.

Обоснование расчетной схемы. Для составления расчетной схемы, которая

использовалась для исследования процесса сдвижения подработанной толщи и процесса развития провалов земной поверхности, на геологическом разрезе (рис. 2) были построены углы сдвижений от крайних камер. Углы сдвижения изображены на рисунке пунктирными линиями. В точках пересечения линий сдвижения с земной поверхностью от этих точек были отложены бермы во все стороны размером 50-100 м. Таким образом, был определен в плане размер расчетной области. Он составил по осям X и Y 673 м, а по вертикали, то есть по оси Z , принималась глубина 509 м. Такие размеры позволили разместить камеры шахты № 9 на достаточно большом удалении от боковых граней расчетной модели и ее днища, что гарантировало достоверность и точность расчетов напряженно-деформированного состояния.

На рис. 3 представлен общий вид расчетной схемы (а) и фрагмент целиков с расположенными в них камерами (б). Камеры показаны позицией 3 (самая меньшая камера), позицией 1 указан контакт солевого купола с вышележащими аргиллитами. Так же указан разрез А-А, в пределах которого, в основном, рассматривались все распределения напряжений и деформаций, силовых и деформационных характеристик расчетной области. Граничные условия соблюдались таким образом, при которых боковые границы модели 2 и 4 вдоль оси X устанавливались так, чтобы ограничить сдвигения вдоль оси X . Боковые границы, которые были перпендикулярны оси Y , также ограничивались с таким расчетом, чтобы ограничить сдвигения вдоль оси Y и ограничивались перемещения дна модели. Массив нагружался собственным весом вмещающих пород. Крайние камеры показаны позицией 2 на рис. 3. Камеры были отработаны начиная с 1968 года по настоящее время, при этом насчитывается 7 камер, ширина которых составляет 20 м, а длина изменяется от 109 до 335 м.

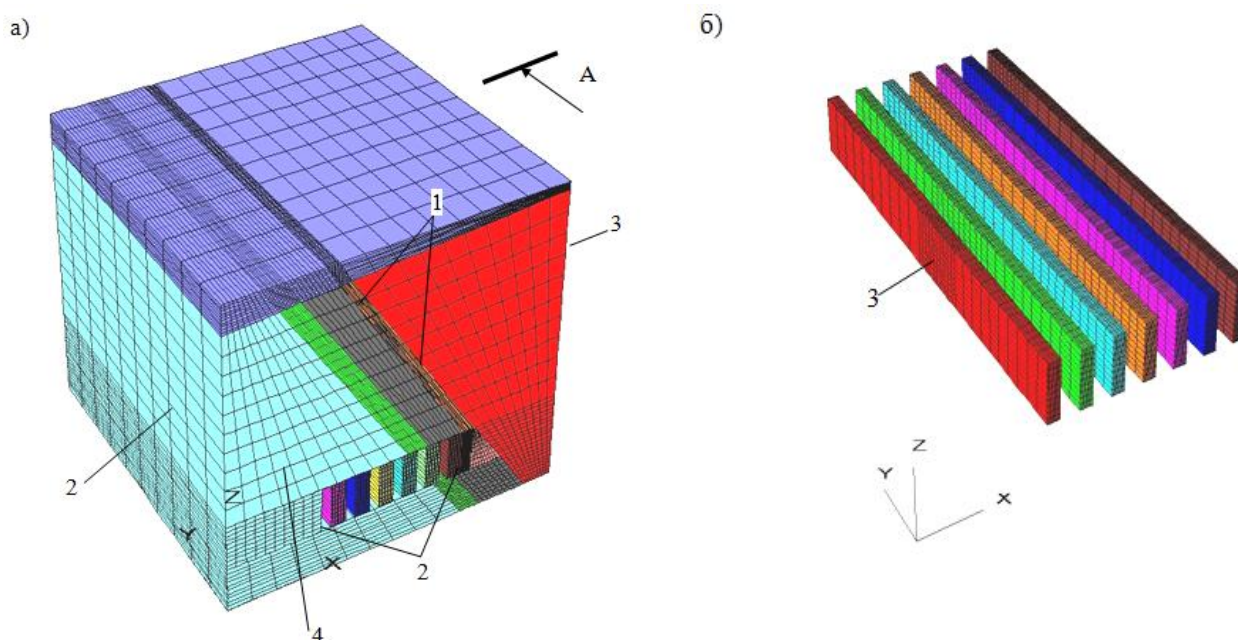


Рисунок 3 - Расчетная схема (а) и фрагмент целиков с расположенными в них камерами (б)

Наиболее приемлемым алгоритмом для решения задачи о необратимых

сдвигениях над соляными шахтами является метод конечных разностей, с помощью которого решаются системы уравнений динамики геологического массива [2-5]. Этот метод впервые предложен П. Кундалом, что позволило расширить возможности численных методов и уйти от проблем сходимости решения к состоянию статического равновесия. Это имеет принципиально важное значение, поскольку процесс необратимых сдвижений массива горных пород подчиняется кинетической теории прочности и протекает во времени. При обработке месторождений в сложных горно-геологических условиях в подавляющем числе случаев процесс сдвижений пород не заканчивается даже после погашения шахты или рудника, в связи с чем решение задач статического равновесия вообще теряет практический смысл.

На основании такого подхода группой проф. Кундала предложен новый алгоритм решения задач механики разрушения горных пород, основанный на решении системы дифференциальных уравнений движения и уравнениях связи напряжений и деформаций горных пород, которые зависят от выбранной теории прочности.

Дифференциальное уравнение движения массива горных пород имеют вид

$$\frac{\partial \sigma_{i,j}}{\partial x_i} + \rho b_i = \rho \frac{dv_i}{dt}$$

где $\sigma_{i,j}$ – нормальные и касательные напряжения, действующие в массиве горных пород, Па; x_i – координаты декартовой системы, м; ρ – плотность горных пород, кг/м³; b_i – удельные силы, развивающиеся в массиве горных пород, и приводимые к единице его массы, Н/кг; v_i – скорость движения элементарных объемов массива горных пород, м/сек; t – время, сек.

Если правая часть равна нулю (с точностью до погрешности численных вычислений), наступает статическое равновесие массива горных пород. Иначе породы находятся в состоянии активных сдвижений.

Система дифференциальных уравнений решается численным методом конечных разностей в среде пакета FLAC3D [5]. При решении системы дифференциальных уравнений используется современная модель прочности горных пород, основанная на теории Кулона-Мора. При этом учитывается процесс дилатансии пород после разрушения и зависимость величины разуплотнения от среднего уровня сжатия. Таким образом, выбранная схема позволяет учесть все основные параметры модели, которая исследуется, а также главные черты поведения массива, включая его запредельное деформирование. Это позволит получить, достаточно оценить и предсказать опасные с экологической точки зрения провалы земной поверхности.

Процесс сдвижения моделировался в несколько этапов. На первом этапе осуществлялся расчет напряженно-деформированного состояния нетронутого массива без наличия выработок, в частности камер. Для этого массив нагружался собственным весом, прикладывались граничные условия, и расчет согласно описанному выше алгоритму производился в виде циклического пересчета на

пряжений и деформаций с учетом второго закона Ньютона. Расчет заканчивался тогда, когда максимальная невязка сил в соседних расчетных зонах не превышала допустимый уровень. В данном случае относительная невязка должна была быть меньше 1/100000.

После достижения такой невязки массив находился практически в состоянии статического равновесия, и только после этого осуществлялась выемка камер. Процесс разрушения моделировался путем постепенного уменьшения сцепления и угла внутреннего трения на контакте солевого купола с вышележащими алевролитами под действием фильтрации воды с земной поверхности вглубь массива. Высота камер составляла 73 м, расстояние между камерами (ширина межкамерных целиков) составляло 35 м, ширина самих камер равнялась 20 м.

Анализ результатов моделирования процесса сдвижения. Анализ результатов моделирования показывает, что процесс сдвижения толщи над заброшенными камерами протекает многостадийно, причем отдельные блоки массива смещаются несинхронно, меняя направление сдвижений и их величину. В связи с этим процесс сдвижений был проанализирован в виде приращений между отдельными этапами, которые отличались резким изменением приращений перемещений смежных участков подработанной толщи. На рис. 4 сопоставлены два фрагмента процесса разрушения на 4182 (*a*) и 4302 (*б*) цикле расчета. Сопоставление этих фрагментов подчеркивают динамичность приращения сдвижений и изменение по мере развития и активизации процесса сдвижений. Так на рис.4 *a* породы висячего крыла смещаются вниз, особенно в окрестности наносов, а породы лежачего крыла практически остаются на месте.

Однако на рис.4 *б* происходит существенное изменение распределения векторов сдвижений, поскольку наблюдается сосредоточенное движение вниз висячего крыла и такое же аналогичное по амплитуде поднятие пород лежачего крыла. При этом более удаленные породы от контакта практически не перемещаются, то есть глобальное согласованное движение подработанного массива на рис.4 *a* сменяется сосредоточенным разнонаправленным движением прилегающих к контакту пород, что свидетельствует о сильной изменчивости кластерной мозаики процесса сдвижений.

На рис. 5 представлен новый этап сдвижений, который заключается в том, что впервые наблюдается разделение зоны разрушений и максимального разуплотнения пород на контакте, одна зона расположена непосредственно у наносов (позиция 1), а вторая зона распространяется ниже (позиция 2). Кроме этого возникает зона (позиция 3), которая образует кластер, движущийся в лежачем боку от границы зоны контакта солевого купола с алевролитами.

Такая же область (позиция 4) отмечается в подошве камер, то есть можно заметить, что происходят явные смещения всего горизонта в целом, в пределах которого пройдены камеры, от контакта солевого купола с вышележащими породами. Такое смещение также ослабляет сам массив и будет содействовать разрушению межкамерных целиков. Это подтверждается тем, что видны разрушения, отжим и разуплотнения краевой стенки нетронутого массива, который примыкает к крайней правой камере, располагающейся под контактом со-

левого купола с вышележащими алевролитами.

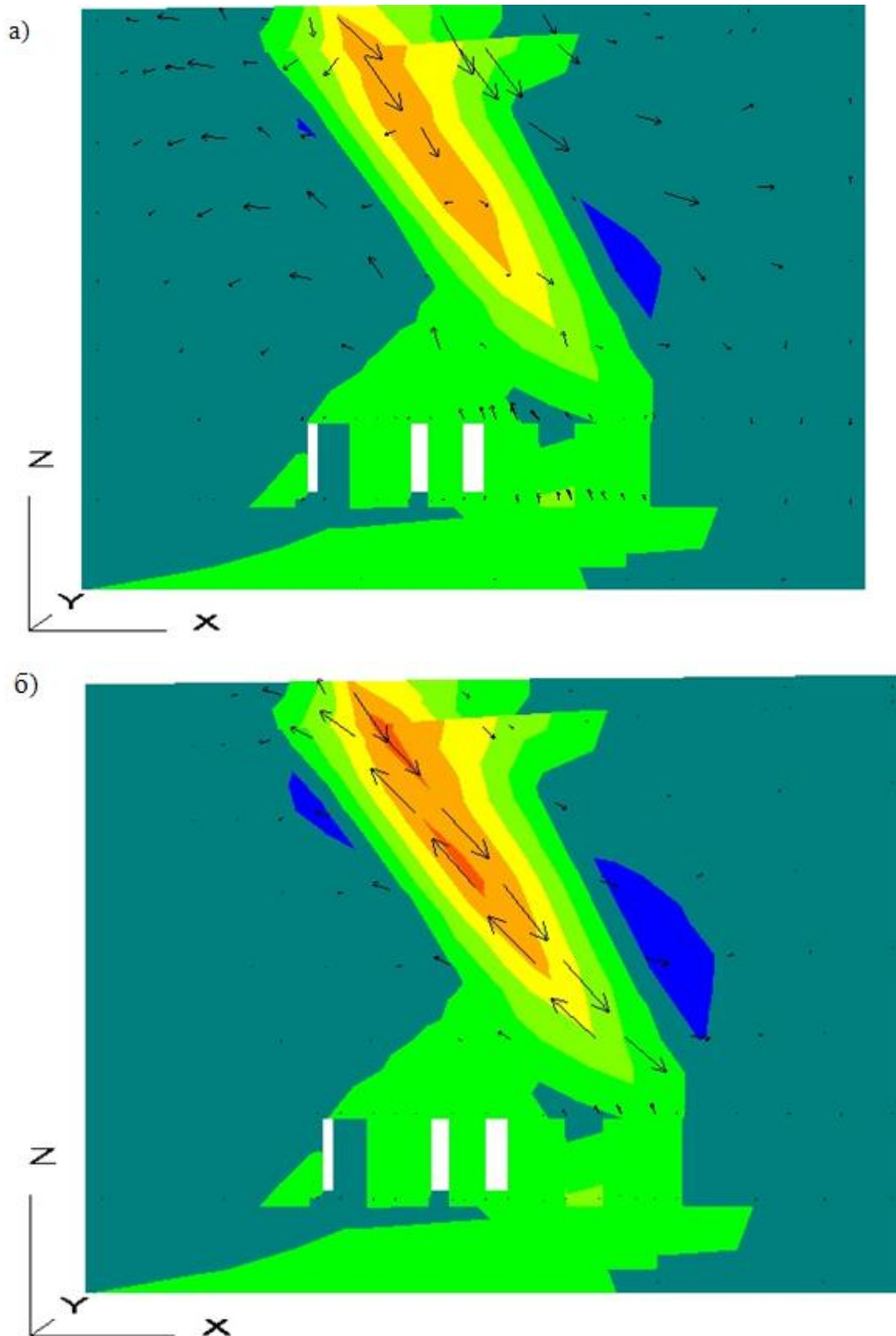


Рисунок 4 - Эволюция зон разрушения и разуплотнения в окрестности контакта на активной стадии сдвижений

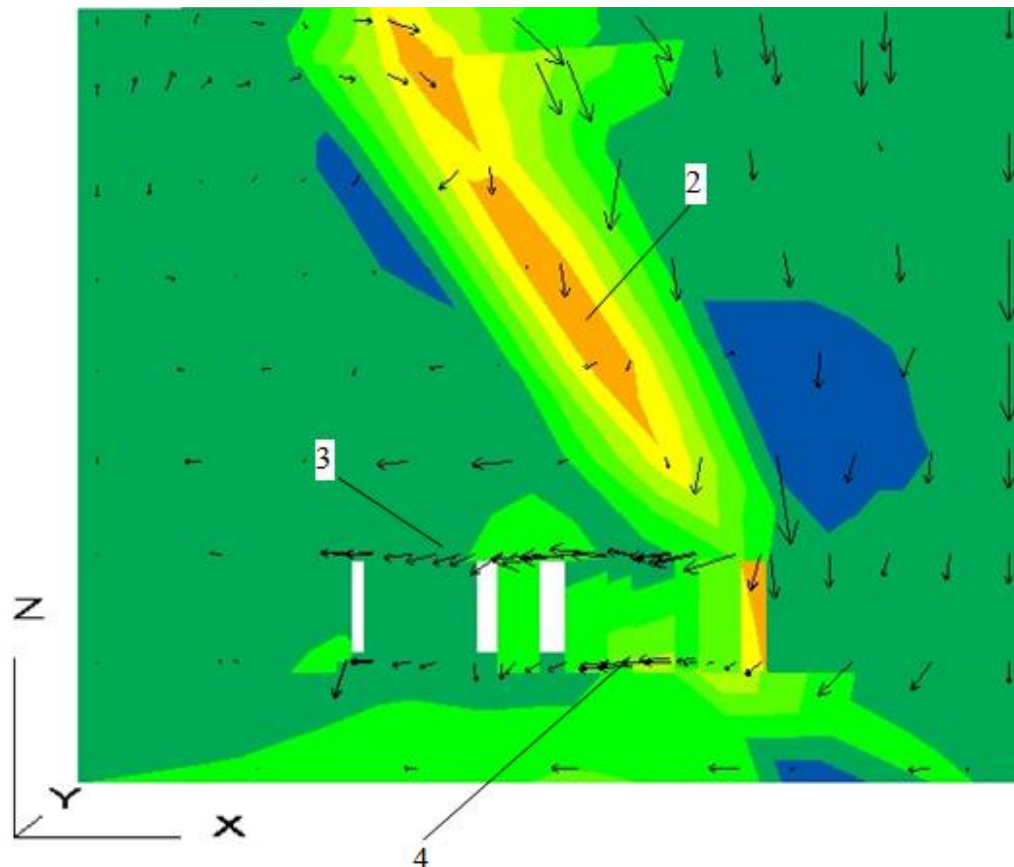


Рисунок 5 - Раздвоение зон максимального разуплотнения подработанной толщи на 4422 цикле

На 4900 цикле расчетов оседание земной поверхности уже достигло 9,4 см. Поднятие лежачего крыла на глубине порядка 300-350 м достигло 4 см, что весьма значительно и является следствием отдельного перемещения висячего и лежачего крыльев контакта. В результате происходит отслоение наносов и несогласованное их движение относительно коренных пород. Наряду с установившимися кластерными структурами, такими как отслоение кровли и почвы камер от основного массива и целиков, прилегающих к ним, начинает просматриваться вихревое движение всей подработанной и надработанной толщи. Причем, для образования этого вихря породам висячего бока пришлось поменять направление, которое было вниз и вправо, на направление вниз и влево, то есть в сторону контакта. Точно также меняли направление породы лежачего крыла, а именно породы, прилегающие к наносам, и сами наносы стали смещаться вверх и вправо к контакту, в то время как они в основном смещались в сторону от контакта. В результате этих радикальных изменений образуется глобальная вихревая кластерная структура. Эта структура характеризует дальнейшую эволюцию процесса необратимых сдвижений и является подготовительной ступенькой для образования провалов земной поверхности.

В процессе развития активных сдвижений видно постоянное наличие максимальных касательных напряжений в кровле и почве межкамерных целиков, которые расположены в непосредственной близости контакта солевого купола с

алевролитами. Касательные напряжения достигают достаточно больших величин в 5,9 – 6, 4 МПа. Отчетливо просматривается направленность генерального движения висячего крыла вдоль и от контакта, а лежащее крыло поднимется вдоль контакта, и отклоняется от него в глубину нетронутого массива. В результате этих несогласованных подвижек и развивается провал земной поверхности, который изображен на рис. 1.

Таким образом, выполненный анализ позволяет сделать следующие выводы. Разрушение массива под действием обводнения и дренажа фильтрации вод по контакту солевого купола с покрывающими породами начинается в глубине массива 250 м от земной поверхности. Это разрушение проявляется в реверсном движении висячего крыла пород и лежащего. При этом породы висячего крыла имеют тенденцию смещаться вниз, а лежащего – вверх. По мере развития процесса активных сдвижений зона максимальных оседаний поднимается в сторону земной поверхности и в итоге образует мульду оседаний. Развитие процесса сдвижений подработанной толщи сопровождается разделением массива на кластеры, которые представляют собой целые блоки массива горных пород, которые движутся в преобладающем направлении, причем эти направления движения не совпадают. В окрестности межкамерных целиков по мере развития сдвижений увеличивается концентрация касательных напряжений. Процесс развития сдвижений под- и надработанной толщи сопровождается расслоением контакта наносов с коренными породами, причем это расслоение протекает под действием касательных противоположных подвижек. Формирование развития процесса сдвижений приобретает тенденцию, которая заключается в том, что висящее крыло массива выше контакта солевого купола с алевролитами движется вниз и вправо (от контакта) а лежащее – вверх и влево (от контакта). При увеличении деформаций и разрушении пород вокруг контакта происходит разуплотнение. Наиболее динамичной структурой в процессе развития сдвижений является кластерная структура, которая изменяется не только по величине, но и по направлению. Сама кластерная мозаика изменяется достаточно часто. При этом периодически возникают специфические кластерные структуры, в частности вихревые, когда несогласованное движение отдельных кластеров организуется так, что их движение образует вихревую согласованную структуру. Такая динамика кластерных сдвижений является процессом подготовки провала земной поверхности. Кластерная динамика сдвижений сопровождается периодической фрагментацией зон максимальных деформаций. Так если на начальной стадии сдвижений зона максимальных разуплотнений была сосредоточена в одном месте, то после развития процесса сдвижений она распадается на две области, одна из них прилегает к наносам, а вторая расположена в глубинной части массива. По мере развития процесса сдвижений увеличиваются расслоения пород на контакте потолочин и подошв камер с окружающим массивом. Это содействует снижению устойчивости межкамерных целиков, а значит, провоцирует дальнейшее развитие активизации сдвижений, которое в итоге ускоряет процесс провала земной поверхности.

Выводы. Выполненные исследования позволили установить существенные особенности развития и активизации сдвижений массива вокруг солевых шахт под действием обводнения контакта солевого купола с вышележащими породами. Главная особенность заключается в том, что процесс зарождения разрушения протекает не от земной поверхности, а начинается в глубине массива, затем он выходит на земную поверхность. Механизм зарождения и развития процесса необратимых сдвижений удалось уточнить благодаря применению подхода, при котором изучались последующие распределения малых приращений сдвижений. При этом анализировались поля приращений сдвижений в виде векторных распределений. Установлено, что по мере развития необратимых сдвижений поля векторных распределений разбиваются на отдельные кластеры, которые характеризуются выраженным направлением и величиной векторов приращений перемещений массива. Сам процесс активизации сопровождается эволюцией кластерной мозаики, которая меняет свое поведение от несогласованного к согласованному и наоборот. В итоге кластеры смещаются как несогласованно, так и согласованно. При согласованном перемещении кластеров возникают структуры в виде вихрей или однонаправленного перемещения кластеров. Движение в противоположных направлениях приводит к утрате согласованности и сопровождается необратимым проскальзыванием участков массива по границам кластеров. Именно этот механизм содействует, во-первых, разрушению, во-вторых, разделению массива на отдельные составляющие, в-третьих, противоположному движению этих составляющих друг относительно друга, и, в-четвертых, зарождению и развитию провалов земной поверхности. Это сопровождается фактически экологической катастрофой на земной поверхности, которая имеет тенденцию к устойчивому развитию и весьма трудно поддается управлению.

Дальнейшими исследованиями предусматривается исследование и обоснование мероприятий по стабилизации опасного процесса развития сдвижений подработанной толщи земной поверхности над заброшенными соляными шахтами и нейтрализации неблагоприятных экологических последствий провалов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Lokhande, R. D. Pot-hole Subsidence in Underground Coal Mining: Some Indian Experiences / R.D.Lokhande, V.M.S.R.Murthy, K.B.Singh // Geotechnical and Geological Engineering. – 2013. - No.32(3). - P. 214-221.
2. Cundall, P. A. Distinct Element Models of Rock and Soil Structure / P. A. Cundall // Analytical and Computational Methods in Engineering Rock Mechanics; E. T. Brown, Ed. London: George Allen & Unwin. – 1987. - Ch. 4. - P. 129-163.
3. A Systematic Approach to Rock Mechanics Challenges at Xstrata Zinc Brunswick Mine / B.Rose, P.P.Andrieux, C. P. O'Connor, M.Verreault // Continuum and Distinct Element Numerical Modeling in Geomechanics 2011 (Proceedings of the Second International FLAC/DEM Symposium), Melbourne, Victoria, Australia, February 2011. - P. 49-57.
4. The Synthetic Rock Mass Approach for Jointed Rock Mass Modelling / D. Ivars, M.E. Pierce, C.Darcel [and other] // Int. J. Rock Mech. Min. Sci. – 2011. - No.48. – P. 219-244.
5. FLAC3D. User Manual. - Minneapolis: Fast Lagrangian Analysis of Continua in 3 Dimensions, 2008 – 126 p.

REFERENCES

1. Lokhande R. D., Murthy, V.M.S.R. and Singh K.B. (2013), "Pot-hole Subsidence in Underground Coal Mining: Some Indian Experiences", *Geotechnical and Geological Engineering*, no.32(3), pp. 214-221.
2. Cundall, P. A. (1987), "Distinct Element Models of Rock and Soil Structure", *Analytical and Computational. Methods in Engineering Rock Mechanics*, Part. 4, pp. 129-163.
3. Rose, B., Andrieux, P. P., O'Connor, C. P. and Verreault, M. (2011), "A Systematic Approach to Rock Mechanics Challenges at Xstrata Zinc Brunswick Mine," *Continuum and Distinct Element Numerical Modeling in Geomechanics 2011 (Proceedings of the Second International FLAC/DEM Symposium)*, Melbourne, Victoria, Australia, February 2011, pp. 49-57. D. Sainsbury et al., Eds. Melbourne: Itasca Australia Pty., Ltd.
4. Ivars, M. Pierce, M.E., Darcel, C., Reyes-Montes, J., Potyondy.D.O., Young, R.P and Cundall, P. A. (2011), "The Synthetic Rock Mass Approach for Jointed Rock Mass Modelling," *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, no.48, , pp. 219-244.
5. FLAC3D (2008), *Fast Lagrangian Analysis of Continua in 3 Dimensions*, Online Manual. Minneapolis, Itasca.

Об авторе

Назимко Виктор Викторович, доктор технических наук, профессор, ведущий научный сотрудник отдела проблем разработки месторождений полезных ископаемых Института физики горных процессов Национальной академии наук Украины (ИФГП, НАНУ), г. Днепропетровск, Украина, victor_nazimko@mail.ru.

About the author

Nazimko Victor Victorovich, Doctor of Technical Science (D.Sc.), Professor, Principal Researcher in Division of Deposit Extraction, Institute Physics of Mining Processes for the National Academy of Sciences of Ukraine (IPMP, NASU), Dnepropetrovsk, Ukraine, victor_nazimko@mail.ru.

Анотація. Комплексні дослідження дозволили встановити суттєві особливості розвитку та активізації зрушень масиву навколо соляних шахт під дією обводнення контакту соляного купола з вищерозташованими породами в результаті витоку стічних вод. Процес зародження руйнування протікає в глибині масиву, після чого він виходить на земну поверхню. Активізація зрушень супроводжується еволюцією кластерної мозаїки приростів зрушень, яка змінює свою поведінку від неузгодженої до узгодженої і навпаки. Саме цей механізм сприяє, по-перше, руйнування, по-друге, поділу масиву на окремі складові, по-третє, протилежному руху цих складових стосовно один одного, і по-четверте, зародженню і розвитку провалів земної поверхні. Це супроводжується екологічною катастрофою на земній поверхні, яка має тенденцію до сталого розвитку і дуже важко піддається управлінню.

Ключові слова: провали земної поверхні, екологічна небезпека, моделювання.

Abstract: Essential peculiarities of ground behavior have been found due to subsidence investigation over abandoned salt mines. Waste water leakage through contact of the ore body and covered rocks caused argillite softening and sliding of the rock clusters one relatively another. As a result, cluster mosaic evolves due to shift from coordinated movement to controversial and vice versa. This behavior promotes chimney subsidence as the consequence of such events: collapse of contact between ore body and covered rock mass, separation of the rock mass into clusters that move in different directions, uncoordinated movement of these clusters, origination and development of chimney subsidence. Size of the chimney is 50 m and more in diameter and its development is unstable and hard to control. Such process is catastrophic and exposes surface buildings and structures to danger.

Keywords: chimney subsidence, ecology hazard, simulation.

Статья поступила в редакцию 10.11.2015

Рекомендовано к печати д-ром технических наук Скипочкой С.И.