

4. Глебова П.А. Оценка степени нагружения междукамерных целиков на границе выработанного пространства // Горное Эхо. – 2021. – №4 (85). – С. 21-24. DOI:10.7242/echo.2021.4.4.
5. Serata S., Milnor S.W. Geomechanics of bedded salt / University of California, Lawrence Livermore Laboratory. – 1979. – R. 184.
6. Tournaire M. Des dimensions a donner aux pilliers des carriers et des Pressions auxquelles les terrains sont soumis dans les profondeurs // Annales des mine. – Paris, 1884. – V. 5. – P. 415-429
7. Шевяков Л.Д. О расчете прочных размеров и деформаций целиков // Изв. АН СССР, Отд. техн. наук. – 1941. – № 7-9. – С.
8. Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике. – М.: Мир, 1975. – 541 с.: ил.
9. Фадеев А.Б. Метод конечных элементов в геомеханике. – М.: Недра, 1987. – 221 с.: ил.
10. Барях А.А., Самоделькина Н.А. Об одном подходе к реологическому анализу геомеханических процессов // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2005. – № 6. – С. 32-41. – DOI: 10.1007/s10913-006-0015-х.

УДК 622.83

DOI:10.7242/echo.2022.4.6

НАСТРОЙКА ГЕОМЕХАНИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПОДРАБОТАННОЙ ТОЛЩИ С УЧЕТОМ ДАННЫХ РАДАРНОЙ ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ

Е.А. Губанова, П.А. Глебова
Горный институт УрО РАН, г. Пермь

Аннотация: Рассмотрено моделирование текущей геомеханической ситуации на основе данных наблюдений за смещением земной поверхности, полученных методами радарной интерферометрии. Процесс деформирования подработанной толщи проведен в упругопластической постановке для условий плоского деформированного состояния (ПДС) с использованием метода конечных элементов. С использованием критериев Кулона-Мора и предельных растягивающих напряжений выполнена итоговая критериальная оценка потенциальной возможности формирования в водозащитной толще (ВЗТ) трещин субвертикальной ориентации на примере района отработки в северной части Тюбегатанского месторождения калийных солей.

Ключевые слова: математическое моделирование, водозащитная толща, субвертикальная нарушенность, мулда сдвижения, площадной мониторинг.

Введение

Вопросы безопасной эксплуатации рудников имеют первоочередное значение при их разработке. Одним из важных аспектов при этом является площадной контроль оседаний земной поверхности, который преимущественно осуществляется методами радарной интерферометрии. Применению этих методов на месторождениях калийных солей посвящены работы [1-3]. Цель настоящей статьи состояла в моделировании текущей геомеханической ситуации на основе данных радарной интерферометрии при оценке смещений земной поверхности на примере участка отработки в северной части Тюбегатанского месторождения калийных солей. Здесь, ввиду неудовлетворительного состояния выработок промышленного пласта Нижний II, складывается неблагоприятная геомеханическая ситуация, связанная с опасностью формирования в интервале ВЗТ зон техногенной трещиноватости. Данные наблюдений за смещением земной поверхности на данном участке получены с использованием радарных снимков спутника Сентинель-1А. Ввиду того, что техногенные объекты достаточно устойчиво отражают радарный сигнал, такие оценки полей смещений, связанных с подземными работами, позволяют отслеживать смещения амплитудой в несколько сантиметров. По результатам площадного

мониторинга выделены две области возможных техногенных смещений земной поверхности, что использовано при параметрическом моделировании текущей геомеханической ситуации.

Методические положения расчетов

Деформирование подработанной толщи моделировалось для условий плоского деформированного состояния (ПДС) с использованием метода начальных напряжений [4, 5]. Промышленные пласты отражались материалом с переменными модулями [6]. В расчетной схеме учитывался весь комплекс горно-геологических (особенности строения, гипсометрия пластов и др.) и горнотехнических (количество отработанных пластов, параметры системы разработки, порядок отработки и т.д.) факторов. Оценка нарушенности подработанной толщи производилась на основе критерий разрушения в области сжатия [7] и растяжения. Для численной реализации упруго-пластической задачи принят метод конечных элементов [8].

Постановка задачи

Принципиальная схема геомеханического анализа представлена на рис. 1. В геологическом отношении объект исследований характеризуется моноклинальным залеганием всех пород и промышленных сильвинитовых пластов с падением на северо-запад под углом 10-15°, находящихся под действием массовых сил интенсивностью γ_i (γ_i - удельный вес i -го элемента разреза). В расчетной схеме учтена выделенная по результатам сейсморазведочных работ область пониженных механических свойств пород. В районе исследований отработан сильвинитовый пласт Нижний II. Состояние горных выработок на данном участке оценивается как неудовлетворительное, очистные камеры «задавлены» обрушенными породами. Также следует отметить негативный факт, что в районе участка отработки наблюдается расслопооявление.

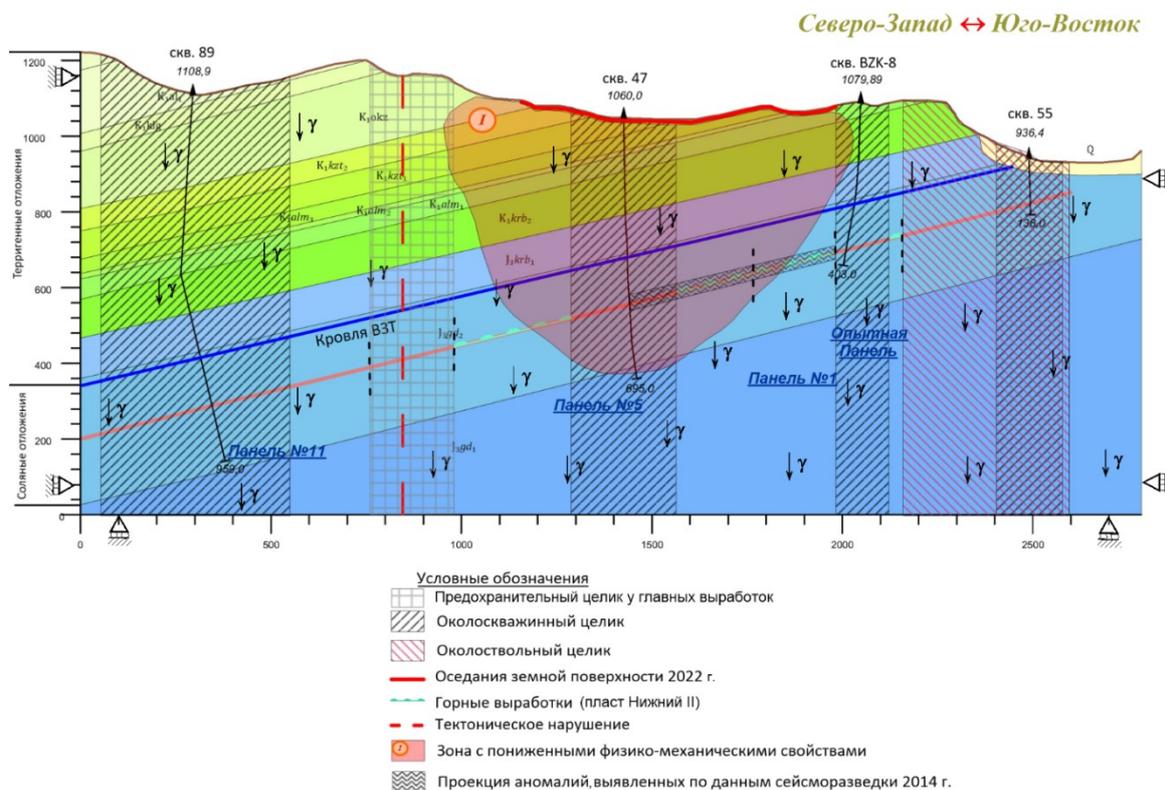


Рис. 1. Расчетная схема

На рис. 2 приведена карта субвертикальных смещений земной поверхности за период с 26 сентября по 25 ноября 2021 года, построенная по результатам радарной интерферометрии. Район отработки помечен красными метками Pin1, Pin2, Pin3, Pin4.

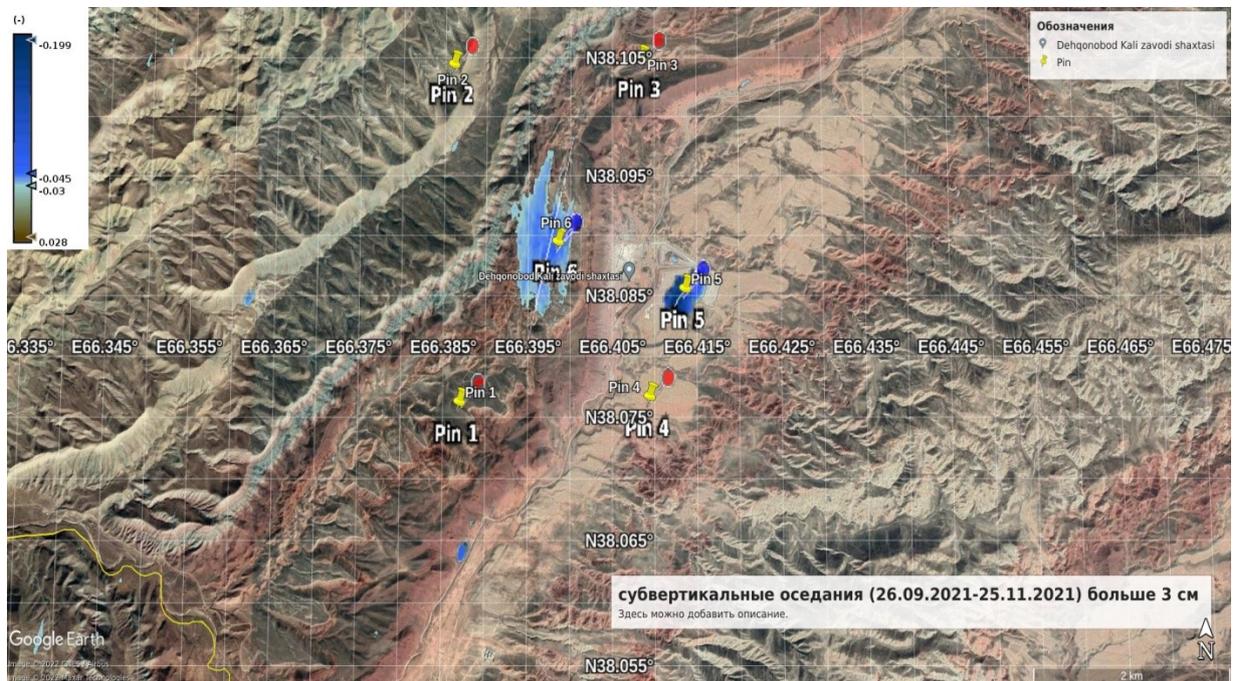


Рис. 2. Карта субвертикальных смещений земной поверхности по результатам радарной интерферометрии

По результатам мониторинга выделены две области возможных техногенных смещений земной поверхности, приуроченные к району отработки. Данные области помечены синими метками Pin5, Pin6. Наибольшие оседания наблюдаются в области Pin5 (вблизи краевой части участка отработки), они составляют 20 см за период в 60 дней. Этому соответствует средняя скорость оседаний 120 см/год. В области Pin6 амплитуда оседаний гораздо меньше и составляет 4 см за период в 60 дней (средняя скорость оседаний 24 см/год). Как видно, эта область гораздо обширнее и охватывает центральную часть участка отработки. Зафиксированные оседания, по всей вероятности, связаны с подземными работами, а характер этих оседаний обусловлен технологическими методами ведущихся подземных работ. Указанная информация также использована для параметрической настройки численной математической модели.

По результатам площадного мониторинга средняя скорость оседаний на участке отработки составляет 24 см/год. На сегодняшний день, как отмечалось, горные выработки находятся в неудовлетворительном состоянии и «задавлены» обрушенными породами. Таким образом, в течение временного промежутка, прошедшего с начала отработки до настоящего момента, скорость оседаний могла быть как ниже значения 24 см/год, так и выше. Следовательно, накопленные с начала отработки исследуемого участка (2010 год) максимальные оседания земной поверхности ориентировочно могли достичь уровня порядка 2,0 м.

Северо-Запад ↔ Юго-Восток

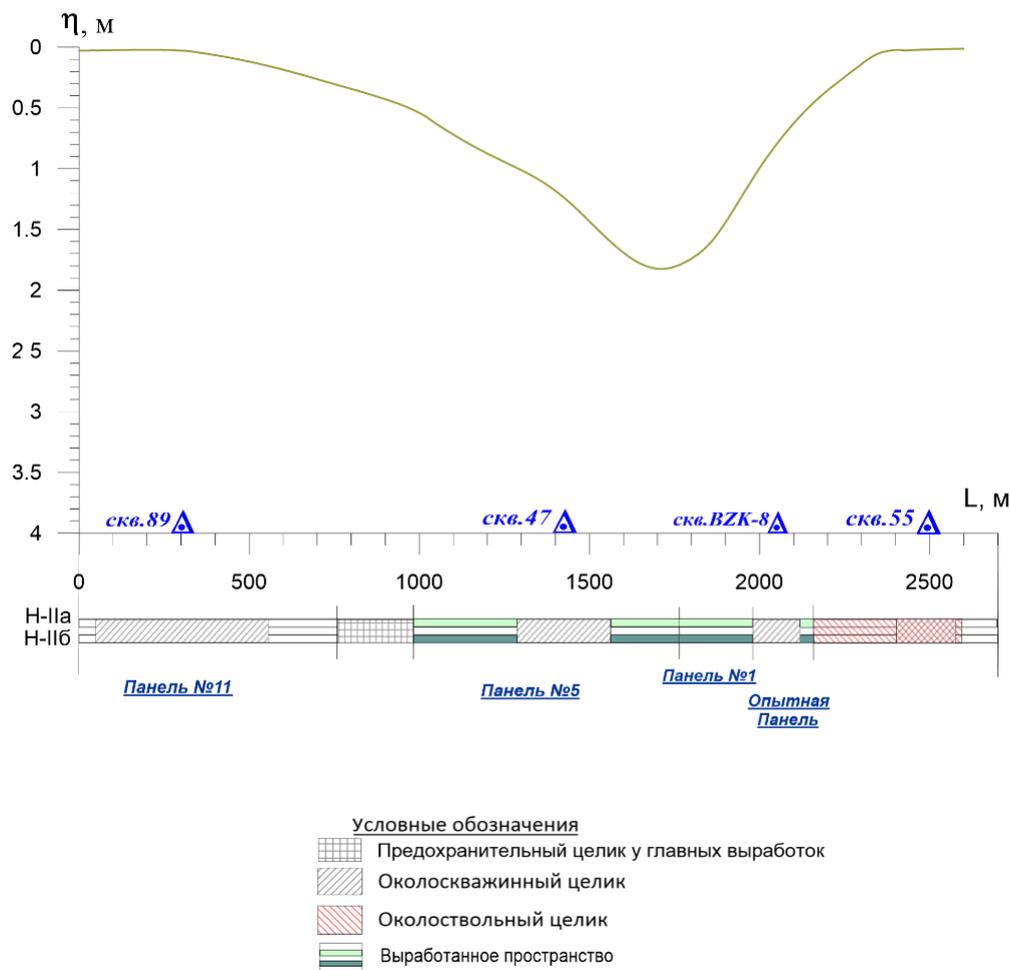


Рис. 3. Изменение оседаний земной поверхности на текущий момент времени

К 2022 году максимальное проседание земной поверхности (чуть меньше 2,0 м) реализуется в центральной части расчетного профиля на участке панели № 5 вблизи границы раздела с соседней панелью № 1 (рис. 3). Сформированный максимум с довольно высокими градиентами оседаний в районе околоскважинных целиков СКВ.47 и СКВ.ВЗК-8 локализуется к тому же в зоне действия выделенной сейсморазведочной аномалии. Перегибы мульды сдвижения формируются в краевых частях расчетного профиля и над околоскважинными целиками СКВ.47, СКВ.ВЗК-8, оставленными на отработанной площади. Таким образом, моделирование деформирования подработанного массива в пределах участка отработки показало, что уже к настоящему моменту времени достаточно неравномерный характер его протекания свидетельствует о высокой техногенной нагрузке на пласты ВЗТ.

Результаты, иллюстрирующие техногенную нарушенность пластов в соответствии с данными радарной интерферометрии, представлены на рис. 4. Критериальная оценка состояния водозащитной толщи свидетельствует, что на данном участке складывается неблагоприятная геомеханическая ситуация. Наиболее опасной на настоящий момент времени является геомеханическая ситуация в районе юго-восточной границы предохранительного целика СКВ.47. При оценках, принятых по результатам интерпретации сейсморазведочных наблюдений (снижение механиче-

ских свойств в 1,4 раза) область субвертикальной трещиноватости охватывает всю мощность ВЗТ уже к настоящему моменту времени. Состояние ВЗТ на данный момент времени оценивается как критическое.

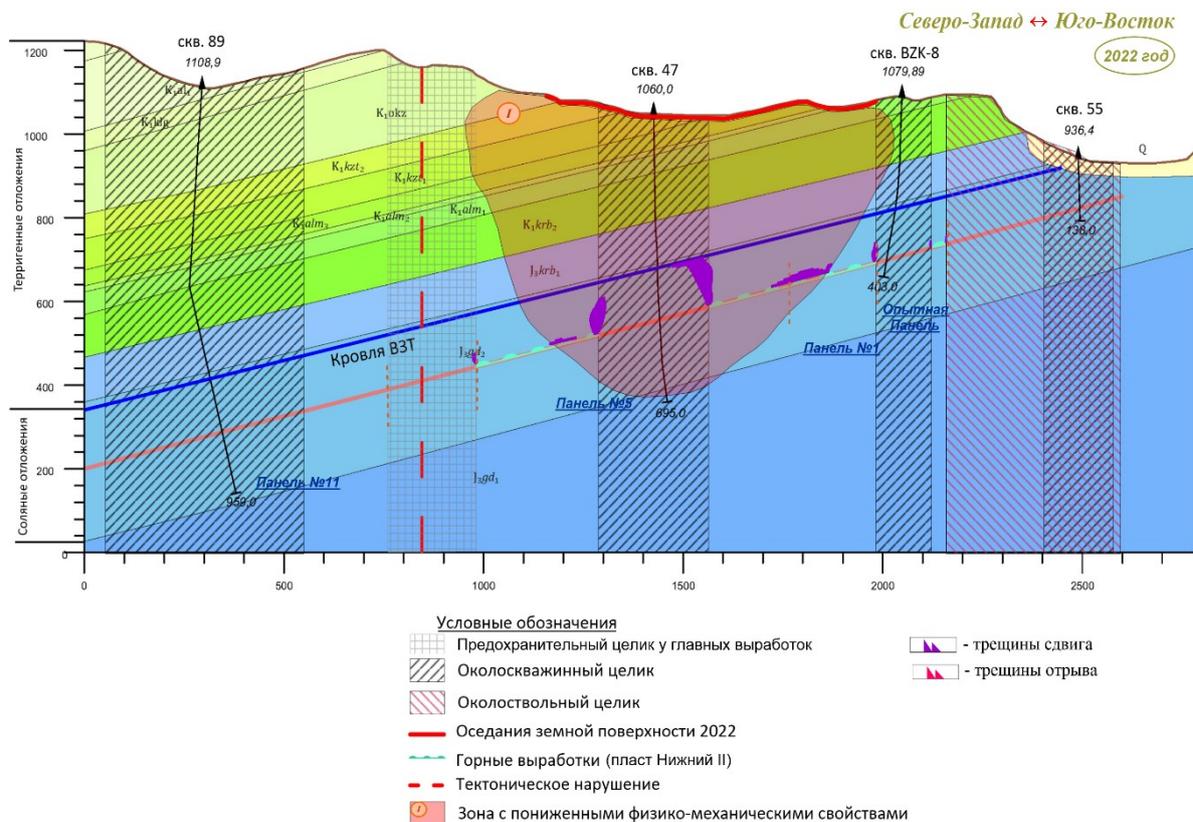


Рис. 4. Характер техногенного нарушения сплошности ВЗТ на текущий момент времени

Сложная геомеханическая обстановка отмечается и в районе северо-западной границы целика СКВ.47. Здесь сплошность ВЗТ сохраняется только за счет целостности ее верхней части. Области техногенной нарушенности на текущий момент времени могут формироваться также в краевых частях подработанного массива, околоскважинного целика СКВ.BZK-8, у границы раздела панелей №№ 1, 5 и в районе границ выделенной сейсморазведочной аномалии. Их максимальное развитие по разрезу ВЗТ ограничено ее нижней частью.

Таким образом, моделирование процесса деформирования подработанного массива, согласно данным, полученным на основе методов радарной интерферометрии, показало адекватность их использования, что, в том числе, подтверждается визуальным обследованием горных выработок.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Samsonov S., Baryakh A. Estimation of deformation intensity above a flooded potash mine near berezniki (Perm Krai, Russia) with SAR interferometry // Remote Sensing. – 2020. – V. 12, № 19. – P. 1-11. Номер статьи 3215. – DOI: 10.3390/rs12193215.
2. Буш В., Хебель Х.-П., Шаффер М., Вальтер Д., Барях А.А. Контроль оседаний подработанных территорий методами радарной интерферометрии // Маркшейдерия и недропользование. – 2009. – № 2. – С. 38-43.
3. Бабаянц И.П., Барях А.А., Волкова М.С., Михайлов В.О., Тимошкина Е.П., Хайретдинов С.А. Мониторинг оседаний на территории г. Березники (Пермский край) методами спутниковой радарной

- интерферометрии. I. Дифференциальная интерферометрия // Геофизические исследования. – 2021. – Т. 22, № 4. – С. 73-89. – DOI: 10.21455/gr2021.4-5.
4. Малинин Н.Н. Прикладная теория пластичности и ползучести. – М.: Машиностроение, 1975. – 400 с.
 5. Фадеев А.Б. Метод конечных элементов в геомеханике. – М.: Недра, 1987. – 221 с.: ил.
 6. Baryakh A.A., Samodelkina N.A Rheological analysis of geomechanical processes // Journal of Mining Science. – 2005. – V. 41, № 6. – P. 522-530. – DOI: 10.1007/s10913-006-0015-x.
 7. Кузнецов Г.Н. Механические свойства горных пород. – М.: Углетехиздат. – 1947. – 180 с.
 8. Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике. – М.: Мир, 1975. – 541 с.: ил.

УДК 622.831

DOI:10.7242/echo.2022.4.7

РАСЧЕТ СТЕПЕНИ НАГРУЖЕНИЯ МЕЖДУКАМЕРНЫХ ЦЕЛИКОВ ПРИ НЕСООСНОМ РАСПОЛОЖЕНИИ ОЧИСТНЫХ КАМЕР

И.С. Ломакин

Горный институт УрО РАН, г. Пермь

Аннотация. На основе анализа изменения напряженно-деформированного состояния междукамерных целиков методами математического моделирования выполнена оценка степени их нагружения при несоосном расположении камер. Численная реализация математического моделирования проводилась в упругой постановке для условий плоского деформированного состояния методом конечных элементов. По результатам выполненных расчетов установлено, что при несоосном расположении очистных камер методика Турнера-Шевякова дает завышенные оценки степени нагружения междукамерных целиков, поскольку не учитывает разгрузку целиков в условиях подработки.

Ключевые слова: степень нагружения, междукамерные целики, напряженно-деформированное состояние, математическое моделирование.

На Верхнекамском месторождении солей (ВКМС) добыча полезного ископаемого ведется камерной системой разработки с поддержанием налегающей толщи на ленточных междукамерных целиках (МКЦ). Расчет степени нагружения МКЦ (C) основан на методике Турнера-Шевякова и регламентирован в нормативной документации [1], разработанной для условий ВКМС:

$$C = \xi \gamma H_0 \frac{a+b}{bk_f \sigma_m} \leq [C], \quad (1)$$

где ξ – коэффициент, учитывающий изменение нагрузки на целики вследствие влияния различных горнотехнических факторов (пригрузка от солеотвалов, опорное давление, наличие межходовых целиков и др.); γ – объемный вес пород; H_0 – максимальное значение расстояния от земной поверхности до кровли целиков; a – ширина очистных камер; b – ширина междукамерных целиков; k_f – коэффициент формы целиков; σ_m – прочность пород в массиве; C , $[C]$ – соответственно, расчетная и допустимая степень нагружения целика.

Неизменное стремление горнодобывающих предприятий увеличить степень извлечения полезного ископаемого приводит к поиску альтернативных технологических подходов к организации системы подземной разработки. Одним из таких возможных направлений является отработка продуктивных пластов с несоосным расположением очистных камер. Целью представленных исследований являлась оценка степени нагружения междукамерных целиков на основе результатов математического модели-