

4. Kneucker T., Zulauf G., Mertineit M., Behlau J., Hammer J. The impact of finite strain on deformation mechanisms of permian stassfurt rock salt at the Morsleben site (Germany): Constraints from microfabric studies and EBSD analyses // *Zeitschrift der Deutschen Gesellschaft für geowissenschaften*. – 2014. – V. 165 № 1. – P. 91–106. – DOI: 10.1127/1860-1804/2013/0041.
5. Leitner C., Neubauer F., Urai J.L. Schoenherr J. Structure and evolution of a rocksalt-mudrock-tectonite: The haselgebirge in the Northern Calcareous Alps // *Journal of Structural Geology*. – 2011. – V. 33, № 5. – P. 970–984. – DOI: 10.1016/j.jsg.2011.02.008.
6. Mertineit M., Schramm M., Hammer J. Zulauf G. Deformation of anhydrite rocks (Gorleben-Bank, Z3OSM) in a high-strain domain of the Gorleben salt dome, Germany // *Zeitschrift der Deutschen Gesellschaft für geowissenschaften*. – 2014. – V. 165 № 1. – P. 49–62. – DOI: 10.1127/1860-1804/2014/0048.
7. Schleder Z., Urai J.L. Microstructural evolution of deformation-modified primary halite from the Middle triassic Rot formation at Hengelo, the Netherlands // *International journal of Earth Sciences*. – 2005. – V. 94, № 5–6. – P. 941–955. – DOI: 10.1007/s00531-005-0503-2.
8. Schleder Z., Burliga S., Urai J.L. Dynamic and static recrystallization-related microstructures in halite samples from the Klodawa salt wall (Central Poland) as revealed by gamma-irradiation // *Neues jahrbuch fur mineralogie-abhandlungen*. – 2007. – V. 184, № 1. – P. 17–28. – DOI: 10.1127/0077-7757/2007/0079.
9. Schleder Z., Urai J.L. Deformation and recrystallization mechanisms in mylonitic shear zones in naturally deformed extrusive eocene-oligocene rocksalt from eyvanekey plateau and Garmsar Hills (Central Iran) // *Journal of Structural Geology*. – 2007. – V. 29, № 2. – P. 241–255. – DOI: 10.1016/j.jsg.2006.08.014.
10. Schoenherr J., Urai L.L., Kukla P.A., Littke R., Schleder Z., Larroque J.M., Newall M.J., Al-Abry N., Al-Siyabi H.A., Rawahi Z. Limits to the sealing capacity of rock salt: A case Study of the infra-cambrian ara salt from the South Oman salt basin // *AAPG Bulletin*. – 2007. – V. 91, № 11. – P. 1541–1557. – DOI: 10.1306/06200706122.
11. Závada P., Desbois G., Schwedt A., Lexa O., Urai J.L. Extreme ductile deformation of fine-grained salt by coupled solution precipitation creep and microcracking: microstructural evidence from perennial zechstein sequence (Neuhof salt mine, Germany) // *Journal of Structural Geology*. – 2012. – V. 37. – P. 89–104. – DOI: 10.1016/j.jsg.2012.01.024.
12. Carter N.L., Hansen F.D., Senseny P.E. Stress magnitudes in natural rock salt // *Journal of geo-physical research*. – 1982. – V. 87, № B11.P. 9289–9300. – DOI: 10.1029/JB087iB11p09289.

УДК 622.831

DOI:10.7242/echo.2021.2.7

О ВОЗМОЖНОСТИ МИНИМИЗАЦИИ РИСКА НАРУШЕНИЯ СПЛОШНОСТИ ВОДОЗАЩИТНОЙ ТОЛЩИ НА ПОТЕНЦИАЛЬНО ОПАСНЫХ УЧАСТКАХ

А.К. Федосеев

Горный институт УрО РАН, г. Пермь

Аннотация: При значительных деформациях породного массива вокруг отработанного пространства традиционные методы защиты рудника от затопления, такие как закладка очистных камер, часто не могут обеспечить сохранность водозащитной толщи. В случае, если местом локализации возможного нарушения является охранный целик вокруг разведочной скважины, одним из возможных методов предотвращения проникновения пресных вод в выработанное пространство является подработка охранный целика.

На примере критической ситуации в юго-западной части рудника БКРУ-4 (Березники, Россия) рассмотрены основные методологические аспекты геомеханической оценки влияния подработки охранный целика на сохранность водозащитной толщи для различных вариантов создания зоны смягчения. Деформирование слоистого соляного массива, подработанного камерной системой разработки, описывалось моделью идеальной упруго-пластичной среды с внутренним трением. В качестве критерия пластичности в области сжатия использовалась параболическая огибающая кругов Мора.

Ключевые слова: калийные рудники, напряженно-деформированное состояние, математическое моделирование, метод конечных элементов.

В условиях значительных деформаций пород вокруг горных выработок охранные целики, оставление которых призвано обеспечить сохранность разведочных скважин,

часто оказываются причиной неоднородности поля напряжений, и, как следствие, местом локализации возможного нарушения сплошности водозащитной толщи (ВЗТ). Создание зоны смягчения посредством подработки охранного целика является, на первый взгляд, наиболее простым методом нейтрализации данной проблемы, однако, при наличии развитых нарушений в ВЗТ необходимо проведение предварительных геомеханических исследований с целью оценки последствий подработки ранее нарушенного массива.

Методические аспекты такой геомеханической оценки рассматривались на примере ситуации в юго-восточной части шахтного поля рудника БКПРУ-4 (Березники, Россия) [1]. В районе исследований, начиная с 2000-го года, отрабатывались сильвинитовые пласты АБ и КрII. Абсолютная отметка земной поверхности – 160 м, а глубина отработки составляет 270 м. Здесь в 2013 году было зафиксировано значительное увеличение скоростей оседания земной поверхности (с 50–60 мм/год в 2012 году до 153 мм/год в 2013 г.), которые в следующем, 2014, году возросли до 1400 мм/год. В 2015 году удалось обеспечить закладку выработанного пространства по пластам КрII и АБ со степенью заполнения 0,6 и 0,3 соответственно, и уже с мая 2015 было отмечено заметное снижение скоростей оседания земной поверхности. Однако при этом высокий градиент оседаний в северной и южной краевых частях мульды сдвижения сохранился. К 2020 году максимальное приращение оседаний за год составило около 4 см, а в абсолютном значении оседания достигли 2,90 м. Сохранение высокого градиента вертикальных сдвижений на южной и северной границах 4-го восточного блока свидетельствует о сохранении высокой опасности нарушения сплошности ВЗТ.

По результатам двумерного геомеханического анализа к началу 2021 года в нижней части ВЗТ на границе охранного целика СКВ. 492 разрушены все пласты вплоть до пласта И, а зона трещиноватости вследствие действия растягивающих напряжений в верхней части ВЗТ простирается вниз до середины ПКС. Согласно выполненному моделированию, прогнозируется дальнейшее расширение областей нарушенности. В первую очередь это относится к обширной зоне трещиноватости в верхней части ВЗТ, которая расширяется как по латерали, так и вниз по разрезу.

В качестве одного из возможных методов предотвращения проникновения пресных вод в выработанное пространство рассматривается подработка охранного целика СКВ.492 по пласту каменной соли, что должно позволить уменьшить градиент оседаний на его южной границе, и, как следствие, понизить техногенное воздействие на проблемный участок ВЗТ.

При математическом моделировании учитывались основные особенности геологического строения подработанного массива, действие массовых сил. Для анализа деформирования подработанного массива во времени использовался реологический подход, основанный на математическом описании прогнозных графиков нарастания оседаний земной поверхности [2]. Оценка потенциальной возможности формирования в массиве трещин субвертикальной ориентации определялась критерием Кулона-Мора. Численное решение задачи осуществлялось методом конечных элементов [3].

Предварительные геомеханические расчеты показали, что формирование зоны смягчения путем подработки охранного целика СКВ.492 по пласту подстилающей каменной соли (КС) дает определенный эффект только при ее протяженности не менее 75 м. В этом случае диаметр охранного целика уменьшается до 50 метров, что априори предопределяет риски, связанные с опасностью вскрытия скважины.

Рассматривались два варианта проработки: создание зоны смягчения по всему периметру охранного целика и ее формирование только в наиболее опасном южном сегменте. Анализировались различные параметры проработки, отличающиеся степенью нагружения междукламерных целиков на пласте КС.

При формировании зоны смягчения по всему периметру охранного целика и параметрах, обеспечивающих степень нагружения междукламерных целиков $C=0,3$ позитивный эффект на перспективу в ближайшие 10 лет не достигается: прогнозные оценки развития нарушений в верхней части ВЗТ на ближайшие 10 лет сохраняются на прежнем уровне. С увеличением степени нагружения расширение области нарушений в ПКС и ПП замедляется. При достижении степени нагружения значения $C=0,45$ рост области нарушений в верхней части ВЗТ полностью прекращается, но при этом отмечается разрушение карналлитовых пластов по границам «нового» охранного целика СКВ.492. При степени нагружения $C=0,55$ (рис. 1) к 2030 году прогнозируется образование на границе «нового» охранного целика в верхней части ВЗТ области трещиноватости, которая полностью пронизывает ПП, ПКС, разрушению также подвержены все пласты карналлита. С учетом того, что в зону нарушения попадает ствол СКВ.492, данная ситуация оценивается как критическая.

Таким образом, согласно выполненным расчетам степень нагружения междукламерных целиков в зоне смягчения не должна превышать $C=0,45$.

Пласт КС в пределах охранного целика находится под воздействием опорного горного давления, обусловленного очистной выемкой пластов АБ и КрII. Следуя «Указаниям...» [4] коэффициент, учитывающий влияние опорного давления вдоль длительно остановленных границ выработанного пространства на уровне обрабатываемых пластов, определяется из выражения:

$$\xi_2 = 1 + \beta_n \eta_m(t) \quad (1)$$

где $\beta_n = 0.135$ – параметр аппроксимации, $\eta_m(t)$ – расчетная или фактическая величина максимального оседания земной поверхности над рассматриваемым участком. Тогда с учетом данных маркшейдерских наблюдений величина искомого коэффициента составляет $\xi_2 \approx 1,4$. Это означает, что при планируемой эффективной проработке со степенью нагружения 0,45 фактическая степень нагружения будет составлять примерно 0,63, что значительно ухудшит и без того критическую ситуацию, представленную на рис. 1.

Таким образом, для снижения риска формирования сквозного нарушения в ВЗТ в районе ствола СКВ.492 следует проводить проработку охранного целика с параметрами, при которых степень нагружения без учета влияния опорного давления не превышает 0,32.

При проработке охранного целика СКВ.492 только со стороны 4-го восточного блока со степенью нагружения междукламерных целиков $C=0,3$ также, как и при проработке по всему периметру охранного целика, не происходит сколь либо значимого улучшения ситуации. С ростом степени нагружения развитие сформированной зоны трещиноватости в верхней части ВЗТ «затормаживается», и даже при относительно больших степенях нагружения междукламерных целиков не происходит формирование сквозных областей нарушения в районе ствола СКВ.492 (рис. 2). С этой точки зрения проработка охранного целика только с южной границы является предпочтительной в сравнении с созданием зоны смягчения по всему его периметру. В этом случае, даже с учетом оценок опорного горного давления в соответствии с формулой (1), степень нагружения междукламерных целиков на пласте КС может составлять $C=0,46$.

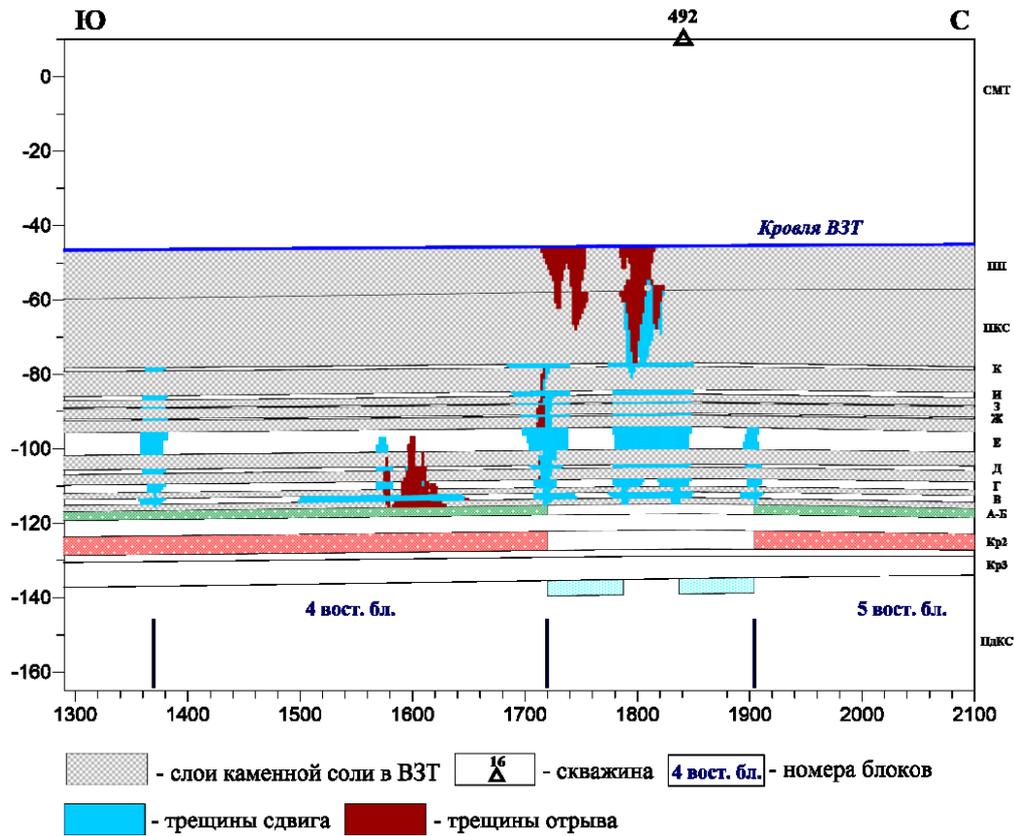


Рис. 1. Прогноз характера техногенного нарушения сплошности на 2030 год при подработке охранного целика со степенью нагружения $C=0,55$

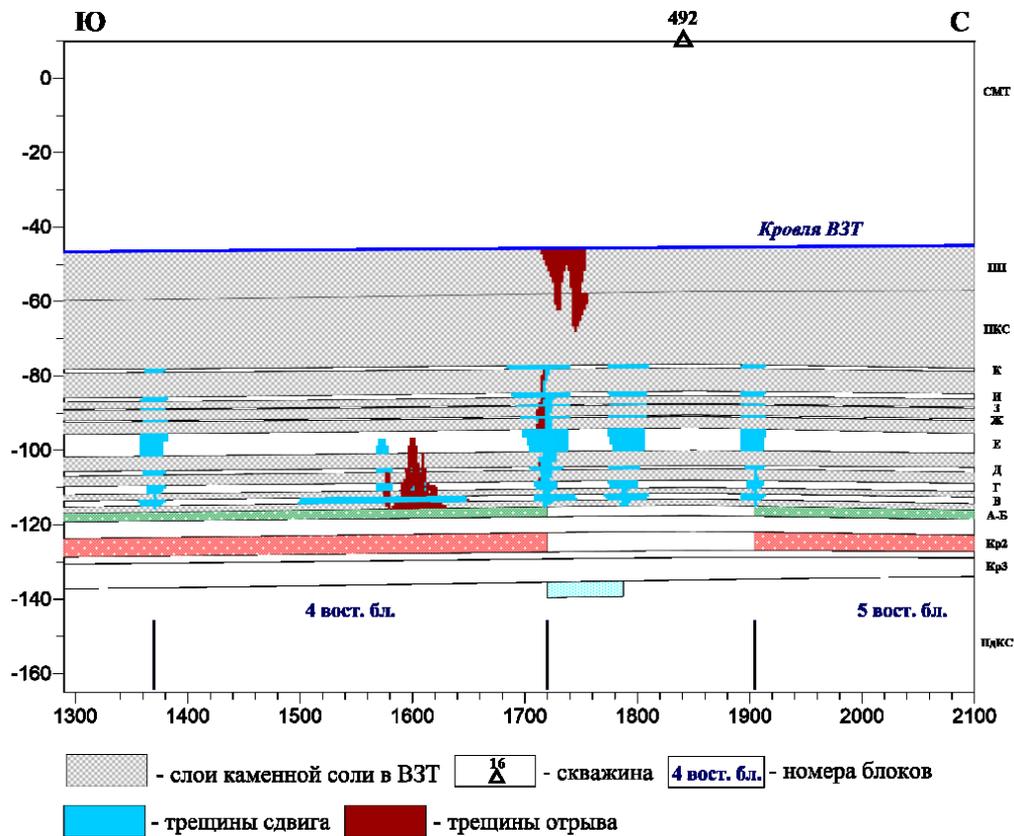


Рис. 2. Прогноз характера техногенного нарушения сплошности на 2030 год при подработке южной границы охранного целика со степенью нагружения $C=0,65$

Необходимо отметить, что выражение (1) очень интегрально характеризует опорное давление. Оценка вертикальной компоненты напряжений (рис. 3) в кровле пласта ПдКС демонстрирует значительные перепады в ее распределении в границах охранного целика. Пики в значениях напряжений формируются в 20-ти метровых зонах на границе с отработанным пространством – до $1,77 \gamma H$ на границе с 4-м блоком и до $1,71 \gamma H$ на границе с 5-м. В то же время в центральной части целика вертикальные напряжения оказываются ниже рассчитанных по формуле (4.1). Такой неоднородный характер распределения опорного давления может значительно осложнить создание зоны смягчения в пределах охранного целика.

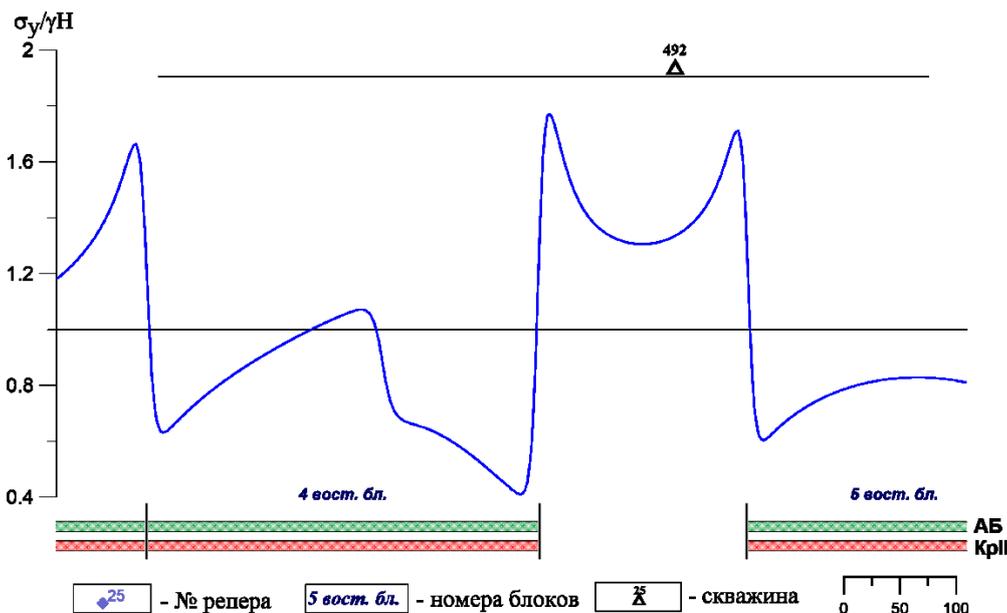


Рис. 3. Распределение опорного давления в кровле подстилающей каменной соли вдоль расчетного профиля на начало 2021 года

Таким образом, при создании зоны смягчения степень нагружения должна рассчитываться с учетом влияния опорного давления. Также следует уделить внимание выбору схемы подработки охранного целика (по всему периметру или со стороны большего градиента оседаний). Вместе с тем следует отметить, что подработка охранного целика связана с высокими рисками. Это уже отмеченный небольшой радиус оставляемого охранного целика и неоднородный характер распределения горного давления в отработываемом пласте КС.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и образования РФ в рамках соглашения по государственному заданию № 075-03-2021-374 от «29» декабря 2020 г.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Baryakh A.A., Sanfirov I.A., Fedoseev A.K., Babkin A.I., Tsayukov A.A. Seismic-Geomechanical Control of Water-Impervious Strata in Potassium Mines // Journal of mining science. – 2017. – V. 53, № 6. – P. 981–992. – DOI: 10.1134/S1062739117063041.
2. 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.
3. Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике. – М.: Мир, 1975. – 541 с.: ил.
4. Указания по защите рудников от затопления и охране подрабатываемых объектов в условиях Верхнекамского месторождения калийных солей: утв. ПАО «Уралкалий», ЗАО «Верхнекамская калийная компания», ООО «ЕвроХим-Усольский Калийный комбинат». – введ. в действие 30.03.2017 в ред. 2014 г. – Пермь; Березники, 2014. – 130 с.