УДК 621.039

ГОРНО-ГЕОМЕХАНИЧЕСКИЙ ПРОГНОЗ РАЗМЕЩЕНИЯ ОТХОДОВ В ГОРНЫХ ВЫРАБОТКАХ, В ТОМ ЧИСЛЕ В СЕЙСМООПАСНЫХ РАЙОНАХ ДОБЫЧИ СЫРЬЯ

О.В.КОВАЛЕВ, *д-р техн. наук, профессор, spggi4@mail.ru*
Национальный минерально-сырьевой университет «Горный», Санкт-Петербург, Россия

В статье рассмотрены вопросы получения представительных научно обоснованных данных, позволяющих установить параметры необходимо безопасного состояния массива горных пород (МГП) в зонах захоронения в подземных выработках различных отходов, включая и области МГП, подверженные сейсмоактивному воздействию. Описаны основные требования к подземным сооружениям для захоронения опасных отходов и технологии их возведения. В качестве объекта исследований выбраны камеры подземного растворения в галогенной толще горных пород. Отмечены необходимые данные для обоснования безопасных условий захоронения отходов в подземной камере выщелачивания и этапы выполнения такого обоснования. Проведена оценка напряженно-деформированного состояния горных пород методом граничных элементов. Рассмотрены основные аспекты динамического влияния сейсмических волн на устойчивость подземных сооружений. Пересчитаны основные значимые параметры возможного сейсмического воздействия на экспериментальную камеру с учетом данных о сейсмическом районировании региона и конкретного расположения объекта исследований. Обоснована необходимость выполнения оценки сдвижения налегающей толщи и поверхности в зоне опытного участка на базе рассмотренного комплексного подхода: анализов данных маркшейдерских наблюдений и результатов геомеханического обследования механического состояния вмещающей и налегающей толщи.

Ключевые слова: подземное растворение солей, захоронение отходов, сейсмика, геодинамика, метод разрывных смещений, метод граничных элементов, напряженно-деформированное состояние, импеданс среды.

Захоронение промышленных отходов, в частности радиоактивных, в подземных выработках требует обеспечения в окрестности условий гидрогеодинамической автономии вмещающего массива. Данному требованию значимо соответствуют галогенные толщи пород, позволяющие вмещать комплекс выработок, в том числе и предусматриваемых для захоронения. Указанные толщи характерны для соляных месторождений, в частности для каменно-солевых. Анализ данных о специфических свойствах соляных пород [8, 17] позволяет рекомендовать месторождения, где ведется добыча этого сырья, к использованию в качестве хранилищ отходов. Добыча полезного ископаемого при этом может реализовываться по технологии, наиболее отвечающей требованиям обеспечения безопасности окружающей среды при захоронении отходов, – технологии подземного растворения солей (ПРС). Залежи каменной соли, добываемой методом ПРС, приурочены, в частности, к району Прибайкалья, где данной технологии отвечают как геологические условия, так и инфраструктура региона.

Рассмотрение поставленной в работе задачи наиболее целесообразно осуществить на конкретном примере: условия добычи солей на рассолопромысле ОАО «Усольехимпром» (Усольский промузел).

План-схема расположения камер выщелачивания (технология ПРС) для данного промысла приведена на рис.1, *а*, схема расположения этих скважин в толще МГП – на рис.1, *б*. Отметим, что камера «р-2х» принята как камера опытной установки (ОУ) для размещения отходов.

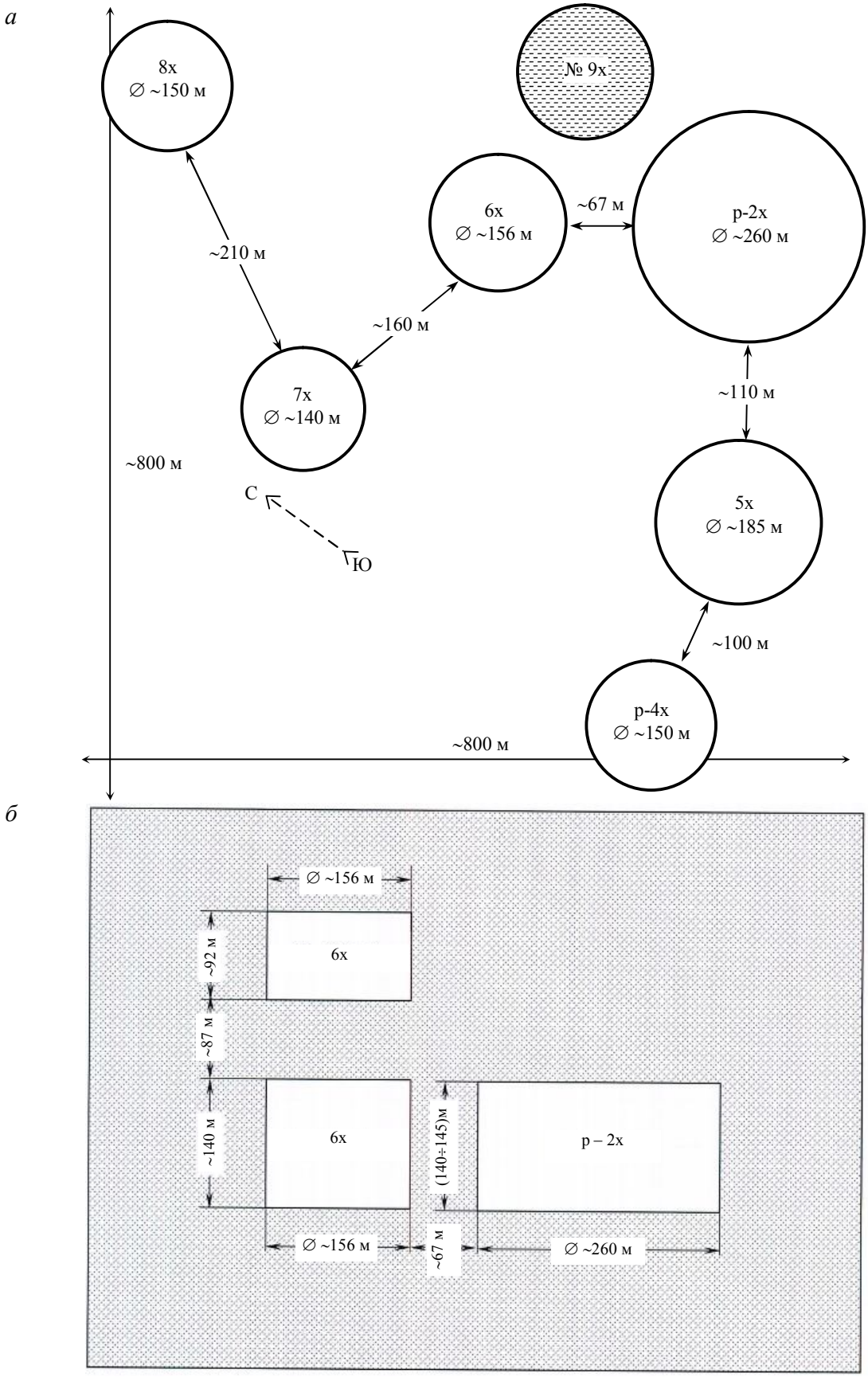


Рис.1. Расположение камер выщелачивания на рассолопромысле: *а* – план-схема расположения камер; *б* – расположение камер «6х» и «р-2х» в толще МГП

Для данного участка с целью обоснования надежно-безопасных условий эксплуатации камеры «р-2х» необходимо: получить научно обоснованные данные, определяющие параметры состояния земной поверхности в данной зоне; выполнить оценку устойчивого (неустойчивого) состояния междукамерных целиков в окрестности ОУ; установить влияние сейсмоактивности региона на указанные аспекты. Предварительно выполняется изучение и научное обобщение геологической информации об объекте исследования; данных о горно-геомеханических параметрах указанной среды и подземных сооружений; сведений о сейсмоактивности региона в рамках влияния геостатического и геодинамического полей напряжений на формирование механического состояния пород в окрестности камеры «р-2х».

Решение целевых вопросов требует разработки специального комплексного метода. Сутью его является подход, параллельно использующий и обобщающий данные как маркшейдерской информации о сдвижении поверхности в зоне горных работ (рис.1, *а*), так и результаты геомеханической оценки состояния МГП, вмещающего камеры выщелачивания. При этом анализ последних результатов должен учитывать изменения в массиве компонентов напряжений (σ_{ij}), деформаций (ε_{ij}) и перемещений (δ_i). Компоненты оцениваются в рамках влияния геостатических и геодинамических полей, характерных для данного региона.

Обычно на ряде площадок рассолопромыслов недостаточно данных о маркшейдерских наблюдениях. Это же характерно и для принятого к рассмотрению участка. Решение вопроса в этом (достаточно имеющем место) случае реализуется включением в рассмотренный комплексный метод выполнения исследований по принципу «аналогового подхода». В частности, сопоставление данных геологических и горно-геомеханических параметров данного участка (скв.«р-2х») для рассолопромысла АО «Сода» (Яр-Бишкадакское месторождение солей) показало достаточно адекватное соответствие отмеченных характеристик в обоих случаях.

Необходимой составной частью комплексного метода является решение горно-геомеханических задач по оценке параметров проявлений геостатического поля напряжений в окрестности камеры ОУ. Проведенный анализ [11, 13 и др.] показал, что вариант численного метода граничных элементов (МГЭ), а именно – метода разрывных смещений (МРС) – позволяет дать необходимую количественную оценку компонентов всех параметров, определяющих напряженно-деформированное состояние (НДС) массива в окрестности ОУ. Данная оценка включает получение информации об указанном НДС пород, в частности, и с учетом геометрических соотношений камер выщелачивания в окрестности ОУ и их пространственного расположения. Методически предусматривается оценка механического состояния МГП на участке для экстремально-неблагоприятного сочетания условий эксплуатации камеры «р-2х» при размещении в ней промышленных отходов.

Нами обобщены данные, необходимые для дальнейшей оценки НДС-пород в окрестности скв.«р-2х» (ОУ), о геологическом строении МГП, его механических свойствах и сейсмоактивности рассматриваемого региона.

Данные по первому аспекту (геологическому) принимаются по характерным профилям рассматриваемых скважин и геологическим разрезам в их окрестностях (рис.1). В частности, камеры выщелачивания располагаются (в среднем) на глубинах от ~ –1040 м до ~ –1420 м. При этом колебания мощностей пластов каменной соли может в среднем составлять от ~ 10÷15 до ~ 65÷85 м. Пласты каменной соли могут содержать прослои (пачки) несолевых пород. Обычно это доломиты, мергели, мергелистые доломиты, доломиты засоленные и др. Залегание пластов горизонтальное ~1°. В целом можно констатировать, что в гидрогеодинамическом отношении галогенная формация отвечает условиям ее «автономии» – без наличия гидрообмена между ней и вмещающими ее породами.

Анализ рассмотренной геологической информации позволяет оценить данный МГП как массив с преобладающей упорядоченной трещиноватостью, обусловленной выраженно-горизонтальной слоистостью, на базе чего размеры его структурных элементов по мощности (средневзвешенные их характеристики) $m_{\text{ср.в.}} \approx 1$ м. В геомеханическом аспекте данная зона

МГП может характеризоваться как среда квазисплошная, для которой размер исследуемой области (L) превышает величины [2]: $L \approx 10m_{ср.в} / \varepsilon^2 \approx 445$ м, где ε – параметр взаимосвязи отклонения напряжений на элементарной площадке ($10m_{ср.в}$) и относительного размера этой площадки ($\varepsilon \approx 0{,}15$). Это не противоречит возможности использования методов механики сплошной среды для оценки горно-геомеханических ситуаций, возникающих при влиянии параметров геостатических (геодинамических) полей в многосвязной области МГП в окрестности рассматриваемого комплекса камер (включая, как очевидно, камеру «р-2х»).

Рассмотрим механические свойства МГП в исследуемой зоне, необходимые для оценки в ней параметров НДС-массива. Это касается данных о деформационных и прочностных его свойствах. Полученные в лабораторных условиях данные пересчитываются (по известным методикам [15]) применительно к исследуемой области МГП, далее определяются средние значения для отдельных литотипов составляющих его пород. Результаты можно использовать для «аналоговых» соляных месторождений. Для пачек выделенных пород в МГП механические свойства определялись как средневзвешенные характеристики. В рассматриваемой зоне скважин (рис.1, *а*) они составили: для каменной соли $\sigma^{м}_{сж} \approx 12$ МПа, $\sigma^{м}_{р} \approx 0{,}6$ МПа; для несолевых пород (превалирующе доломитов) $\sigma^{м}_{сж} \approx 34$ МПа, $\sigma^{м}_{р} \approx 1{,}5$ МПа. Очевидно, что при выполнении указанной оценки механического состояния МГП в данной зоне необходима и информация о предельных значениях деформаций, которые составили для НДС сжатия $\varepsilon^{t} \approx 0{,}4$, а в зонах растягивающих напряжений – $\varepsilon^{t} \approx 0{,}01$. Отметим, что в условиях воздействия на горные породы кратковременных нагрузок (например, от упругих волн), породы будут разрушаться при напряжении в 2 раза больше, чем статический их предел прочности при растяжении [$\sigma_р$] [12]. Для горно-геомеханической оценки механического состояния МГП (в исследуемой зоне) необходимы данные о его деформационных свойствах (рис.2).

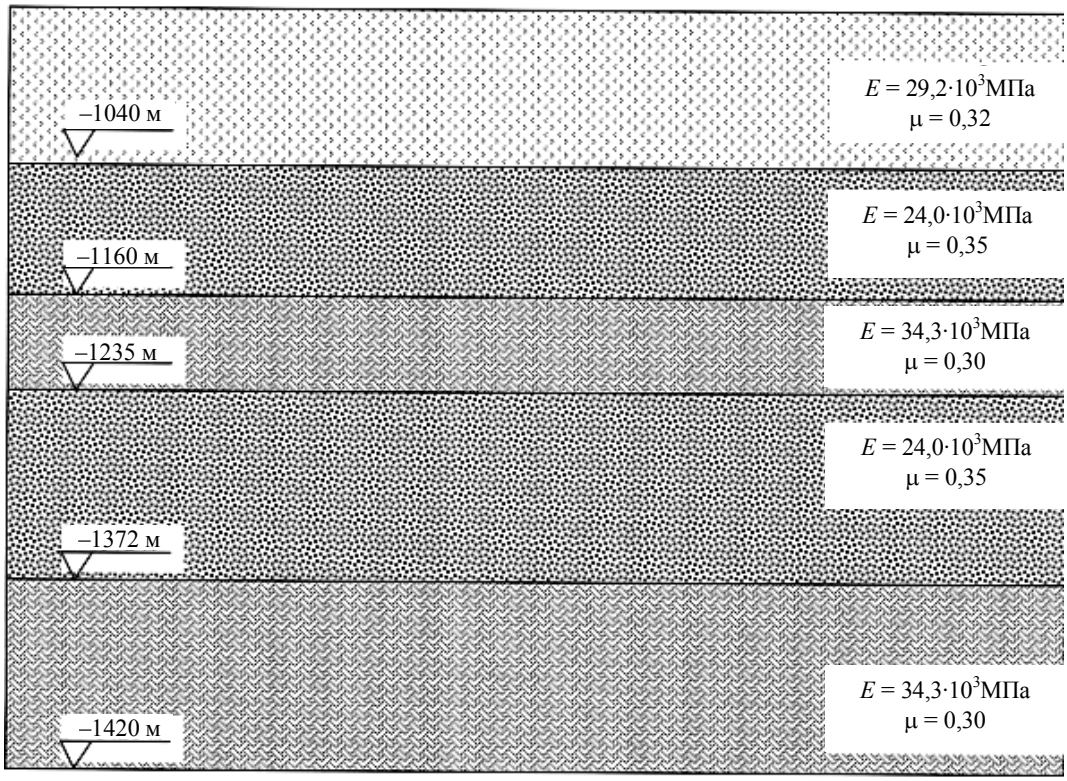


Рис.2. Структурно-геомеханическая схема исследуемой области массива в условиях рассолопромысла ОАО «Усольехимпром»

E –модуль деформаций; μ – коэффициент Пуассона

По данным анализа «Карт общего сейсмического районирования территории РФ» (ОСР-97), Усольский промузел находится в зоне с вероятной интенсивностью землетрясений в 8-9 баллов по шкале MSK-64. По имеющимся данным о колебании частиц грунта скорости перемещений его частиц ($\dot{x}$) могут составлять $\sim 24 \le \dot{x} \le \sim 48$ мм/с. В этих условиях возможный очаг землетрясения (ВОЗ), находящийся от ОУ на расстоянии ~100 км и имеющий гипоцентр на глубине ~15-20 км, может обусловить величину магнитуды ~8. Последнее предопределяет энергию землетрясения $\sim 6{,}3 \cdot 10^{16}$ Дж [6]. Напомним, что от гипоцентра ВОЗ распространяются продольные (*P*) и поперечные (*S*) волны, а от эпицентра – поверхностные волны (Рэлея и Лява). Установленные на базе зависимостей ([4, 7, 8, 16 и др.] для рассматриваемой среды скорости распространения компонентов сейсмоволн составят $V_P \approx 4$ м/с и $V_S \approx 2{,}8$ м/с (для волн Рэлея, например, $V_R \approx 2{,}5$ м/с).

Условие прохождения сейсмоволн на границе двух сред (массив – камера выщелачивания) характеризуется параметром акустической жесткости (импеданс среды), т.е. ρc (ρ – плотность среды; c – скорость распространения волны). Для *P*-волн в каменно-солевом МГП ($\gamma \approx 2000$ кг/м^3) импеданс составит ~ 10 кг·с/см^3. Отметим, что на расстоянии от гипоцентра ~ 100 км *P*-волны могут рассматриваться как плоские. Этот момент характерен и для рассматриваемой ОУ.

Обобщая данные о геологических и горных сейсмопараметрах в данном регионе (в зоне ОУ) отметим, что рассматриваемый массив – в феноменологическом аспекте – отвечает структурной схеме (рис.2), позволяющей считать, что формирующие его характерные пакеты соответствующих мощностей в целом могут классифицироваться как квазисплошная среда. Геометрия текстурных параметров слоистая при контактах типа $\tau \rightarrow \max$. Горно-технические условия эксплуатации подземных объектов (в данной задаче) отражены параметрами их пространственного взаимоположения в плане и во вмещающем МГП (см.рис.1, *а*, *б*).

В соответствии с представлениями [3, 7, 18 и др.] проявления сейсмодинамики недр в исследуемом объеме МГП носят вероятностный характер. Данное обстоятельство однозначно обусловливает целесообразность применения априорно-экстремального подхода к оценке роли динамического поля на устойчивость элементов массива в окрестности камер (естественно, и «р-2х»). Практически это и предопределяет принятие незатухающей передачи энергии объемных волн к исследуемому участку МГП, допуская в нем наличие 9-балльного уровня землетрясения и соответствующих возможных характеристик колебательного процесса: скорости колебания частиц пород ≤ 48 мм/с [5]; принятие *P*- и *S*-волн в качестве плоских волн; выполнение оценки процесса разрушения пород в элементах МГП по наименьшей из характерных для них величине пределов прочности (в частности, по прочности каменной соли при растяжении, поскольку $\sigma_{сж} > \tau_{ср} > \sigma_р$).

Выбор (обоснование) методов изучения геомеханического состояния МГП в окрестности ОУ по размещению отходов можно охарактеризовать результатами:

• маркшейдерских наблюдений за сдвижениями земной поверхности на рассматриваемой площади (рис.1, *а*);

• оценки геомеханического состояния элементов МГП в окрестности камеры «р-2х» и налегающей толщи вплоть до поверхности (рис.1, *а*, *б*), обусловленного действием гравитационного (геостатического) поля;

• оценки механического состояния МГП (в той же зоне!), определяемого действием геодинамического (сейсмического) силового поля.

Полученные результаты необходимо рассматривать комплексно при выполнении общей оценки устойчивого (неустойчивого) состояния элементов массива, вмещающего камеру размещения отходов.

Рассмотрим поставленные здесь вопросы, включая и собственно комплексный метод оценки геомеханического состояния элементов МГП, вмещающего камеры исследуемого участка (естественно, с камерой «р-2х»).

Оценим первоначально параметр η (в данном случае характеристика величин оседаний налегающей толщи – вплоть до поверхности – в функции времени $\eta = f(t)$) для условий принятого участка-аналога [1, 9, 10, 19 и др.] (рис.3). В настоящее время отсутствует какая-либо однозначная методика оценки сдвижения налегающей толщи и земной поверхности. Получаемые результаты не позволяют четко оценить состояние толщи горных пород в окрестности камер.

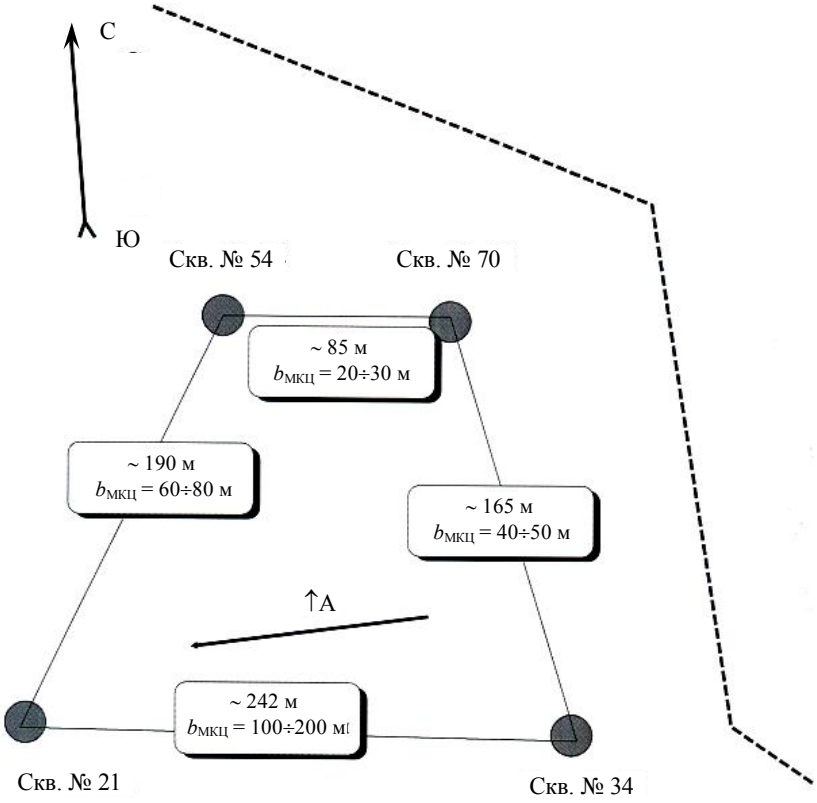


Рис.3. Схема расположения скважин на участке-аналоге Яр-Бишкадакского месторождения

А – направление роста оседаний η в сторону центра отрабатываемой в пределах горного отвода площади месторождения

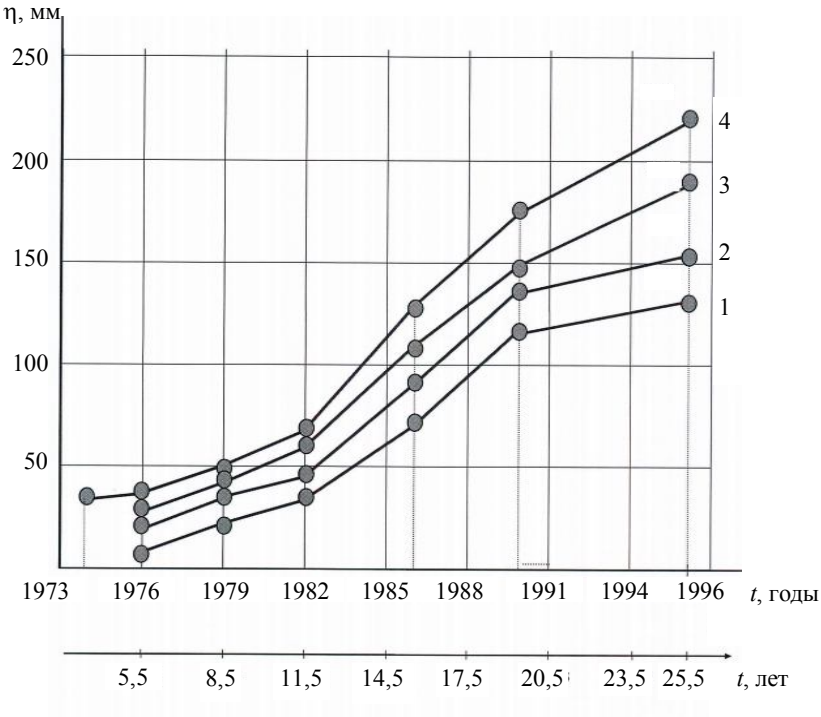


Рис.4. График зависимостей $\eta = f(t)$ нарастаний оседаний земной поверхности во времени с учетом условий ее подработки

1 – 131 мм; 2 – 150 мм; 3 – 190 мм; 4 – 222 мм

Дополняющим отмеченные условия и повышающим определенность однозначности оценок состояния толщи является использование геомеханического подхода для обстоятельного анализа компонентов полей σ_{ij}, ε_{ij} и δ_i с учетом варьирования как геометрии существующих подземных объектов (в том числе с их квазиразрушением, а также формирования новой геометрии подземных пространств), так и механических характеристик элементов вмещающего такие объекты МГП.

В связи с этим необходимо выполнять оценку сдвижения налегающей толщи и поверхности в зоне ОУ на базе рассмотренного комплексного подхода: анализов данных маркшейдерских наблюдений и результатов геомеханического обследования механического состояния вмещающей и налегающей толщи в зоне ОУ.

Результаты маркшейдерской оценки оседаний в зоне ОУ для участка-аналога (рис.3) позволили сделать следующие обобщения. Для участка-аналога получены данные ожидаемых оседаний поверхности с учетом методики [19], градаций оседаний на полные и сокращенные. Последние отвечают информационно-вероятным их значениям (рис.4) и позволяют получить регрессионную зависимость для инженерной оценки прогнозных величин η_p оседаний в зоне ОУ: $\eta_p = k_п[at^b\exp(-ct)]$, где $k_п$ – коэффициент перегрузки, корректирующий расчетные параметры относи-

тельно ожидаемых (по результатам наблюдений), $k_п \approx 1{,}2$; a, b, c – коэффициенты регрессии (для анализируемых условий соответственно 0,446; 2,63; 0,105). Следовательно, для ОУ $\eta_р \approx 0{,}54t^{2{,}63}\exp(-0{,}105t)$. Зависимости отвечают корреляционное отношение $\tau \approx 0{,}83$ и коэффициент надежности $\mu \approx 4{,}35$.

Отметим, что данная зависимость (рис. 4) отвечает условию $5{,}5 \le t \le 25{,}5$ лет. Принято, что к моменту $t \approx 5 \div 5{,}5$ лет, на участке ОУ известны реальные (по маркшейдерским замерам) наблюдения оседаний $\eta_ф$. Если этих данных нет, то они оцениваются как $\eta_{ф.ср} \approx 25$ мм. Следовательно, на предстоящий период до ~25 лет общие оседания $\eta_{\Sigma(25\ лет)} \approx \eta_р + \eta_ф$.

Учитывая постановку рассматриваемой задачи в целом, необходима оценка оседаний и на период более 25 лет, например до ~2050 г. Оседания, оцениваемые по зависимости для экстремально-возможных условий, $\eta_{\Sigma(>25\ лет)} \approx \eta_{\Sigma(\le 25\ лет)} + \dot{\eta} t_2$, где $\dot{\eta}$ – прогнозируемые скорости развития оседаний на период $t > 25$ лет. Для априори возможных (максимум-максиморум!) условий на участке-аналоге они составят $\dot{\eta} \approx 7{,}7$ мм/год (в конце 20-25-летнего отрезка времени).

Следовательно, априори оседания могут оцениваться соотношением $\eta_{\Sigma(25\ лет)} \approx \eta_{\Sigma(25\ лет)} + 7{,}7t_2$. Здесь t_2 – относительное время, т.е. с 2025 до 2050 г. (2025 г. – $t_2 = 0$, …, 2050 г. – $t_2 = 25$).

Таким образом, оценочные величины оседаний земной поверхности на участке ОУ – скв. «р-2х» могут составлять (при отсутствии данных о текущих оседаниях поверхности, т.е. при $\eta_ф = \eta_{ф.ср} \approx 25$ мм): на 2025 г. – $\eta_{\Sigma(\le 25\ лет)} \approx [0{,}54 \cdot 25^{2{,}63} \cdot \exp(-0{,}105 \cdot 25)] + 25 \approx 211$ мм, а на 2050 г. – экстремально ожидаемые – $\eta_{\Sigma(>25\ лет)} \approx 211 + 7{,}7 \cdot 25 \approx 404$ мм. Отметим, что наиболее вероятные (не экстремальные) для того же периода оседания $\eta_{\Sigma(>25\ лет)} \approx 211 + 2 \cdot 25 \approx$ ≈ 261 мм (в этом случае $\dot{\eta} \approx 2$ мм/год).

Обобщая данные результаты рассмотренных перемещений поверхности в зоне ОУ, получаем косвенное подтверждение наличия достаточно значимого затухающего процесса деформирования налегающей толщи пород в направлении от камер к поверхности. Соответственно, маловероятно ожидать развития здесь полнопрофильной (с наличием «плоского дна») мульды сдвижения.

Следует еще обратить внимание на необходимость проведения исследований НДС МГП в непосредственной зоне влияния выработанных подземных пространств (камер). С помощью методов механики сплошной среды можно досконально оценить возможную степень устойчивости (неустойчивости) элементов МГП в зоне ОУ, прежде всего в аспекте формируемого здесь геостатического поля напряжений в массиве, обладающем выраженной изотропией [11 и др.].

На базе приведенных выше данных (см.рис. 2) формируются горно-геомеханические модели (ГГМ) и расчетные схемы (РС) для соответствующих участков МГП, вмещающих подземные объекты (рис.1, *а*). Например, на рис.5 отражено расположение камер «р-2х», «5х» и «р-4х», характеризуемых их экстремально-замеренными габаритами (диаметр, высота). При заданных на ГГМ соответствующих граничных условиях – модели адекватно воспроизводят и расчетные схемы, предопределяющие выполнение численных оценок НДС МГП на базе упомянутого выше варианта метода ГЭ, – метода разрывных смещений (МРС) [11]. Решения могут быть реализованы в постановке «плоской деформации», что для данного МГП достаточно отвечает задачам квазиобъемного подхода в рассматриваемых условиях. В качестве примера выполняемых на базе МРС решений на рис.6 приведены результаты оценок компонентов полей δ_i для условий участка ОУ – поле компоненты V.

Рассмотрим вопросы оценки геодинамического (сейсмического) воздействия (в рамках комплексной оценки!) на параметры НДС горных пород в элементах МГП в пределах ОУ. Целесообразность (и надежность!) комплексного подхода покажем на примере получения достаточно сопоставимых результатов оценок величин прогнозируемых оседаний поверхности – параметров η и V, получаемых на базе численного решения методом МРС (см.рис.4 и 6): η ~225 мм (~211 < ~225 < ~261 мм), а оседание поверхности на участке ОУ V~450/2 = 225 мм.

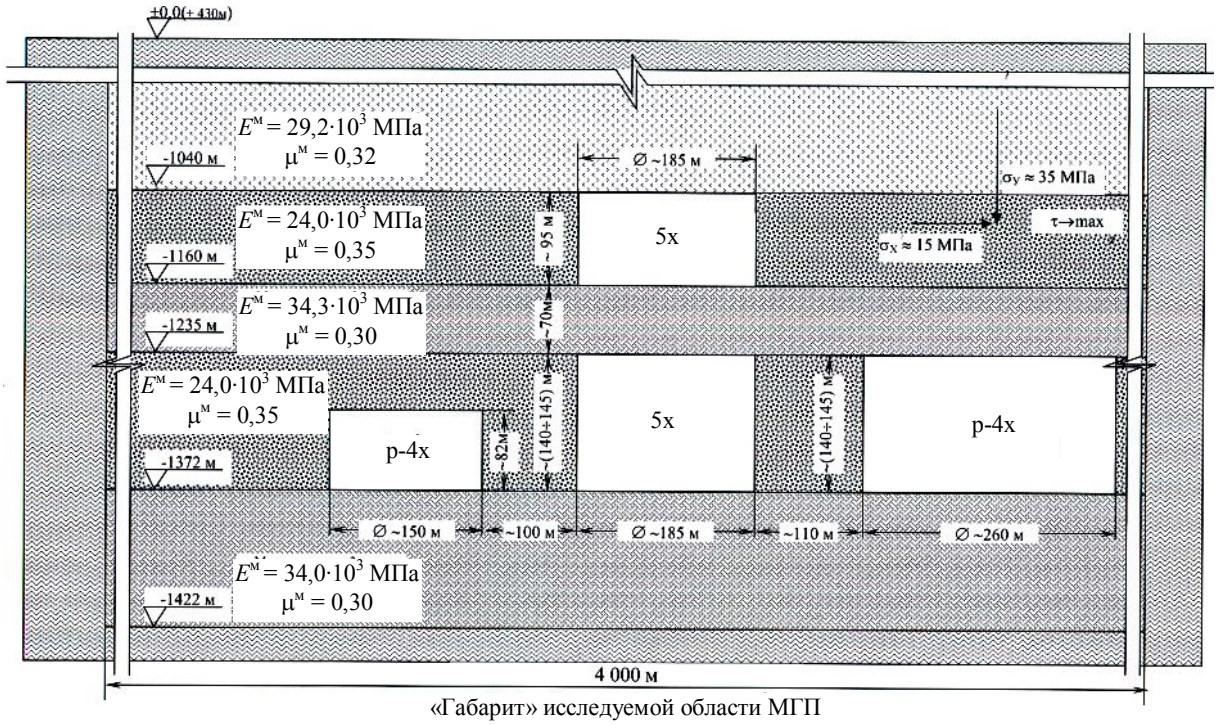


Рис.5. Модель МГП, вмещающего камеры «р-2х», «5х» и «р-4х»

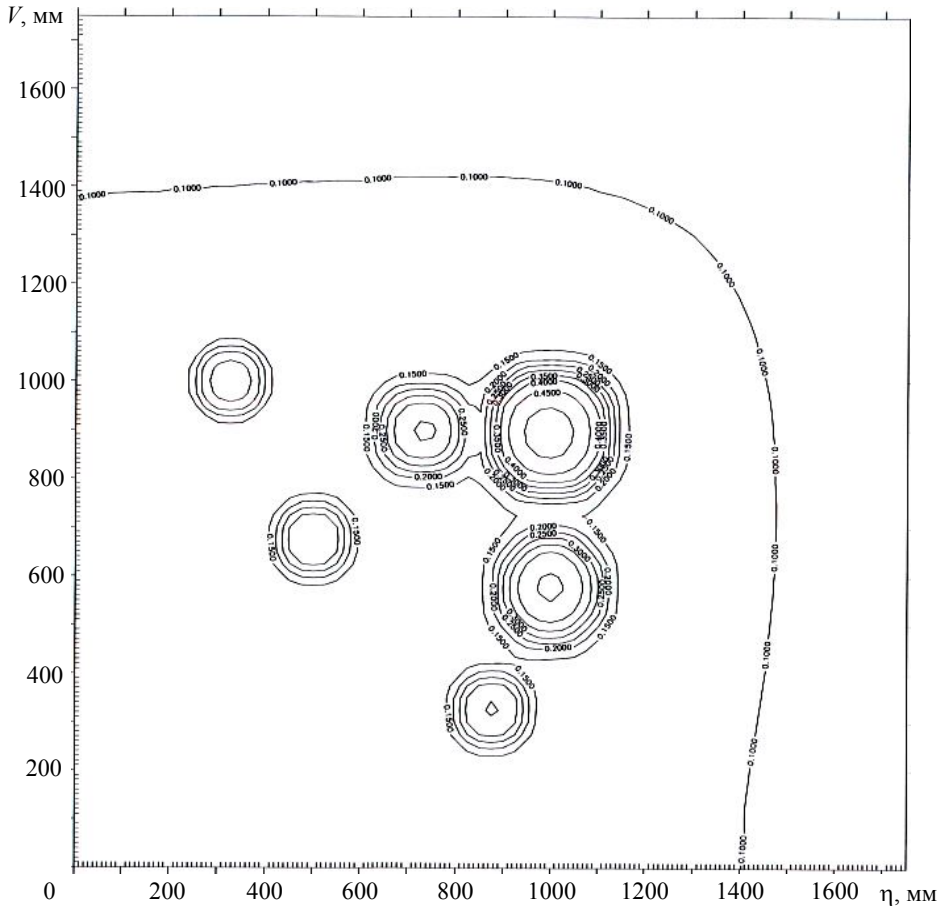


Рис.6. Поле параметра V конвергенции пород в плоскости заложения камер в окрестности ОУ (глубина 1400 м)

Уточним роль гравитационно-сейсмических сил в формировании суперпозиционного НДС в междукамерных элементах – в МКЦ. Не приводя подробных соотношений для величин полей σ_x и σ_y, а также полей ε_x и ε_y, сформированных гравитационными силами, в сравнении с виртуально воздействующими ($t \ll 1$ с) и экстремально оцененными растягивающими напряжениями, вызванными для тех же условий сейсмовоздействием [13, 14, 20 и др.] на МКЦ ($\sigma \approx 0{,}5$ МПа, а сопоставимые напряжения от гравитационных сил $\sigma < 0$), можно констатировать следующее.

Суммарное действие геостатического и сейсмического поля на МКЦ характеризуется для ОУ как превалирующе формируемое на данных глубинах за счет гравитационных нагрузок. Это же следует и из полученных оценок изменения диапазона значений параметра ε_x, который с учетом суперпозиционного воздействия двух полей будет иметь «размах» $\sim 0{,}8 \cdot 10^{-3} \le \varepsilon_x \le \sim 1{,}4 \cdot 10^{-3}$ (напомним, что в зонах растяжения $[\varepsilon_p] \approx 0{,}01$). Отметим также, что наиболее значимым фактором, позволяющим констатировать возникновение в элементах МГП «узких мест», является в данном случае параметр ε_x. Анализ полей компонентов деформаций (ε_x, ε_y) для пород кровли камер на ОУ позволяет констатировать приближенно одинаковые (для всех участков) условия сохранения ими устойчивости. Роль геодинамического поля для данных элементов МГП – с позиции оценки их устойчивости – адекватна МКЦ.

Обобщая рассмотренные выше условия использования комплексного подхода к оценке горно-геомеханического состояния элементов массива в окрестности ОУ, в частности камеры «р-2х», можно отметить следующее. Результаты расчетов в целом позволяют считать достаточно стабильной геомеханическую обстановку, обусловленную гравитационным полем напряжений, в районе камеры захоронения отходов. В данной геологической обстановке влияние прогнозируемой сейсмоактивности региона на НДС элементов массива, вмещающего камеры выщелачивания на рассмотренных глубинах, несущественно.

Вместе с тем требуется разработка локальных мероприятий по сохранению существующей на конкретном (в частности, на рассмотренном выше) объекте горно-геомеханической обстановки за счет консервации на период размещения отходов соседней выработки, обеспечении герметичности ствола скважины (скважин), реализации технологического управления геометрическими параметрами камер выщелачивания, окружающих ОУ и др.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Авершин С.Г.* Сдвижение горных пород при подземных разработках. М.: Углетехиздат, 1947. 245 с.
2. *Баклашов И.В.* Механические процессы в породных массивах / И.В.Баклашов, Б.А.Картозия. М.: Недра, 1986. 272 с.
3. *Бродберг К.Б.* Ударные волны в упругой и упруго-пластической среде. М.: Гостехиздат, 1959. 203 с.
4. *Буллен К.-Е.* Введение в теоретическую сейсмологию / Пер. с англ. М.: Мир, 1966. 460 с.
5. *Горшков Г.П.* О корреляции сейсмических шкал / Г.П.Горшков, Г.А.Шенкарева // Тр. Ин-та физики Земли. 1958. № 1(68). 44 с.
6. *Гутенберг Б.* Сейсмичность Земли / Пер. с англ. / Б.Гутенберг, К.Рихтер. М.: Мир, 1948. 160 с.
7. *Кольский Г.* Волны напряжений в твердых телах. М.: Иностранная литература, 1955. 192 с.
8. *Ковалев О.В.* Горно-геомеханические критерии безопасности размещения отходов в горных выработках / О.В.Ковалев, С.П.Мозер, И.Ю.Тхориков. СПб: Недра, 2012. 232 с.
9. *Колбенков С.П.* К вопросу расчета деформаций земной поверхности / С.П.Колбенков, А.Н.Павлов / ВНИМИ. Л., 1963. С.114-130
10. *Кратч Г.* Сдвижение горных пород и защита подрабатываемых сооружений. М.: Недра, 1978. 494 с.
11. *Крауч С.* Методы граничных элементов в механике твердого тела / С.Крауч, А.Старфилд, М.: Мир, 1987. 328 с.
12. *Миронов П.С.* Действие взрывов на устойчивость бортов карьеров // Сейсмическое действие промышленных взрывов: Сб. М.: Мир, 1982. 227 с.
13. Прикладные аспекты изучения механических процессов в массивах при подземной разработке месторождений полезных ископаемых / О.В.Ковалев, С.П.Мозер, И.Ю.Тхориков, Е.Б.Куртуков, Е.Р.Ковальский. СПб: Недра, 2011. 166 с.
14. *Поручиков В.Е.* Методы динамической теории упругости. М.: Наука, 1986. 328 с.

15. *Руппенейт К.В.* Деформируемость массивов трещиноватых горных пород. М.: Недра, 1975. 223 с.

16. *Саваринский Е.Ф.* Сейсмические волны. М.: Мир, 1972. 292 с.

17. Справочник по разработке соляных месторождений / Р.С.Пермяков, О.В.Ковалев, В.Л.Пинский и др. М.: Недра, 1986. 212 с.

18. *Смирнов В.И.* О применении нового метода к изучению упругих колебаний в пространстве при наличии осевой симметрии / В.И.Смирнов, С.Л.Соболев // Тр. Сейсмолог. ин-та АН СССР. 1933. № 29. С.43-51.

19. *Турчанинов И.А.* Основы механики горных пород / И.А.Турчанинов, М.А.Иофис, Э.В.Каспарян. Л.: Недра, 1989. 488 с.

20. *Тимошенко С.П.* Теория упругости. М.: ОНТИ-ГТТИ, 1934. 452 с.

21. *Wei-Fah Chen.* Earthquake engineering handbook / Wei-Fah Chen, C.Scawthron // CRC Press LLC, Roca Baton, Florida. 2003. 1235 p.

22. *Kawashima K.* Seismic analysis of underground structures // Journal of Disaster Research. Vol.1. N 3. 2006. P.378-389.

23. *Shen-Haw J.U.* Determining Rayleigh damping parameters of soils for finite element analysis / J.U.Shen-Haw, N.I.Sheng-Huoo // International journal for numerical and analytical methods in geomechanics. 2007. Vol.31. N 10. P.1239-1255.

24. *Zerwer A.* Parameter Estimation in Finite Element Simulations of Rayleigh Waves / A.Zerwer, G.Cascante, J.Hutchinson // J. Geotech. and Geoenvir. Eng. 2002. Vol.128. Iss.3. P.250-261.

REFERENCES

1. *Avershin S.G.* Sdvizhenie gornykh porod pri podzemnykh razrabotkakh (*Rock mass displacement due to underground mining*). Moscow: Ugletekhizdat, 1947, p.245.

2. *Baklashov I.V.*, *Kartoziya B.A.* Mekhanicheskie protsessy v porodnykh massivakh (*Rock mass mechanical processes*). Moscow: Nedra, 1986, p.272.

3. *Brodberg K.B.* Udarnye volny v uprugoi i uprugo-plasticheskoi srede (*Blast waves in elastic and elastic-plastic materials*). Moscow: Gostekhizdat, 1959, p.203.

4. *Bullen K.-E.* Vvedenie v teoreticheskuyu seismologiyu (*Introduction to theoretical seismology*). Per. s angl. Moscow: Mir,1966, p.460.

5. *Gorshkov G.P.*, *Shenkareva G.A.* O korrelyatsii seismicheskikh shkal (*About seismic scales correlations*). Tr. in-ta fiziki Zemli. 1958. N 1(68), p.44.

6. *Gutenberg B.*, *Rikhter K.* Seismichnost' Zemli (*Seismicity of the earth*). Moscow, 1948, p.160.

7. *Kol'skii G.* Volny napryazhenii v tverdykh telakh (*Stress waves in solid bodies*). Moscow: Inostrannaya literatura, 1955, p.192.

8. *Kovalev O.V.*, *Mozer S.P.*, *Tkhorikov I.Yu.* Gorno-geomekhanicheskie kriterii bezopasnosti razmeshcheniya otkhodov v gornykh vyrabotkakh (*Mining and geomechnical safety criteria of waste disposal in underground mine workings*). St Petersburg: Nedra, 2012, p.232.

9. *Kolbenkov S.P.*, *Pavlov A.N.* K voprosu rascheta deformatsii zemnoi poverkhnosti (*Some questions on ground surface deformations*). VNIMI. Leningrad, 1963, p.114-130

10. *Kratch G.* Sdvizhenie gornykh porod i zashchita podrabatyvaemykh sooruzhenii (*Rock mass displacement and underworked structures protection*). Moscow: Nedra, 1978, p.494.

11. *Krauch S.*, *Starfild A.* Metody granichnykh elementov v mekhanike tverdogo tela (*Boundary elements methods in solid mechanics*). Moscow: Mir, 1987, p.328.

12. *Mironov P.S.* Deistvie vzryvov na ustoichivost' bortov kar'erov (*Blasting influence on open-pit slope stability*). Seismicheskoe deistvie promyshlennykh vzryvov: Sb. Moscow: Mir, 1982, p.227.

13. *Kovalev O.V.*, *Mozer S.P.*, *Tkhorikov I.Yu.*, *Kurtukov E.B.*, *Koval'skii E.R.* Prikladnye aspekty izucheniya mekhanicheskikh protsessov v massivakh pri podzemnoi razrabotke mestorozhdenii poleznykh iskopaemykh (*Applied studies of mechanical processes in rock strata in underground mining*). St Petersburg: Nedra, 2011, p.166.

14. *Poruchikov V.E.* Metody dinamicheskoi teorii uprugosti (*Dynamic elastic theory methods*). Moscow: Nauka, 1986, p.328.

15. *Ruppeneit K.V.* Deformiruemost' massivov treshchinovatykh gornykh porod (*Fractured rock mass deformation*). Moscow: Nedra, 1975, p.223.

16. *Savarinskii E.F.* Seismicheskie volny (*Seismic waves*). Moscow: Mir, 1972, p.292.

17. *Permyakov R.S.*, *Kovalev O.V.*, *Pinskii V.L.* et al. Spravochnik po razrabotke solyanykh mestorozhdenii (*Salt deposit mining reference-book*). Moscow: Nedra, 1986, p.212.

18. *Smirnov V.I.*, *Sobolev S.L.* O primenenii novogo metoda k izucheniyu uprugikh kolebanii v prostranstve pri nalichii osevoi simmetrii (*Application of a new method of elastic oscillations study for axial symmetry conditions*). Tr. Seismolog. in-ta AN SSSR. 1933. N 29, p.43-51.

19. *Turchaninov I.A.*, *Iofis M.A.*, *Kasparyan E.V.* Osnovy mekhaniki gornykh porod (*Basics of rock mechanics, a second edition*). Leningrad: Nedra, 1989, p.488.

20. *Timoshenko S.P.* Teoriya uprugosti (*Elastic theory*). Moscow: ONTI-GTTI, 1934, p.452.

21. *Wei-Fah Chen*, *Scawthron C.* Earthquake engineering handbook. CRC Press LLC, Roca Baton, Florida. 2003, p.1235.

22. *Kawashima K.* Seismic analysis of underground structures. Journal of Disaster Research. Vol.1. N 3. 2006, p.378-389.

23. *Shen-Haw J.U.*, *Sheng-Huoo N.I.* Determining Rayleigh damping parameters of soils for finite element analysis. International journal for numerical and analytical methods in geomechanics. 2007. Vol.31. N 10, p.1239-1255.

24. *Zerwer A.*, *Cascante G.*, *Hutchinson J.* Parameter Estimation in Finite Element Simulations of Rayleigh Waves. J. Geotech. and Geoenvir. Eng. 2002. Vol.128. Iss.3, p.250-261.

ENGINEERING AND GEOMECHANICAL FORECAST FOR WASTE DISPOSAL IN UNDERGROUND CAVERNS INCLUDING EARTHQUAKE-PRONE ZONES

O.V.KOVALEV, *Dr. of Engineering Sciences*, *Professor*, *spggi4@mail.ru*
National Mineral Resources University (*Mining University*), *St Petersburg*, *Russia*

The article aims at obtaining representative scientifically based data to determine parameters of a necessary-safe condition of the rock massif (RM) in underground waste diposal caverns zones, including earthquake-prone zones. The main requirements for underground caverns for hazardous waste disposal and for their construction technology are described. The subject of the research is underground solution caverns in halogen rocks. Data for justification of safe waste disposal conditions in underground salt caverns and its stages are presented. A complex approach to the solution of the research problem is described. The main aspects of dynamic influence of seismic waves on underground caverns stability are considered. Taking into account seismic-risk zoning data on the research region some significant parameters of a possible seismic impact on the experimental cavern are calculated. The article points out the necessity of superincumbent rock and surface displacement assessment for the experimental site zone using the suggested complex approach and including the analysis of surveying data and results of rock mass geomechanical modeling.

Key words: underground salt solution, waste disposal, seismicity, geodynamics, displacement discontinuity method, boundary element method, stress and strain state, seismic impedance.