

ПРИРОДНЫЕ И ТЕХНОПРИРОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ

УДК 624.131.1:551.252

ИЗУЧЕНИЕ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ И МЕХАНИЗМА
ДЕФОРМИРОВАНИЯ МАССИВОВ ГОРНЫХ ПОРОД ПРИ
ОБРАЗОВАНИИ ПРИРОДНО-ТЕХНОГЕННЫХ КАРСТОВЫХ ПРОВАЛОВ

Ю. А. Мамаев^{1,*}, А. Н. Власов^{2,**}, М. Г. Мнушкин^{1,*}, А. А. Ястребов^{1,*}

¹Институт геоэкологии им. Е.М. Сергеева РАН,
Уланский пер., д. 13, стр. 2, Москва, 101000 Россия
*E-mail: mamaev47ya@mail.ru

²Институт прикладной механики РАН,
Ленинградский пр., д. 7, Москва, 125040 Россия
**E-mail: iam@iam.ras.ru

Поступила в редакцию 26.03.2018 г.

Статья посвящена оценке изменения напряженно-деформированного состояния массивов горных пород при формировании мульд сдвижения и провалов земной поверхности на подработанных территориях шахтных полей Верхнекамского месторождения калийных солей в Пермском крае РФ. Дается описание инженерно-геологических условий одного из типичных участков месторождения, а также природных и техногенных факторов, влияющих на развитие опасных геологических процессов. Приводятся методические особенности разработки геомеханической модели участка и составления конечно-элементной расчетной схемы с выбором расчетных показателей свойств пород и граничных условий расчетной области. Рассматриваются закономерности изменений полей напряжений и деформаций в массивах пород при создании единичных и групп шахтных выработок, расположенных рядом на одной глубине. Описываются возможные механизмы деформирования и разрушения массивов закарстованных горных пород при образовании природно-техногенных провалов земной поверхности. Результаты исследований важны для прогнозирования опасных процессов и принятия защитных мер.

Ключевые слова: месторождение калийных солей, инженерно-геологические условия, напряженно-деформированное состояние, массив горных пород, математическое моделирование, механизмы разрушения пород, образование провалов.

DOI: <https://doi.org/10.31857/S0869-78092019146-59>

Важная проблема строительства и эксплуатации подземных рудников для добычи калийных солей на территории крупнейшего в Российской Федерации Верхнекамского месторождения калийных солей в Пермском крае – развитие деформаций оседания и провалов земной поверхности на подработанных площадях. Это приводит к авариям и затоплению шахт, подземное пространство которых достигает десятков миллионов кубических метров, что существенно снижает запасы сырья калийного производства [3, 12]. Шахтные поля рудников распространены под промышленными зонами и жилыми кварталами городов Соликамск, Березники и примыкающих к ним населенных пунктов.

Деформации и разрушения промышленных и социальных объектов, инженерной и транспортной инфраструктур районов приводят к значительным ущербам. Поэтому важной задачей проводимых здесь геологических работ и мониторинговых наблюдений является установление закономерностей

изменения напряженно-деформированного состояния массивов горных пород и механизмов их разрушения при образовании природно-техногенных карстовых провалов земной поверхности. Это важно для прогнозирования возможных опасностей и снижения рисков от их реализации [1, 4].

Расчетно-аналитические исследования напряженно-деформированного состояния массивов горных пород и возможных механизмов их разрушения были выполнены на Южно-Юрчукском участке шахтного поля четвертого Березниковского рудоуправления (БКРУ-4), входящего в состав Соликамско-Березниковской градопромышленной агломерации (СБГПА). Данный участок типичен по геологическому строению для большей части территории и хорошо разведан, в том числе глубокими скважинами до залегания нефтяных горизонтов.

Инженерно-геологические условия территории СБГПА, включая территорию г. Березники

и прилегающих районов, сложные. Это обусловлено весьма пестрым петрографическим составом переслаивающихся горных пород терригенной, карбонатной и галогенной формаций нижнепермского возраста; непростым структурно-тектоническим планом территории с разломно-блоковой структурой массивов пород; тесной гидравлической связью поверхностных и подземных вод, имеющих разный химический состав и минерализацию; комплексом опасных геологических процессов, активность которых определяется как природными, так и техногенными факторами [9].

К группе природных факторов относятся сейсмические воздействия силой до 6 баллов, тектонические движения блоков по зонам тектонических нарушений; гипергенез, включающий выветривание, выщелачивание, разгрузку и трещинообразование в массивах пород; эрозионные; карстовые и суффозионные процессы, а также процессы массопереноса и переотложения растворимых пород; циклически повторяющиеся процессы затопления и подтопления территорий паводковыми водами и др.

Техногенные факторы развития опасных геологических процессов включают:

- строительство подземных выработок (пустот) большого объема и больших площадей, испытывающих значительное давление на кровлю;
- создание на дневной поверхности огромных солеотвалов высотой до 80-100 м, шламохранилищ и рассолосборников;
- постоянные горные работы в подземном пространстве, обуславливающие вибрацию и другие динамические нагрузки;
- создание поверхностных крупных водных объектов;
- наведенную техногенную сейсмичность;
- откачки подземных вод и нефти;
- химическое загрязнение природной среды и др.

Кроме того, техногенными факторами развития опасных процессов являются нарушения технологических норм ведения горных работ запаздывание закладочных работ в выработках на сроки от нескольких до десятков лет; выполнение закладок в объемах в несколько раз меньше требуемых; увеличение объемов добычи и скоростей проходки выработок с применением старых технологий и оборудования; неправильные расчетные оценки напряженного состояния массивов пород при выбранных размерах камер и межкамерных целиков горных пород.

С целью уточнения и анализа геологических и структурно-геоморфологических условий рассматриваемого района были выполнены дешифрирование и обработка космодатаснимков территории с построением цифровых моделей рельефа и комплекта инженерно-геологических карт. Это позволило уточнить и детализировать геоморфо-

логические и структурно-тектонические условия территории, в том числе распространение отдельных крупных тектонических нарушений и зон их сгущений; установить места, где водозащитная толща продуктивных горизонтов калийных солей имеет малую мощность или просто отсутствует, что создает условия для втока поверхностных вод и перетекания подземных вод в соляные пласты.

ГЕОМЕХАНИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ УЧАСТКА

Для целей численного моделирования процессов изменения напряженно-деформированного состояния (НДС) массивов горных пород при отработке залежи калийных солей были собраны, проанализированы и структурированы фондовый материал, а также данные из опубликованных источников, нормативных документов и отчетов. На основе экспертных оценок особенностей геологического строения участка и обоснования выбора расчетных значений показателей свойств горных пород разработана геомеханическая модель участка (рис. 1 а, б).

Для численного моделирования влияния отработки калийной залежи на деформации соляных выработок и величины осадки земной поверхности методом конечных элементов [2, 8] составлена конечно-элементная расчетная схема (рис. 2).

Физико-механические свойства горных пород обосновывались и выбирались исходя из данных лабораторных испытаний горных пород, а также соотношения скоростей сейсмических волн, регистрируемых в полевых условиях в соответствующих элементах геологического разреза. Эта информация корректировалась на основе анализа данных по другим участкам месторождения и по различным литературным источникам [4, 5, 7 и др.]. Обобщенные показатели свойств, принятые в расчетной схеме, приведены в таблице.

Шахтная добыча полезных ископаемых представляет собой распределенное во времени природно-техногенное воздействие на породный массив, которое проявляется в изменении его напряженно-деформированного состояния.

В геомеханических расчетах принималось, что основное естественное напряженное состояние пород в недрах Соликамской впадины – литостатическое (вертикальное напряжение $\sigma_y^0 = \gamma H$, горизонтальное $\sigma_x^0 = \frac{\nu \gamma H}{1 - \nu}$, где ν – коэффициент

Пуассона), а в интервале соляной толщи – гидростатическое ($\sigma_x^0 = \sigma_y^0 = \gamma H$).

Численное моделирование изменения НДС массива пород осуществлялось в 2D-постановке (в условиях плоской деформации).

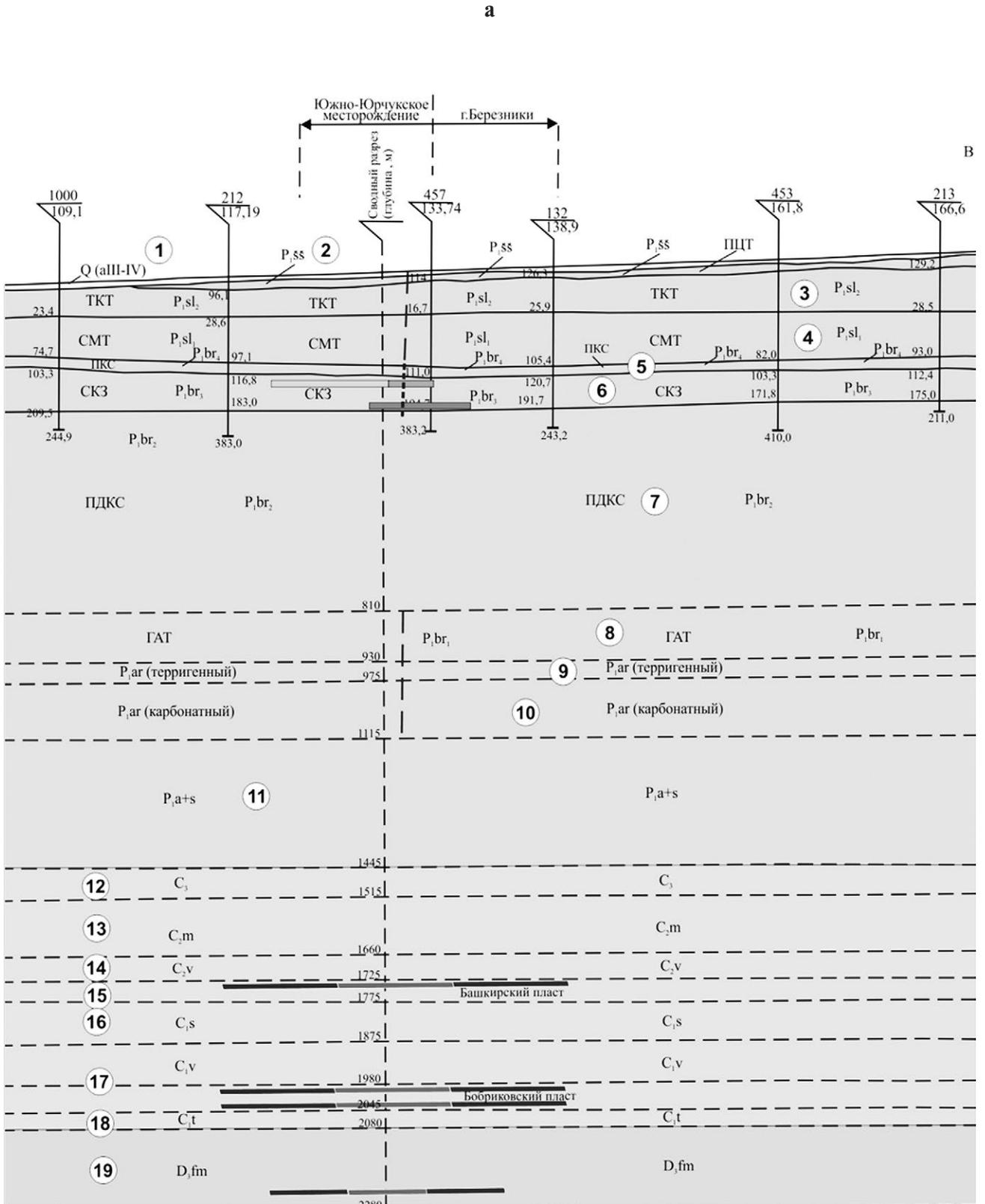


Рис. 1. Геомеханическая модель (в кружках обозначены номера ИГЭ):

а – геологический разрез по расчетной области;

б – состав пород Южно-Юрчукского участка месторождения калийных солей (составлена по материалам ПАО «Уралкалий» и ООО «Лукойл-Пермь»). →

б

Геолог. индекс пород	Состав пород	Мощность, м	Особенности разреза
Q		до 20; редко 50	
P ₁ ss*	Пестроцветная терригенная толща (ПТТ). Переслаивание красноцветных глин, аргиллитов, песчаников и конгломератов с прослоями сероцветных глинисто-карбонатных пород.	0-30	
P ₁ sl ₂	Известняки глинистые, мергели с прослоями аргиллитов, алевролитов, известковистых глин и песчаников; преимущественно сероцветные (ТКТ).	60-100	
P ₁ sl ₁	Мергели, глины известковые загипсованные с прослоями ангидрита, каменной соли и включениями пирита (СМТ). ----- В нижней части СМТ формируются переотложенные породы гипсово-глинистой коры (шляпы) за счет выщелачивания, переноса и отложения сульфатов.	До 120	----- Переходная пачка до 27 м
P ₁ br ₄	Покровная перекрывающая толща каменной соли мелкокристаллической мощностью 15-25 м. (ПКС).	15-29	Водозащитная толща (ВЗТ) до 80 м
P ₁ br ₃	Калийная залежь. Сильвинит-карналлитовая зона (СКЗ). Переслаивание пластов карналлита, пестроокрашенного сильвинита и каменной соли.	47-136	Сильвинитовая зона 12-40 м
P ₁ br ₂	Подстилающая толща каменной соли (ПДКС).	До 500	
P ₁ br ₁	Глинисто-ангидритовая толща (ГАТ). Глина темно-серая, чередующаяся с прослоями и линзами ангидритов, известковистых аргиллитов, мергелей с подчиненными прослоями алевролитов, песчаников и каменной соли.	130	
P ₁ ar	Артинский ярус. Терригенный горизонт. Песчаники, алевролиты, аргиллиты, мергели с линзовидными включениями и тонкими прослоями известняков и доломитов. ----- Артинский ярус. Карбонатный горизонт. Известняки органогенно-обломочные, участками окремнелые с многочисленной фауной.	200 (общая) 50 (терриген.) ----- 150	
P ₁ a+s	Ассельско-сакмарский ярус. Известняки серые, кристаллические, прослоями органогенно-детритовые; участками окремнелые, доломитизированные с прослоями доломитов; местами глинистые, битуминозные с фауной брахиопод, фораминифер.	300-350	
C ₃	Переслаивание пачек доломитов серых, слабоизвестковистых, от глинистых до кристаллических, кавернозных с прослоями известняков и аргиллитов.	34-90	
C ₂ m	Московский ярус. <i>Мячковский горизонт</i> : Неравномерное переслаивание известняков от глинистых до окремнелых и доломитов кавернозных с включениями ангидритов.	До 140 (общая) 38-48	
	<i>Подольский горизонт</i> : Переслаивание доломитов, местами окремнелых, с включениями ангидритов с прослоями известняков органогенно-обломочных и аргиллитов.	43-53	
	<i>Каширский горизонт</i> : Доломиты, кристаллические известняки доломитизированные с прослоями аргиллитов.	35-55	
	<i>Верейский горизонт</i> : Известняки глинистые, мергели и аргиллиты.	60-72	
C ₂ b	Башкирский ярус. Известняки органогенные слоистые доломитизированные с прослоями глинистых. Включают Башкирский нефтеносный пласт.	До 60 (17-25 м)	
C ₁ s	Серпуховский ярус. Доломиты известковистые, неравномерно сульфатизированные, трещиноватые с пятнами битумов с прослоями известняков органогенных и глинистых с многочисленной фауной.	100	
C ₁ v	Визейский ярус. Переслаивание известняков органогенно-обломочных доломитизированных, реже глинистых с прослоями доломитов; глинистых битуминозных песчаников, аргиллитов и алевролитов. Включают Бобриковский нефтеносный пласт (до 24 м).	до 80	
C ₁ t	Турнейский ярус. Известняки мелкодетритовые, доломитизированные, прочные, трещиноватые (нефтеносные).	До 50	
D ₁ fm	Фаменский ярус. Известняки слабо доломитизированные со стилолитовыми швами и глинистыми примазками по плоскостям напластования.	До 180	

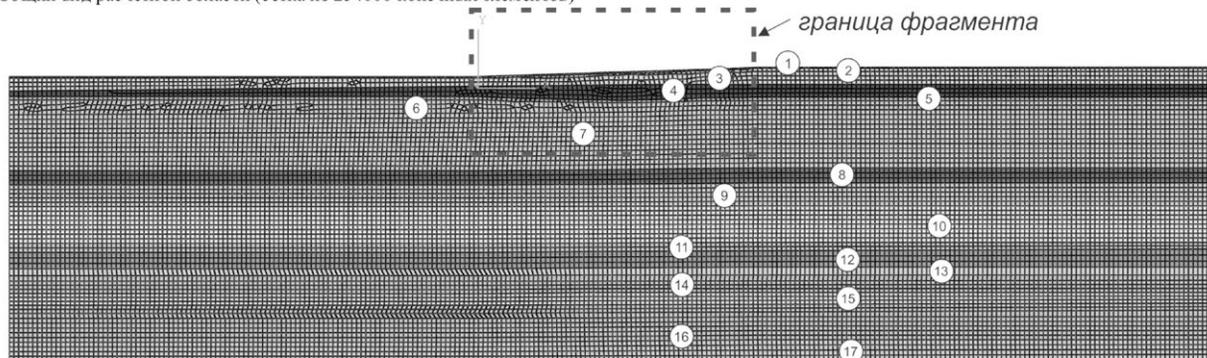
Размеры расчетной области превышают размеры участка инженерно-геологических изысканий. Поэтому имеющаяся информация о строении и физико-механических свойствах горных пород распространялась на всю расчетную область.

Расчетная модель, построенная на основе геомеханической модели, включала в себя

массив горных пород с размерами основания $\approx 9900 \times 2340$ м.

Рассматриваемая область (разрез) аппроксимировалась изопараметрическими четырехугольными конечными элементами второго порядка (4 узла в углах + 4 узла на сторонах элемента, см. рис. 2) [2].

а) Общий вид расчетной области (сетка из 254000 конечных элементов)



Примечание: Геологический разрез по расчетной области (граница фрагмента) показан на рисунке 1.

б) Укрупненный фрагмент расчетной области

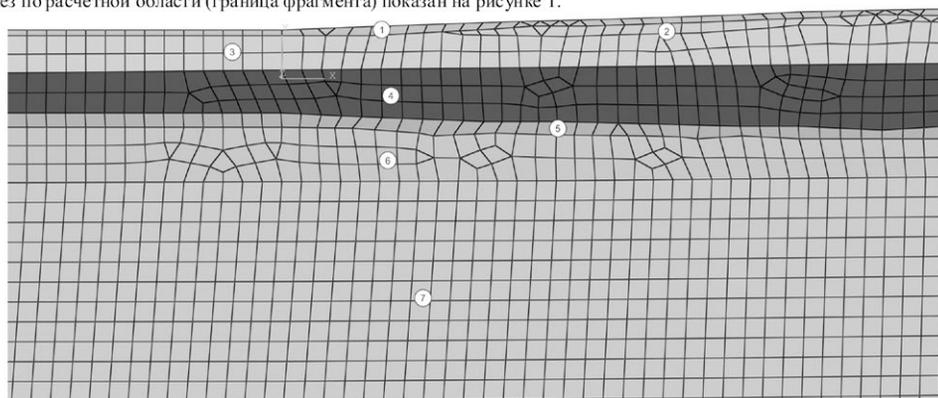


Рис. 2. Конечно-элементная расчетная схема и ее фрагмент для Южно-Юрчукского участка месторождения (в кружках — локальная нумерация пород).

Решение проводилось в несколько этапов, которые соответствовали шагам “нагрузки” модели:

- формирование начального НДС массива, обусловленного силами гравитации и исходным геологическим строением;
- моделирование НДС массива пород с учетом создания подземных соляных выработок. При этом напряжения, рассчитанные на предыдущей стадии, рассматривались в качестве начальных.

При выполнении численных расчетов назначались следующие граничные условия по закреплениям:

- на поверхности расчетной области — свободное перемещение узлов по всем направлениям;
- на боковых границах расчетной области — свободное перемещение в вертикальном направлении (вдоль оси Y) и запрет на горизонтальные перемещения (вдоль оси X);
- на подошве расчетной области — запрет на перемещения по всем направлениям.

Скальные породы и соляные пласты моделировались с использованием модели Хоека-Брауна [14, 15], дисперсные породы — идеально-упруго-пластической модели Друкера-Прагера.

Численная реализация расчетной схемы проводилась по стандартному алгоритму метода конечных элементов.

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Выполненные расчеты позволили качественно и количественно охарактеризовать возможные деформации в массивах пород соляной и надсоляной толщ в процессе развития мульды сдвижения пород над выработанным пространством при разном количестве (протяженности) горных выработок (камер) (рис. 3 а-г). Размеры камер были приняты 13×15 м, а ширина межкамерных целиков горных пород — 10 м.

Уже при создании двух расположенных рядом камер в перекрывающем их массиве пород формируется общий свод вертикальных деформаций, который по мере увеличения количества камер (протяженности горизонта выработки) увеличивается в размерах в высоту и ширину. При 5-6 камерах, расположенных рядом по одному горизонту отработки солей на глубине 200-250 м, единый свод вертикальных деформаций достигает поверхности земли, а при 12-13 камерах в ряд

вертикальные оседания земной поверхности уже достигают десятков сантиметров.

Расчетами установлено значительное увеличение интенсивности касательных напряжений в массиве пород при увеличении в нем количества горных выработок.

На общую устойчивость горных выработок влияют, в первую очередь, состав, состояние и физико-механические свойства пород, слагающих кровли выработок и межкамерные целики, в которых возможно формирование трещин скола, а также наличие зон крупных тектонических нарушений с повышенной трещиноватостью и ослабленными свойствами пород [11, 12]. Ширина зон влияния отдельных крупных тектонических нарушений, по данным моделирования, может достигать 100–200 м.

Необходимо отметить, что установленные расчетные величины деформаций оседания земной поверхности и размеры зон изменения НДС массивов пород получены на расчетных схемах, в которых учитывались имеющиеся, преимущественно стандартные (условно мгновенные) показатели прочностных и деформационных свойств, определяемые по схемам быстрых геотехнических испытаний горных пород. В конкретных геологических условиях рассматриваемой территории при длительном воздействии напряжений (десяtkи лет) происходит постепенное значительное снижение прочности горных пород, характеризуемое понятием “длительной прочности”, показатели которой всегда значительно меньше стандартной прочности [5, 6, 11, 13, 16, 17]. При учете в моделях реологических свойств пород, характеризующих деформации ползучести горных пород при долговременном силовом воздействии на них, величины деформаций пород при подземной отработке залежи калийных солей в массиве и на дневной поверхности будут значительно больше. По данным натурных наблюдений на земной поверхности они достигают 4–5 м.

Над подземными горными выработками большого размера формируются объемные зоны измененного НДС горных пород, в пределах которых напряжения меняются с сжимающих (геостатических) на растягивающие, действующие вблизи и на поверхности выработок [10]. При разрушении горных пород вокруг выработок вместе с развитием трещин меняются деформационные характеристики массива пород, включающего сплошные участки относительно сохранных блоков и пакетов пород и зоны нарушений. Развитие деформаций в этих зонах приводит в дальнейшем к формированию куполов обрушения над выработками. При этажном (друг над другом) расположении последних могут развиваться весьма сложные зоны разрушений в массивах горных пород,

которые могут достигать земной поверхности, образуя участки оседаний и провалы [1].

Механизмы разрушения разблоченных, сильно трещиноватых массивов скальных и полускальных горных пород значительно сложнее, чем в дисперсных грунтовых толщах.

На рассматриваемой территории СБГПА нижепермские терригенно-карбонатные породы повсеместно перекрыты чехлом рыхлых четвертичных отложений разного генезиса, мощностью от 10 до 20 м. Именно в терригенно-карбонатных породах над выработанным подземным пространством рудников отмечаются значительные (до 4–5 м) деформации с последующим возникновением на дневной поверхности больших провалов размерами от 100 до 400 м. Очевидно, что эти катастрофические явления обусловлены активным проявлением суффозионных и карстовых процессов в зоне гипергенных (вторичных) изменений в верхней части толщи. Их активизации способствуют также процессы разгрузки напряжений, трещинообразования, химического, физического и биологического выветривания, а также выщелачивания и механического выноса грунтовых частиц подземными водами.

Базисами эрозии карстовых и суффозионных процессов на рассматриваемой территории являются не только современные долины р. Камы и ее притоков, но и расположенная в непосредственной близости к шахтным полям калийных рудников древняя переуглубленная долина Пра-Камы с глубиной эрозионного вреза более 100 м.

Разный петрографический состав переслаивающихся горных пород, их тектоническая раздробленность, высокая трещиноватость и выветрелость в зоне гипергенеза обуславливают их значительную неоднородность. По данным гранулометрического анализа, коэффициент неоднородности отдельных горизонтов горных пород колеблется от 3 до 100 и более. При значении коэффициента неоднородности более 20 породы считаются неоднородными. Таким образом, можно заключить, что горные породы отдельных зон и горизонтов терригенно-карбонатной толщи сильно неоднородные и сверхсуффозионноопасные.

По нормативным данным, в толщах неоднородных пород суффозия может развиваться уже при градиентах напора подземных вод больше 5. В случаях аварий 1986, 2006, 2010, 2011 и 2015 гг. при изменении природных гидродинамических условий градиенты напора достигали значений 200–250, что в десятки раз превышает нормативные значения градиентов, при которых начинается развиваться механический размыв и вынос грунтовых частиц [1, 3, 9]. В этом случае можно говорить о внутренней эрозии — размыве и выносе

Обобщенные показатели физико-механических свойств горных пород, выделяемых в геологических разрезах месторождений нефти на территории СБГПА

	Предел прочности		МПа	МПа	МПа	МПа	МПа	МПа	МПа					
	при растяжении σ_p	при сжатии $\sigma_{сж}$												
Угол внутр. трения ϕ			°	23		27		25	15					
Удельное сцепление c			МПа	0.02		0.3		0.6	0.4					
Коэфф. Пуассона ν			-	0.3		0.3		0.25	0.3					
Модуль деформации E			МПа	50		700		300	400					
Динамический модуль упругости E_d			МПа	-		700		1200	400-800					
Скорость продольных волн V_p			км/с	0.85		до 1.65		до 2.0	2.0-2.9					
Плотность грунта γ			г/см ³	2.20		2.15		2.25	2.25					
Мощность толщи			м	До 40		До 50		170	100					
Состав пород			Пески с глинами, суглинками, реже с галечниками			Песчаники, мергели, глинистые известняки, аргиллиты, алевролиты с линзами и прослоями брекчий. Выветрелые, трещиноватые, выщелоченные. Мощность зоны гипергенеза до 90 м			Чередование известняков, мергелей с прослоями аргиллитов и известковистых глин. Выветрелые, трещиноватые, слабые			Мергели, глины известковистые, загипсованные и засоленные, иногда с прослоями ангидрита, каменной соли. Переходная пачка с сульфатной переотложенной корой («шлапой»)		
Толща (пачка)						Пестроцветная терригенная толща			Терригенно-карбонатная толща ТКТ			Соляно-мергельная толща СМТ		
Горизонт						Шешминский			Соликамский					
Ярус						Уфимский								
Отдел						Верхний (P ₂)								
Система						Пермская (P)								
Геологический индекс			Q			P _{1ss}			(us ₂) P _{1sl₂}			(us ₁) P _{1sl₁}		

Геологический индекс	Система	Отдел	Ярус	Горизонт	Толща (пачка)	Состав пород	Мощность толщи	Плотность грунта γ	Скорость продольных волн V_p	Динамический модуль упругости E_d	Модуль деформации E	Коэфф. Пуассона ν	Удельное сцепление c	Угол внутр. трения ϕ	Предел прочности	
															при сжатии $\sigma_{сж}$	при растяжении σ_p
P_1br_4	Пермская (P)	Нижний (P_1)	Кунгурский	Иренский	Покровно-каменная соль (ПКС)	Покровная каменная соль, сильвинит карналитовая и сильвинитовая пачки (калийные соли)	До 20	2.20	3.0	900	800	0.4	4.8	31	-	-
P_1br_3					Сильвинит карналитовая зона		60	2.20	3.0	700	0.4	3.9	31	-	-	
P_1br_2					Подстилающая каменная соль (ПКС)		340	2.11	3.5	800	0.4	4.1	31	-	-	
P_1br_1	Пермская (P)	Нижний (P_1)	Кунгурский	Иренский	Глинисто-ангидритовая толща (с филипповской)	Чередование ангидритов, известковых аргиллитов, мергелей с подчиненными прослоями и линзами алевролитов, песчаников и каменной соли	360	2.88	4.0	1100	140	0.3	2.5	30	8.6	2.9
P_1ar					Терригенная		До 260	2.58	4.2	90	0.25	0.7	25	3.0	0.5	
P_1a+s	Пермская (P)	Нижний (P_1)	Кунгурский	Иренский	Карбонатная	Известняки светло-серые, темно-серые, участками окремненные, органогенно-обломочные с многочисленной фауной	130	2.60	4.0	1100	140	0.25	0.9	25	10	3
					Карбонатная известняковая		300	2.64	4.5	200	0.27	15	30	51	5	
C_3	Каменноугольная (C)	Верхний (C_3)	Ассел.+сакм.		Карбонатная доломитовая	Доломиты серые, слабо известковистые, прослоями глинистые, кристаллические, участками каверновые с прослоями известняков	70	2.64	4.7	1400	140	0.27	0.4	28	10	2.5

Примечания: Для солей значение коэффициента $\nu = 0.5$ соответствует значению, принятому в расчетах начального напряженного состояния; в таблице — значение, принимаемое в расчетах.

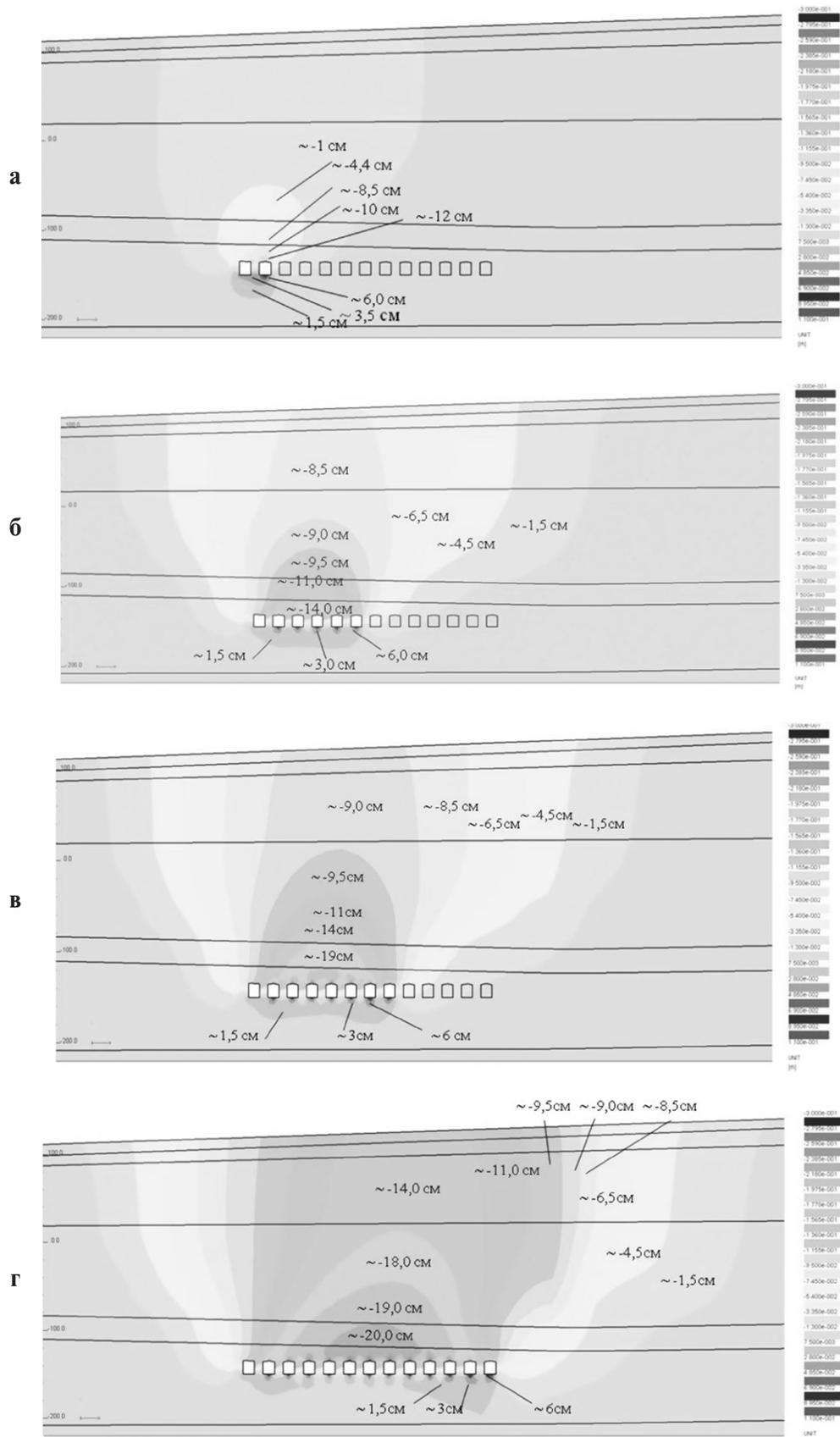


Рис. 3. Вертикальные смещения (осадки) при разной протяженности горизонта соляных выработок (камер): а – 2 камеры; б – 6 камер; в – 8 камер; г – 13 камер.

почти всех фракций несвязной рыхлой породы, в том числе заполнителя трещин, в существующие карстовые полости больших размеров или в полости, образуемые в ходе самого процесса за счет выщелачивания пород в стенках полостей и трещин.

Следует отметить, что все случившиеся в пределах данной территории провалы земной поверхности (1986 г. — на площади рудника БКРУ-3; 2007, 2010, 2011 и 2015 гг. — на руднике БКПРУ-1) произошли в результате деформаций терригенно-карбонатных пород в зонах влияния крупных тектонических нарушений и имели глубину 80-90 м, при том что шахтные выработки располагались на значительно больших глубинах — 200-300 м.

Нижняя граница зоны гипергенеза коренных пород, по данным бурения и геофизики, располагается на глубинах 80-90 м. Ниже залегают относительно сохранные, менее выветрелые и трещиноватые породы.

Особое значение в массивах горных пород надсоляной толщи имеют зоны крупных тектонических нарушений, характеризующиеся высокой трещиноватостью, раздробленностью и проницаемостью пород. Данные зоны являются путями сосредоточенной фильтрации и каналами проникновения агентов выветривания пород, а также химических загрязняющих элементов. В пространственном отношении общее направление фильтрационных потоков было и остается направленным вниз в сторону современной долины р. Камы, к основанию ее древней переуглубленной долины и еще глубже к зонам втока в подземные шахтные выработки большого объема.

Ниже рассмотрены гипотетические возможные схемы развития деформаций в надсоляной толще нижнепермских отложений, представленных породами терригенно-карбонатного и соляно-мергельного состава, перекрывающей соляные породы большой мощности с разрабатываемыми горизонтами калийных солей.

Одна из схем формирования провалов на территории г. Березники предполагает (рис. 4), что первоначально происходит ослабление несущей способности целиков и стен камер, развитие деформаций в толще вышележащих пород с изменением их НДС и последующим нарушением сплошности водозащитной толщи. Развивается длительная интенсивная вертикальная фильтрация; растворение и суффозия пород терригенно-карбонатной и соляно-мергельной толщ; поступление в разной степени минерализованного вод в подземные выработки; растворение целиков и стен камер в ослабленной зоне сильвинито-карналитовой толщи. Над выработанным подзем-

ным пространством большого объема и большой площади формируется свод обрушения, продвигающийся от подземных выработок вверх с выходом на поверхность в виде провала.

По другой схеме (рис. 5), описанные выше процессы являются лишь "спусковым крючком", активизирующим процесс развития карстовых и суффозионных деформаций в вышележащих терригенно-карбонатной и соляно-мергельной толщах. Нарушение сплошности водозащитной толщи над подземными горными выработками, обусловленное изменением НДС массивов пород, ослабленных шахтами, приводит к развитию во всей выше залегающей толще повышенной трещинной пустотности и длительной вертикальной направленной вниз фильтрации с большими скоростями и объемами втока в подземные выработки.

Процесс интенсивной промывной фильтрации, длящийся годами, накладывается на природный карстовый процесс, активно развивающийся в мощной зоне гипергенеза древних пермских отложений. Именно здесь формируются крупные карстовые полости и разветвленные протяженные карстово-суффозионные каналы и галереи, заложенные по крупным тектоническим и литогенетическим трещинам, над которыми в пределах зоны гипергенеза мощностью до 90 м образуются крупные мульды оседания и провалы земной поверхности. Причем карстовый процесс существенно активизируется из-за сильного химического загрязнения подземных вод выбросами, выпускаемыми и отходами промышленных предприятий, содержащими в большом количестве свободную углекислоту, которая способна ускорять процесс растворения пород в десятки раз.

Существуют и другие гипотетические схемы формирования провалов в надсоляной толще. Одна из них предполагает, что развитие провала происходит по типу работы песочных часов, когда идет встречное развитие процессов, а именно: снизу вверх — рост свода обрушения над подземными выработками, и сверху вниз — усиление (увеличение объемов и скоростей) карстовых, суффозионных и деформационных процессов в гипергенно измененной толще пород. В заключительной стадии происходит расширение контактной области развития встречных процессов сначала с деформациями "течения грунта в отверстие", а затем с обрушением масс горных пород в нижнюю полость и образованием провала. Весьма вероятно, что на рассматриваемой территории все приведенные выше схемы развития провалов над подземными выработками могут иметь место. Это зависит от того или иного сочетания природных геологических и техногенных факторов.

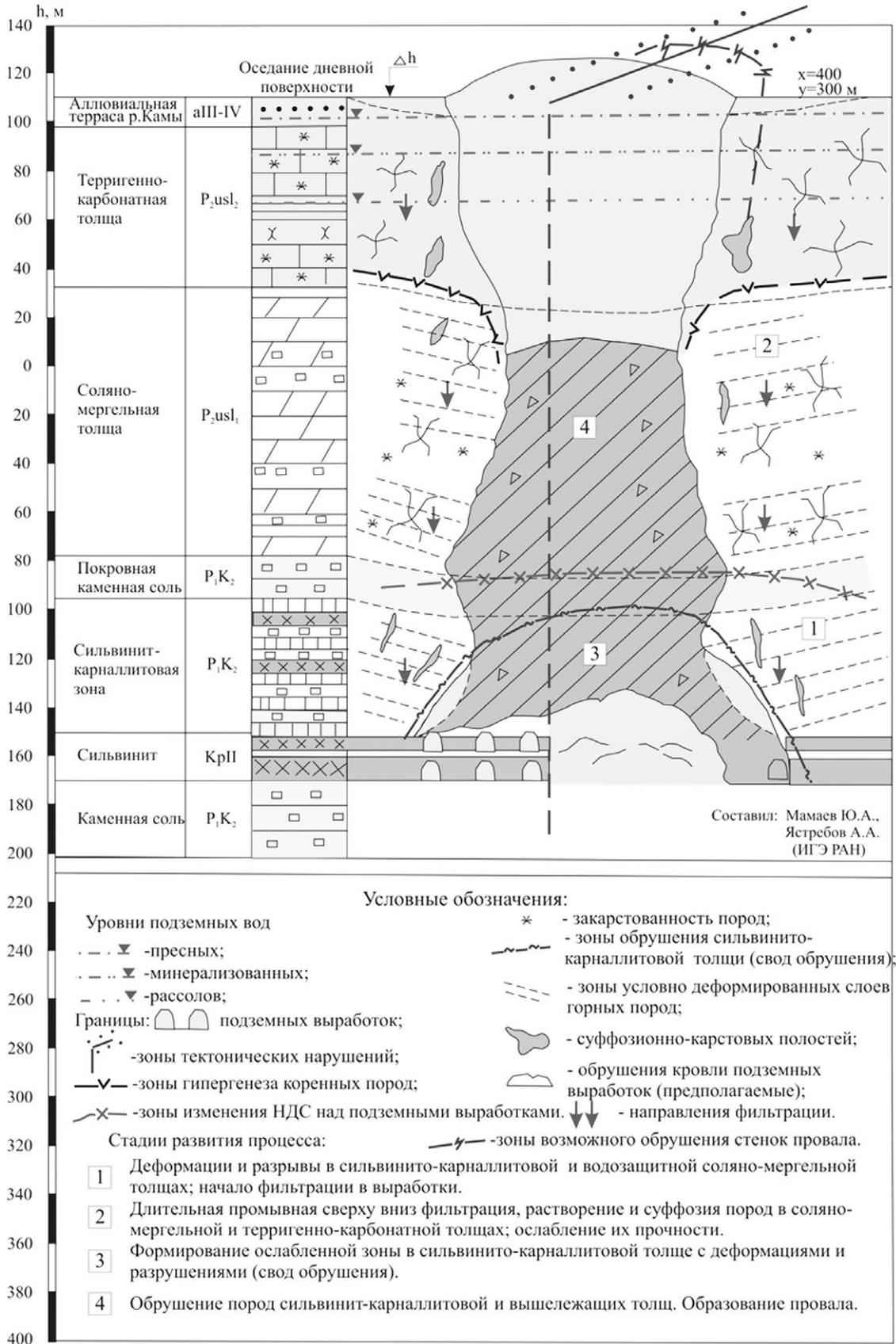


Рис. 4. Схема механизма и динамики формирования провала на руднике БКПРУ-1 (вариант 1).

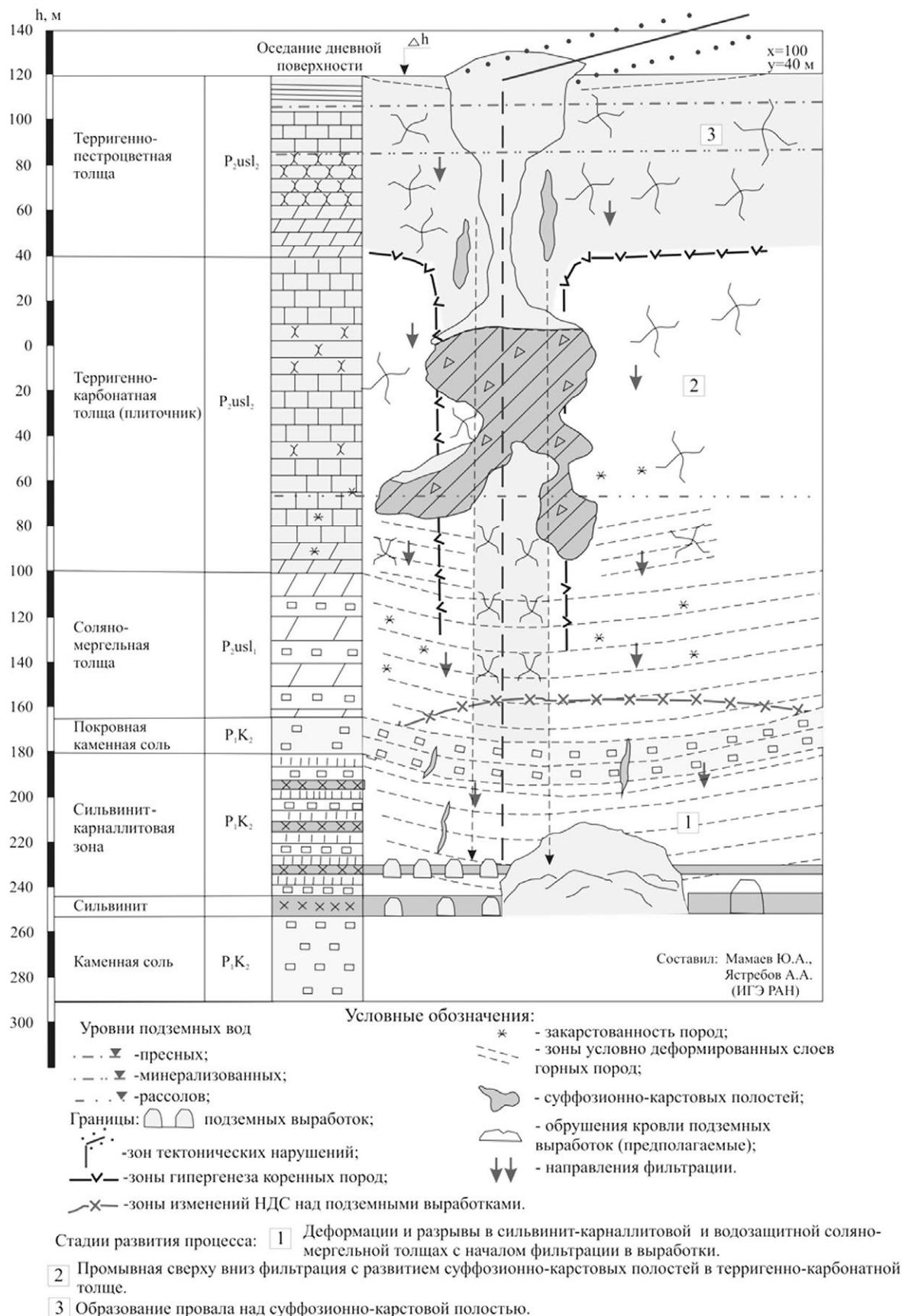


Рис. 5. Схема механизма и динамики формирования провала на руднике БКПРУ-1 (вариант 2).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполненные исследования инженерно-геологических условий подрабатываемых территорий месторождений полезных ископаемых в Пермском крае показывают, что создание шахтных полей большой площади и большого объема оказывает существенное влияние на изменение напряженно-деформированного состояния массивов горных пород и развитие опасных геологических процессов: оседание и провалы земной поверхности, активизация карстовых и суффозионных процессов, прорывы подземных вод в горные выработки и другие.

Для их изучения, прогнозирования и предупреждения негативных последствий требуется проведение комплексных геологических, геотехнических и расчетно-аналитических работ, включающих варианты расчеты на математических геомеханических моделях геологической среды, а также долговременных комплексных мониторинговых наблюдений и измерений с установлением факторов-индикаторов (предвестников), указывающих на направленность и стадию развития негативных процессов.

Дальнейшие геологические и аналитические работы, включая математическое моделирование напряженно-деформированного состояния массивов горных пород на провалоопасных участках, могут дать более обоснованные прогнозные оценки опасности развития деформаций и провалов земной поверхности на территории г. Березники и в целом на территории Соликамско-Березниковской градо-промышленной агломерации Пермского края.

Результаты комплексных исследований, дополняющие и уточняющие друг друга, позволяют контролировать и прогнозировать развитие опасных геологических процессов, принимать защитные инженерные, административно-организационные и планировочные градостроительные меры, снижающие уровень социальных и экономических рисков.

Источник финансирования. Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РНФ (проект № 16-17-00125 «Оценка риска опасных природных процессов на урбанизированных территориях»).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аварийные ситуации при строительстве и эксплуатации транспортных тоннелей и метрополитенов /С.Н. Власов, А.В. Маковский, В.Е. Меркин и др. М.: ТИМР, 2000. 195 с.
2. Бате К.Ю. Методы конечных элементов. М.: Физматлит, 2010. 1024 с.
3. Борзаковский Б.А., Марakov В.Е., Теннисон Л.О. Прогноз негативного влияния затопления рудника БКПРУ-1 ОАО «Уралкалий» на городскую и про-

- мышленную застройку г. Березники // Горный информ.-аналит. бюллетень. 2009. № 7. С. 381-396.
4. Булат А.Ф. Задачи деформирования массива горных пород // Прикладная механика. 2004. Т. 40. № 12. С. 3-16.
 5. Виттке В. Механика скальных пород. М.: Недра, 1990. 439 с.
 6. Исследование прочности и деформируемости горных пород. М.: Наука, 1973. 208 с.
 7. Карташов Ю. М., Матвеев Б. В., Михеев Г. В., Фадеев А. Б. Прочность и деформируемость горных пород. М.: Недра, 1979. 269 с.
 8. Оловянный А.Г. Некоторые задачи механики массивов горных пород. СПб.: ВНИМИ, 2003. 234 с.
 9. Осипов В.И., Барях А.А., Санфиоров И.А., Мамеев Ю.А., Ястребов А.А. Карстовая опасность при затоплении калийного рудника в г. Березники Пермского края Российской Федерации // Геоэкология. 2014. № 4. С. 356-361.
 10. Савин Г.Н. Распределение напряжений около отверстий. Киев: Наукова Думка, 1968. 891 с.
 11. Берон А.И. Свойства горных пород при разных видах и режимах нагружения. М.: Недра, 1983. 276 с.
 12. Ставрогин А.Н., Протосеня А.Г. Прочность горных пород и устойчивость выработок на больших глубинах. М.: Недра, 1985. 271 с.
 13. Ставрогин А.Н., Тарасов Б.Г. Экспериментальная физика и механика горных пород. СПб.: Наука, 2001. 343 с.
 14. Eberhardt E. The Hoek–Brown Failure Criterion // Rock Mech. Rock Eng. 2012. V. 45. P. 981-988.
 15. Hoek E, Brown E.T. The Hoek–Brown failure criterion – a 1988 update // In: Curran J. (ed) Proceedings of the 15th Canadian Rock Mechanics Symposium. University of Toronto, Toronto. 1988. P. 31-38.
 16. Jaeger J., Cook N.G., Zimmerman R. Fundamentals of Rock Mechanics. Wiley-Blackwell, 2007. 475 p.
 17. Wittke, W. Rock mechanics. Theory and applications with case histories. Berlin: Springer Verlag, 1990. 1075 p.

REFERENCES

1. Avariinye situatsii pri stroitel'stve i ekspluatatsii transportnykh tonnelei i metropolitenov [Emergency situations upon construction and operation of transport and metro tunnels]. S.N. Vlasov, A.V. Makovskii, V.E. Merkin et al. Moscow, TIMR Publishers, 2000, 195 p. (in Russian)
2. Bate, K.Yu. *Metody konechnykh elementov* [Methods of finite elements]. Moscow, Fizmatlit Publishers, 2010, 1024 p. (in Russian)
3. Borzakovskii, B.A., Marakov, V.E., Tennison, L.O. Predicted negative impact of flooding BKRPU-1 ОАО Uralkalii on urban and industrial buildings in Berezniki town. *Gornyi inform.-analyt. byulleten*, 2009, no. 7, pp.381-396. (in Russian)

4. Bulat, A.F. Tasks in rock mass deformation. *Prikladnaya mekhanika*, 2004, vol. 40. No. 12, pp. 3-16. (in Russian)
5. Wittke, W. Rock mechanics. Moscow, Nedra Publishers, 1990, 439 p. (in Russian)
6. *Issledovanie prochnosti i deformiruемости gornyx porod* [Study of rock strength and deformability]. Moscow, Nauka, 1973, 208 p. (in Russian)
7. Kartashov, Yu.M., Matveev, B.V., Mikheev, G.V., Fadeev, A.B. *Prochnost' i deformiruемость gornyx porod* [Rock strength and deformability]. Moscow, Nedra, 1979, 269 p. (in Russian)
8. Olovyannyi, A.G. *Nekotorye zadachi mekhaniki massivov gornyx porod* [Some problems in rock mass mechanics]. St.Petersburg, VNIMI Publishers, 2003, 234 p. (in Russian)
9. Osipov, V.I., Baryakh, A.A., Sanfirov, I.A., Mamaev, Yu.A., Yastrebov, A.A. *Karst hazard upon the flooding of potassium mine in Berezniki town* (Perm krai, Russian Federation). *Geoekologiya*, 2014, no. 4, pp. 356-361. (in Russian)
10. Savin, G.N. *Raspredelenie napryazhenii okolo otverstii* [Stress distribution near openings] Kiev, Naukova Dumka, 1968, 891 p. (in Russian)
11. Beron, A.I. *Svoistva gornyx porod pri raznykh vidakh i rezhimakh nagruzheniya* [Rock properties upon various types and regimes of loading]. Moscow, Nedra, 1983, 276 p. (in Russian)
12. Stavrogin, A.N., Protosenya, A.G. *Prochnost' gornyx porod i ustoychivost' vyrabotok na bol'shikh glubinakh* [Rock strength and mine workings stability at a large depth]. Moscow, Nedra, 1985, 271 p. (in Russian)
13. Stavrogin, A.N., Tarasov, B.G. *Eksperimental'naya fizika i mekhanika gornyx porod* [Experimental physics and rock mechanics]. St.Petersburg, Nauka, 2001, 343 p. (in Russian)
14. Eberhardt, E. The Hoek–Brown Failure Criterion. *Rock Mech. Rock Eng.*, 2012, vol. 45, pp. 981-988.
15. Hoek, E, Brown, E.T. The Hoek–Brown failure criterion – a 1988 update. Curran J., Ed. Proceedings of the 15th Canadian Rock Mechanics Symposium. University of Toronto, Toronto, 1988, pp. 31-38.
16. Jaeger, J., Cook, N.G., Zimmerman, R. *Fundamentals of Rock Mechanics*. Wiley-Blackwell, 2007, 475 p.
17. Wittke, W. *Rock mechanics. Theory and applications with case histories*. Berlin: Springer Verlag, 1990.1075 p.

THE STUDY OF STRESS STATE AND MECHANISM OF ROCK MASSIF DEFORMATION UPON THE FORMATION OF TECHNOLOGICAL KARST COLLAPSES

Yu. A. Mamaev^{1,*}, A. N. Vlasov^{2,**}, M. G. Mnushkin¹, and A. A. Yastrebov¹

¹*Sergeev Institute of Environmental Geoscience, Russian Academy of Sciences, Ulanskii per., 13, str.2, Moscow, 101000 Russia*

²*Institute of Applied Mechanics, Russian Academy of Sciences, Leningradskii pr., 7, Moscow, 125040 Russia*

*E-mail: mamaev47ya@mail.ru

**E-mail: iam@iam.ras.ru

The paper deals with the assessment of stress-strain state variation in rock massifs upon the formation of displacement mounds and surface sinkholes in the undermined areas of Verkhnekamskoe potassium salt deposit in Perm krai, Russia. Engineering geological conditions, as well as natural and technogenic factors influencing the development of hazardous geological processes are described by the example of one typical site of the deposit. Methodical issues of the development of geomechanical model for this site and compilation of finite-element calculation scheme with selecting calculation parameters of rock properties and boundary conditions of the calculation area are considered. Regularities in the variation of stress fields and rock massif deformations upon cutting mines at one depth are considered. The possible mechanisms of deformation and destruction of karstified rock massifs upon the formation of technological sinkholes on the earth surface are described. The results of the study are significant for predicting hazardous processes and undertaking protective measures.

Keywords: *potassium salt deposit, engineering geological conditions, stress-strain state, rock massif, mathematical simulation, rock destruction mechanisms, collapse formation*

DOI: <https://doi.org/10.31857/S0869-78092019146-59>