

## ФУНКЦИОНИРОВАНИЕ ПРИРОДНЫХ И ПРИРОДНО-ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

УДК 624.131.1: 551.252

### ИЗМЕНЕНИЕ СТРУКТУРЫ ОБЛАСТИ ДЕФОРМАЦИЙ ПОДРАБАТЫВАЕМОЙ ТОЛЩИ ГОРНЫХ ПОРОД ПРИ ОДНОУРОВНЕВОЙ МНОГОКАМЕРНОЙ ОТРАБОТКЕ СОЛЯНОЙ ЗАЛЕЖИ

© 2021 г. Ю. А. Мамаев<sup>1,\*</sup>, А. Н. Власов<sup>2,\*\*</sup>, М. Г. Мнушкин<sup>1</sup>, П. В. Стольников<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Институт геоэкологии им. Е.М. Сергеева РАН, Уланский пер., д.13, стр. 2, Москва, 101000 Россия

<sup>2</sup> Институт прикладной механики РАН, Ленинградский пр., д.7, Москва, 125040 Россия

\*E-mail: [mamaev47ya@mail.ru](mailto:mamaev47ya@mail.ru)

\*\*E-mail: [iam@iam.ras.ru](mailto:iam@iam.ras.ru)

Поступила в редакцию 16.09.2020 г.

После доработки 15.10.2020 г.

Принята к публикации 05.11.2020 г.

В статье рассматриваются результаты математического моделирования процессов изменения напряженно-деформированного состояния и структуры области деформаций подрабатываемой толщи пород при последовательной многокамерной отработке залежи солей Верхнекамского калийного месторождения (ВКМКС) на территории Соликамско-Березниковской градопромышленной агломерации (СБГПА). Приводятся методические особенности разработки геомеханической модели участка и составления конечно-элементной расчетной схемы с выбором расчетных показателей свойств пород и граничных условий расчетной области. Дается описание характера и параметров изменения структуры области деформаций в подрабатываемом массиве пород надсоляной толщи при создании единичных и блоков камер, расположенных рядом на одной глубине. Результаты исследований важны для прогнозирования опасных процессов и принятия защитных мер на подрабатываемых территориях.

**Ключевые слова:** *месторождение калийных солей, инженерно-геологические условия, напряженно-деформированное состояние массива горных пород, подрабатываемая толща, математическое моделирование*

DOI: 10.31857/S0869780921010069

#### ВВЕДЕНИЕ

Верхнекамское месторождение калийных солей (ВКМКС) в Пермском крае является самым крупным в Российской Федерации. В границах Предуральяского краевого прогиба месторождение протягивается в меридиональном направлении почти на 140 км и состоит из сомкнутых крупных блоков шириной от первых до первых десятков километров, разделенных субширотными сдвиговыми зонами. Месторождение разрабатывается шахтным способом с 1954 г. При отработке залежи калийных солей нередки случаи образования на земной поверхности участков оседания (мульд сдвижения) и провалов, что обусловливается составом, состоянием и свойствами горных пород; их значительной полигенетической трещиноватостью, обводненностью, а также изменением напряженно-деформированного состояния (НДС) массивов пород, вмещающих горные выработки больших размеров и технические системы добычи соли [1, 3].

С начала строительства подземных выработок (камер) по настоящее время в границах горных отводов рудников на поверхности земли сформировались и продолжают развиваться мульды оседания глубиной от 2 до 5.5 м. В 1986, 1995, 2006, 2014 и 2015 гг. на 3-х (из 15-ти) рудниках произошли крупные аварии с частичным и полным затоплением выработанного подземного пространства. Это привело к формированию 6 крупных провалов земной поверхности овальной формы с плановыми размерами от 110 до 400 м, глубиной до 90 м. Развитие мульд сдвижения и провалов сопровождалось значительными изменениями рельефа аварийных участков, сейсмического режима, активизацией гидрогеохимических и газогеохимических процессов, существенными изменениями напряженно-деформированного состояния (НДС) массивов горных пород разрабатываемых и перекрывающих толщ [1, 4, 6].

В составе научно-исследовательских работ по оценке и прогнозированию инженерно-геологических условий развития деформаций земной по-

верхности подрабатываемых территорий были выполнены модельные исследования изменения НДС массивов горных пород при строительстве одиночных камер и их блоков.

Цель работ – установление закономерностей изменения структуры и размеров области деформаций пород в подрабатываемой толще при увеличении количества подземных выработок.

### ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЙ

Для решения задач численного моделирования процессов изменения НДС массивов горных пород при отработке залежи калийных солей был собран, проанализирован и структурирован фондовый материал, а также данные из опубликованных источников, нормативных документов и научно-технических отчетов.

Территории разрабатываемых и аварийных рудников ВКМКС схожи по геологическому строению, в котором основное значение имеют коренные породы нижнепермского возраста уфимского и кунгурского ярусов ( $P_{1sl,2}$ ;  $P_{1k}$ ) и перекрывающие пласты солей. По преобладающему петрографическому составу пород в геологическом разрезе выбранного типичного участка одного из калийных рудников (Южно-Юрчукского) сверху вниз выделяют несколько толщ:

– фрагменты шешминской пестроцветной терригенной толщи (ПТТ), представленные переслаивающимися слоями песчаников, мергелей, глинистых известняков и аргиллитов мощностью от первых до 50 м;

– терригенно-карбонатная толща (ТКТ), мощностью до 170 м, представленная мергелями, глинистыми загипсованными известняками с прослоями песчаников, алевролитов и карбонатных глин;

– соляно-мергельная толща (СМТ), мощностью до 100 м, сложенная мергелями с прослоями известняков, известковистых глин и гипса, включающая до семи пластов каменной соли, мощностью до 3 м;

– соляная толща (СТ), общей мощностью до 600 м, состоящая из мощных горизонтов каменной соли, вмещающих пласты калийных солей сильвинита и карналлита мощностью от 0.5 до 5.5 м, которые разрабатываются камерным способом, формирующим целые блоки камер, имеющих большие объемы (тыс. и млн  $m^3$ ).

В кровле слоистой соляной толщи залегает покровный пласт каменной соли мощностью до 20 м, перекрывающий залежь калийных солей мощностью до 60 м. Наиболее мощный пласт (до 5.5 м) калийной соли – сильвинита (Красный II), подстилается толщей каменной соли мощностью до 340 м.

Нижняя необводненная часть соляно-мергельной толщи и покровный пласт каменной соли общей мощностью до 100 м являются водозащитной толщей по отношению к продуктивной толще калийных солей.

В надсоляной толще с поверхности до глубины до 80–90 м развиты процессы гипергенеза, разгрузки напряжений, трещинообразования и развития карста в условиях высоко агрессивной среды. Особенности геологического разреза выбранного участка исследований и обобщенные показатели физико-механических свойств горных пород приведены в статье [4, с. 52, таблица]. 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 различным литературным источникам [2, 3, 5 и др.].

### ГЕОМЕХАНИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ГЕОЛОГИЧЕСКОЙ СРЕДЫ

С учетом физико-механических свойств горных пород и требования выполнения условий геометрического и физического подобия разработана геомеханическая модель геологической среды моделируемого участка месторождения. На основе геомеханической модели для задач численного моделирования влияния способа отработки калийной залежи на структуру и величины полей напряжений и деформаций в подрабатываемой надсоляной толще пород составлена конечного-элементная расчетная схема.

В натуральных условиях разрабатываемые продуктивные слои калийных солей залегают на глубинах от 180 до 350 м, а вызванные их отработкой деформации (мульды сдвигания и провалы) формируются на земной поверхности. Это означает, что изменения НДС пород затрагивают очень большие массивы пород.

При выполнении численных расчетов приняты следующие граничные условия:

– подземные выработки (камеры) создавались на одном уровне на глубине 265 м;

– размеры камер арочного профиля составляли: ширина и высота камер, соответственно, 13 и 15 м, ширина поддерживающих межкамерных цилиндров 10 м;

– 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); размеры расчетной

области модели значительно превышали размеры моделируемого подрабатываемого участка, что дополнительно обеспечивало соблюдение граничных условий на вертикальных границах моделируемого участка;

– на подошве расчетной области, на глубине около 1 км – запрет на перемещения по всем направлениям.

Скальные породы и соляные пласты моделировались с использованием модели Хоека–Брауна [7], а дисперсные породы – с использованием идеально-упругопластической модели Друкера–Прагера [8]. При этом информация о строении и физико-механических свойствах горных пород в пределах выделенных инженерно-геологических слоев распространялась на всю расчетную область. Численное моделирование осуществлялось в 2D-постановке (в условиях плоской деформации). Расчетная модель включала в себя массив горных пород с размерами основания ~9900 м. Рассматриваемая область аппроксимировалась четырехугольными элементами второго порядка (4 узла в углах + 4 узла на сторонах элемента).

В геомеханических расчетах принималось, что основное естественное напряженное состояние пород надсоляной толщи литостатическое (вертикальное напряжение  $\sigma_y^0 = \gamma H$ , горизонтальное  $\sigma_x^0 = \frac{\nu \gamma H}{1 - \nu}$ , где  $\nu$  – коэффициент Пуассона), а в интервале соляной толщи – гидростатическое  $\sigma_x^0 = \sigma_y^0 = \gamma H$  [2, 4, 6].

Модельные исследования проводились поэтапно. Сначала определялось начальное НДС массивов пород, обусловленное силами гравитации и исходным геологическим строением выбранного участка. Затем моделировалось изменение НДС массивов пород при последовательном создании от одной до тринадцати подземных камер в толще калийной залежи. При этом напряжения и деформации, рассчитанные на предыдущей стадии, рассматривались в качестве исходных для последующей стадии. Численная реализация расчетной схемы проводилась по стандартному алгоритму метода конечных элементов.

## РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Выполненные модельные исследования позволили качественно и количественно охарактеризовать основные закономерности изменений структуры полей напряжений и деформаций в массивах пород соляной и надсоляной толщ при сооружении горных выработок.

1. При строительстве блока подземных камер, расположенных рядом на одной глубине, в подра-

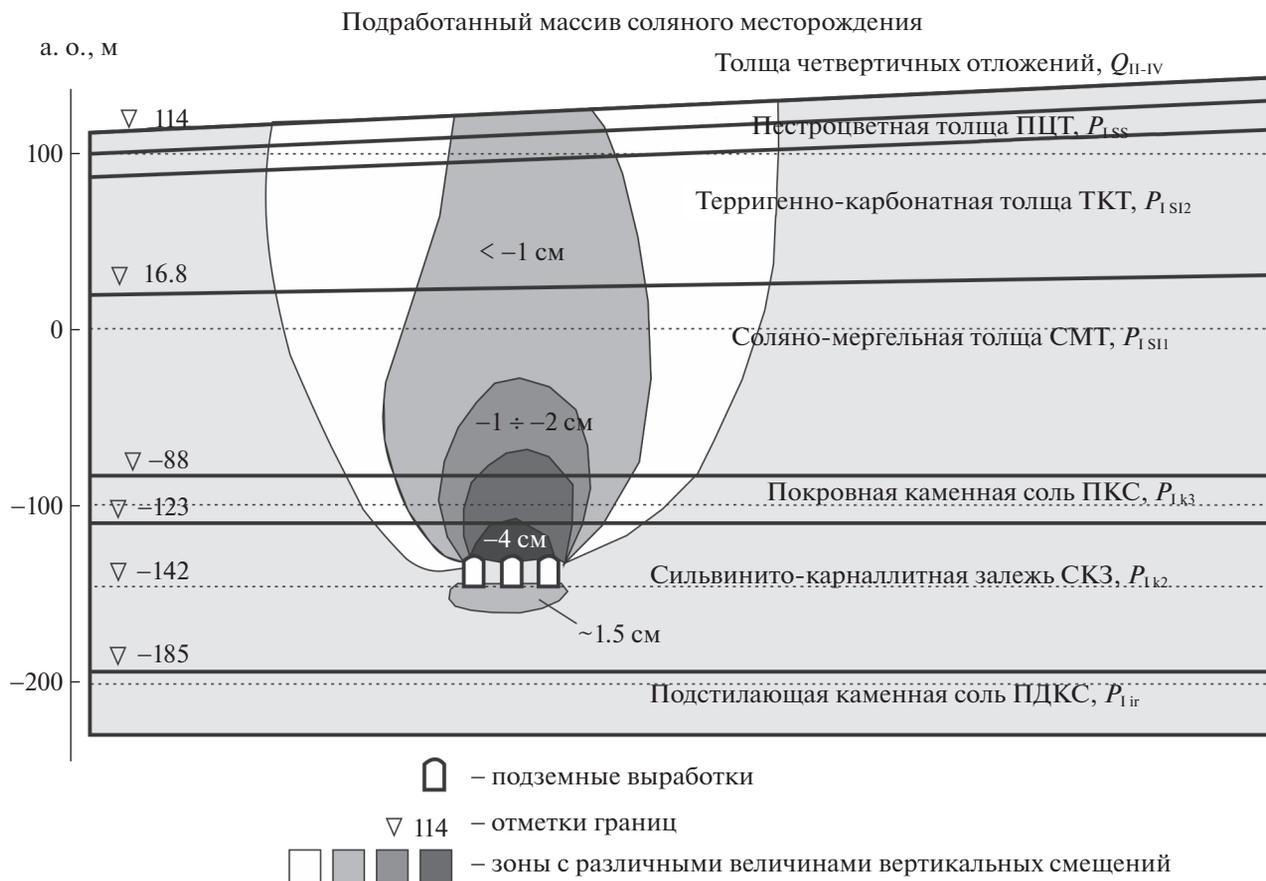
батываемой толще пород происходит изменение структуры полей напряжений и деформаций, а также их абсолютных значений. Ниже рассмотрены изменения, преимущественно, вертикальных деформаций в надсоляной толще пород.

При создании одной и двух камер в толще вышележащих пород, примыкающей к сводовой части камер, формируются эллипсовидные области разгрузочных напряжений и деформаций небольшой величины. Размеры этих областей в несколько раз превышают размеры выработок и могут достигать в высоту 80–85 м, а в ширину 110–115 м. При этом в основании камер формируется зона небольших растягивающих напряжений и деформаций и изгибающих моментов.

При строительстве 3-х камер их общая область вертикальных деформаций значительно увеличивается в высоту, достигая поверхности земли (250 м), и в ширину до 160 м. При этом непосредственно над сводами камер формируются дополнительные эллипсовидные (реже шаровидные) зоны с более высокими значениями вертикальных напряжений и деформаций. Зона растягивающих напряжений и небольших деформаций, расположенная ниже пола камер увеличивается по глубине и ширине до, соответственно, 40 и 75 м (рис. 1).

При создании в модели блока из 4–8 камер в надсоляной толще пород наблюдается формирование единого свода значительных по величине вертикальных напряжений и деформаций, верхняя граница которого может достигать земной поверхности (рис. 2). В пределах единого свода устанавливаются куполообразные зоны с разными значениями вертикальных напряжений и деформаций, абсолютные величины которых возрастают по мере увеличения количества камер и приближения к контурам выработок.

При создании панели подземных камер, состоящей из 9–13 камер, шириной, соответственно, от 170 до 250 м, от ее границ к дневной поверхности формируется область перевернутой трапецевидной формы, в пределах которой вертикальные деформации достигают десятков сантиметров, формируются мульды сдвига, и при дополнительных условиях, а именно, высокой трещиноватости и обводненности пород, возникают условия для образования провалов (рис. 3). Ширина данной области деформаций на поверхности земли (основание перевернутой трапеции) может быть в 3 и более раз больше ширины панели камер. Субвертикальные границы зон с разными значениями вертикальных напряжений и деформаций сохраняются лишь несколько видоизменяясь (сужаясь или расширяясь) на границах толщ пород разного литологического состава. Это означает, что ширина и форма границ трапе-



**Рис. 1.** Структура области вертикальных деформаций подработанной толщи пород при малом количестве подземных выработок (3 камеры).

цевидной области деформаций по глубине разреза зависит от состава и свойств вмещающих пород.

2. Результатами моделирования определено, что последовательное увеличение количества подземных выработок, расположенных на одном уровне, приводит к увеличению абсолютных значений вертикальных деформаций, формирующихся на одной глубине. Например, на глубине залегания кровли слоя покровной каменной соли (ПКС,  $P_{1k3}$ ) при строительстве 3-х подземных камер значения возможных вертикальных деформаций составляют 2–4 см; при сооружении блока из 4–8 камер величины возможных деформаций увеличиваются до 11–14 см, а при создании панели подземных выработок из 13 камер вертикальные деформации могут достигать 20 см. Эта закономерность и при других значениях вертикальных деформаций прослеживается по всему разрезу надсоляной толщи.

3. Расчетами установлено значительное увеличение интенсивности касательных напряжений в массиве пород при увеличении в нем количества горных выработок, что существенно влияет на их устойчивость.

4. На общую устойчивость горных выработок определяющее влияние оказывают состав, состояние и физико-механические свойства пород, слагающих кровлю выработок и межкамерные целики, в которых возможно формирование трещин скола, а также наличие зон крупных тектонических нарушений с повышенной трещиноватостью и ослабленными свойствами пород. Ширина зон влияния отдельных крупных тектонических нарушений по данным моделирования может достигать от первых десятков до 200 м.

Все случившиеся на территории СБГПА провалы, а именно: провал 1986 г. на руднике БКПРУ-3; провалы 2007, 2010, 2011 и 2015 гг. на руднике БКПРУ-1; провал 2014 г. на руднике СКРУ-2, происходили в толщах терригенно-карбонатных пород, в зонах влияния крупных тектонических нарушений и имели глубину 80–90 м. Отметим, что шахтные выработки располагались на значительно больших глубинах: 180–350 м. Нижняя граница зоны гипергенеза коренных пород по данным бурения и геофизики располагается также на глубинах 80–90 м. Ниже залегают относительно сохраненные, менее выветрелые и трещиноватые породы.

5. Установленные при численном моделировании расчетные величины деформаций и размеры

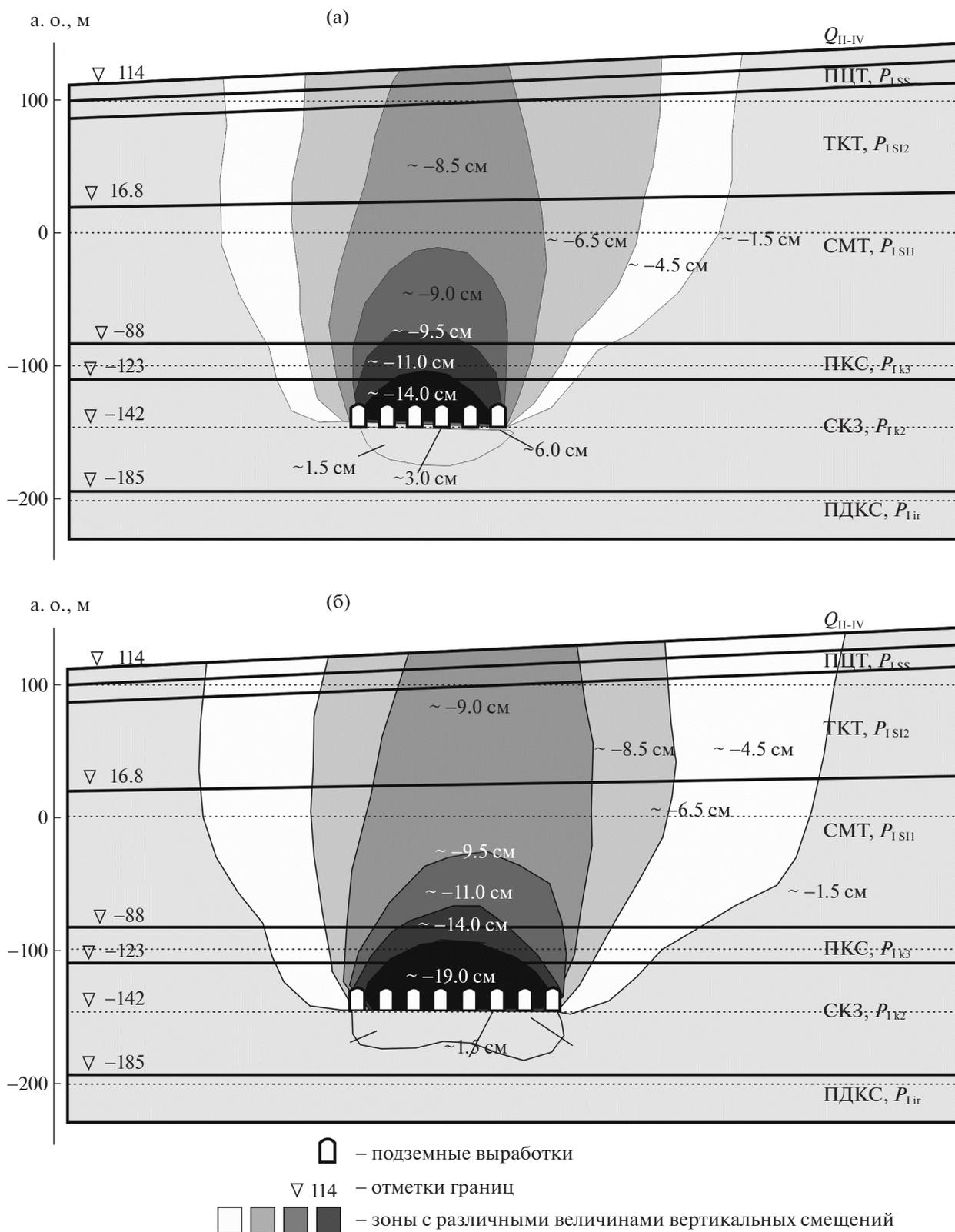


Рис. 2. Зональность общего свода напряжений и вертикальных деформаций в подработанной толще пород при количестве подземных выработок: а – 6 камер; б – 8 камер.

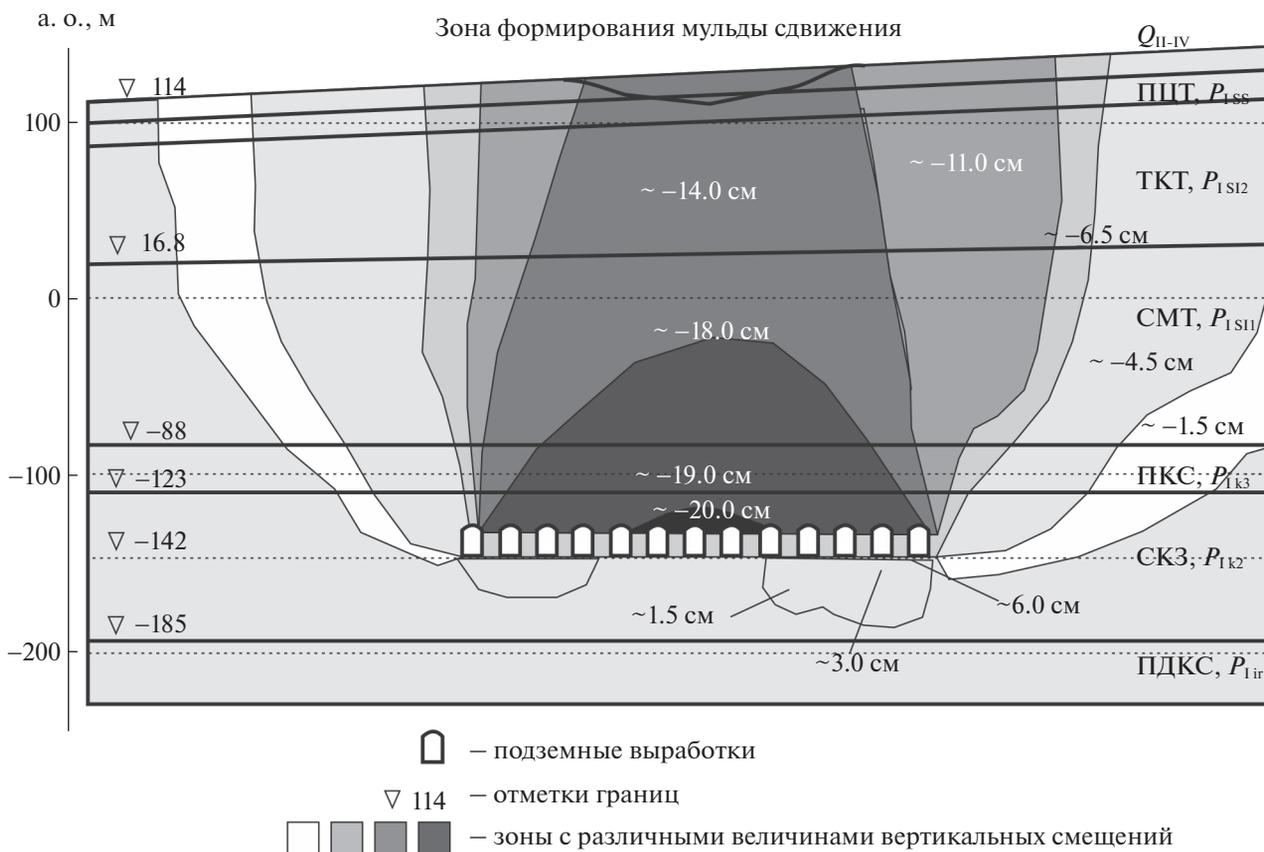


Рис. 3. Структура области вертикальных деформаций в подработанной толще пород при большом количестве подземных выработок (13 камер).

зон изменения напряженно-деформированного состояния массивов пород, получены на расчетных схемах, в которые закладывались 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 освоении подземного пространства (десятки лет) и, следовательно, длительном воздействии напряжений происходит постепенное значительное снижение прочности горных пород, характеризуемое понятием “длительной прочности”, показатели которой всегда значительно меньше стандартной прочности. При учете в моделях реологических свойств пород, которые характеризуют 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 (примерно, на порядок) больше. По данным натурных наблюдений на земной поверхности они достигают 4–5 м [1, 6].

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Над подземными горными выработками большой площади и объема (панели камер) формируются объемные зоны измененного НДС горных пород, в пределах которых напряжения меняются с сжимающих (геостатических) на растягивающие, действующие, в том числе, вблизи дневной поверхности и контуров подземных выработок. При деформировании и разрушении горных пород вокруг выработок вместе с развитием трещин меняются деформационные характеристики массива пород, включающего участки относительно сохранных блоков горных пород и зоны нарушений. Развитие деформаций в этих зонах приводит к формированию куполов обрушения над выработками. При этажном (друг над другом) расположении подземных камер могут развиваться весьма сложные зоны разрушений в массивах горных пород, которые могут достигать земной поверхности, образуя участки оседаний и провалы [1].

Полученные результаты модельных исследований важны для прогнозирования опасных процессов и планирования необходимых защитных мер на подрабатываемых территориях горнодобывающих предприятий.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Борзаковский Б.А., Марakov В.Е., Теннисон Л.О. Прогноз негативного влияния затопления рудника БКПРУ-1 ОАО "Уралкалий" на городскую и промышленную застройку г. Березники. // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2009. № 7. С. 381–396.
2. Виттке В. Механика скальных пород. М.: Недра, 1990.
3. Власов С.Н., Маковский А.В., Меркин В.Е. и др. Аварийные ситуации при строительстве и эксплуатации транспортных тоннелей и метрополитенов. М.: ТИМР, 2000. 195 с.
4. Мамаев Ю.А., Власов А.Н., Мнушкин М.Г., Ястребов А.А. Изучение напряженного состояния и механизма деформирования массивов горных пород при образовании природно-техногенных карстовых провалов // Геоэкология. 2019. № 1. С. 46–59.
5. Оловянный А.Г. Некоторые задачи механики массивов горных пород. СПб.: Стресс, 2003. 234 с.
6. Осипов В.И., Барях А.А., Санфиоров И.А., Мамаев Ю.А., Ястребов А.А. Карстовая опасность при затоплении калийного рудника в г. Березники Пермского края Российской Федерации // Геоэкология. 2014. № 4. С. 356–361.
7. Hoek E., Carranza-Torres C.T., Corkum B. Hoek-Brown failure criterion – 2002 edition // Proc. of the 5th North American Rock Mechanics Symposium, Toronto, Canada. V. 1. 2002. P. 267–273.
8. Drucker D.C., Prager W. Soil mechanics and plastic analysis or limit design // Quarterly of Applied Mathematics. 1952. V. 10. № 2. P. 157–165.

## CHANGING STRUCTURE OF DEFORMATION AREA OF UNDERMINED ROCK LAYER UPON ONE-LAYER MULTICHAMBER MINING OF SALT DEPOSIT

Yu. A. Mamaev<sup>a,#</sup>, A. N. Vlasov<sup>b,##</sup>, M. G. Mnushkin<sup>a</sup>, and P. V. Stol'nikova<sup>a</sup>

<sup>a</sup> Sergeev Institute of Environmental Geoscience RAS, Ulanskii pr., 13, bld. 2, Moscow, 101000 Russia

<sup>b</sup> Institute of Applied Mechanics RAS, Leningradskii pr., 7, Moscow, 125040 Russia

<sup>#</sup>E-mail: mamaev47ya@mail.ru

<sup>##</sup>E-mail: iam@iam.ras.ru

The paper presents the results of mathematical simulation of variation in the stress-strain state and the deformation area structure in the undermined rock layer upon the successive multi-chamber mining of the salt layer at the Verkhnekamskoe potassium deposit (VKMKS) within the territory of Solikamsk-Berezniki urban industrial agglomeration (SBGPA). The methodical specifics in the development of geomechanical model and compilation of finite-element calculation scheme are provided with choosing calculation parameters of rock properties and boundary conditions of the calculation area. The peculiar features and parameters of deformation zone structure variation in the undermined rock massif of the above-salt layer are described for the construction of a single chamber and a number of neighbor chambers at the same depth. The research results are important for prediction of hazardous processes and adoption of protective measures at the affected areas.

**Keywords:** potassium salt deposit, engineering geological conditions, stress-strain state, rock massif deformation, undermined massif, mathematical simulation

## REFERENCES

1. Borzakovskii, B.A., Marakov, V.E., Tennison, L.O. *Prognoz negativnogo vliyaniya zatopeniya rudnika BKP-RU-1 ОАО "Uralkalii" na gorodskuyu i promyshlennuyu zastroiku g. Berezniki* [Prediction of negative influence of flooding Uralkalii Public Co. BKP-RU-1 mine on the urban and industrial buildings in the town of Berezniki]. *Gornyi informatsionno-analiticheskiy byulleten*, 2009, no. 7, pp. 381–396. (in Russian)
2. Vittke, V. *Mekhanika skal'nykh porod* [Hard rock mechanics]. Moscow, Nedra Publ., 1990. (in Russian)
3. Vlasov, S.N., Makovskii, A.V., Merkin V.E., et al. *Avariynye situatsii pri stroitel'stve i ekspluatatsii transportnykh tonnelei i metropolitenov* [Emergencies in construction and operation of transport tunnels and metro]. Moscow, TIMR Publ., 2000, 195 p. (in Russian)
4. Mamaev, Yu.A., Vlasov, A.N., Mnushkin, M.G., Yastrebov A.A. *Izuchenie napryazhennogo sostoyaniya i mekhanizma deformirovaniya massivov gornykh porod pri obrazovanii prirodno-tekhnogennykh karstovykh provalov* [The study of stress state and the deformation mechanism of rock massifs upon the formation of natural-technogenic karst collapses]. *Geoekologiya*, 2019, no. 1, pp. 46–59. (in Russian)
5. Olovyanyni, A.G., *Nekotorye zadachi mekhaniki massivov gornykh porod* [Some tasks in rock massif mechanics]. St. Petersburg, Stress Publ., 2003, 234 p. (in Russian)
6. Osipov, V.I., Baryakh, A.A., Sanfirov, I.A., Mamaev, Yu.A., Yastrebov, A.A. *Karstovaya opasnost' pri zatopenii kalinyogo rudnika v g. Berezniki Permskogo kraya Rossiiskoi Federatsii* [Karst hazard upon flooding the potassium mine in the town of Berezniki, Perm krai, the Russian Federation]. *Geoekologiya*, 2014, no. 4, pp. 356–361. (in Russian)
7. Hoek, E., Carranza-Torres, C.T., Corkum, B. Hoek-Brown failure criterion – 2002 edition. *Proc. of the 5th North American Rock Mechanics Symposium*, Toronto, Canada. Vol. 1. 2002. pp. 267–273.
8. Drucker, D.C., Prager, W. Soil mechanics and plastic analysis or limit design. *Quarterly of Applied Mathematics*, 1952, vol.10, no 2, pp. 157–165.