

ных ранее площадях, где производилась закладка выработанного пространства, или где камеры были погашены вследствие естественных процессов деформирования и разрушения податливых целиков.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках государственного задания (рег. номер НИОКТР 124020500031-4)

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Барях А.А., Бельтюков Н.Л., Самоделкина Н.А., Токсаров В.Н. Обоснование возможности повторной отработки запасов калийных руд // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2020. – № 3. – С. 85-97. DOI: 10.15372/FTPRPI20200309.
2. Методические указания по определению несущей способности целиков / сост.: Ф.П. Бублик; ВНИМИ. – Л., 1974. – 90 с.
3. Указания (мероприятия) по защите рудников ПАО «Уралкалий» от затопления и охране объектов на земной поверхности от вредного влияния подземных разработок на Верхнекамском месторождении солей. Ч. 1. Основные положения: утв. ПАО «Уралкалий». – Пермь, Березники, 2022 г. – 118 с.
4. Борзаковский Б.А., Папулов Л.М. Закладочные работы на Верхнекамский калийных рудниках: справ. – М.: Недра, 1994. – 234 с.

УДК 622.847

DOI:10.7242/echo.2024.4.8

МЕТОДИКА РАЙОНИРОВАНИЯ ШАХТНЫХ ПОЛЕЙ РУДНИКОВ ВКМКС ПО СТЕПЕНИ ОПАСНОСТИ ИХ ЗАТОПЛЕНИЯ НА ОСНОВЕ ИНЖЕНЕРНЫХ КРИТЕРИЕВ И МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

А.В. Евсеев¹, И.А. Жукова²
¹ Горный институт УрО РАН, г.Пермь
² ПАО «Уралкалий», г. Березники

Аннотация: В статье приведен один из вариантов районирования шахтных полей калийных рудников по степени опасности нарушения сплошности водозащитной толщи. Принятый поэтапный подход реализуется на основе инженерных критериев безопасности и методов математического моделирования. Методика позволяет своевременно выявлять потенциально опасные участки с целью дальнейшего принятия мер для предотвращения аварийных ситуаций. Рассмотрено применение методики на примере одного из действующих рудников ВКМКС.

Ключевые слова: водозащитная толща, устойчивость ВЗТ, критерии сохранности ВЗТ, категория опасности, районирование.

Важнейшей особенностью строения ВКМКС является легкая растворимость пород водозащитной толщи (ВЗТ), которая отделяет продуктивные пласты от водоносных горизонтов. Интенсивное деформирование подработанного массива может привести к формированию сквозной зоны трещиноватости и проникновению пресных вод в выработанное пространство с последующим затоплением шахты. История горного дела знает множество случаев потери рудников в результате аварийных водопритокков, произошедших в разных странах мира [1]. Известный канадский горный инженер А.Ф. Пруггер отметил: «Верным, вероятно, является утверждение, что из всех калийных рудников, введенных в эксплуатацию, потерянных в результате затопления больше, нежели действующих» [2]. В процессе освоения Верхнекамского месторождения

затопленными оказались рудники БКПРУ-3 (1986 г.) и БКПРУ-1 (2006 г.), с 2014 г. продолжается борьба с поступающими пресными водами на руднике СКРУ-2.

Мировая практика свидетельствует о том, что наиболее надёжным способом обеспечения сохранности водозащитной толщи является применение камерной системы разработки с поддержанием вышележащей толщи на «жестких» междукамерных целиках с последующей закладкой очистных камер солеотходами. Такая технология обеспечивает плавное оседание подработанного массива, а закладка ограничивает величину максимальных деформаций. Параметры ведения горных работ выбираются с учётом особенностей геологического строения ВЗТ, которое определяется путем бурения разведочных скважин и уточняется в процессе отработки геофизическими методами. Контроль процесса деформирования несущих элементов системы разработки и подработанной толщи осуществляется на подземных наблюдательных станциях и по профильным линиям грунтовых реперов на земной поверхности, ведется визуальное обследование выработанного пространства.

Для предотвращения возникновения аварийных ситуаций и своевременного принятия мер охраны выполняется оценка текущего состояния водозащитной толщи и осуществляется прогноз на различные периоды времени (как правило, на конец срока службы рудника и на конец процесса сдвижения). По мере отработки новых площадей, изменения геомеханической обстановки, уточнения геологической информации и внесения дополнений в требования нормативных документов выполняется актуализация потенциально опасных по нарушению сплошности ВЗТ участков. Как правило, периодичность таких работ составляет около 5 лет.

В 2023 году была принята новая редакция «Указаний по защите рудников от затопления...» [3], в которой наряду с ранее принятыми критериями безопасности подработки ВЗТ проводится проверка параметров отработки по критерию допустимых и предельных наклонов, выраженному отношением максимального прогиба ВЗТ к глубине горных работ [4]. Важно отметить, что с момента начала отработки первого на ВКМКС рудника прошло уже более 90 лет. За это время неоднократно пересматривались инструкции и методики выбора параметров системы разработки, уточнялась геологическая информация, развивались деформационные процессы. Всё это привело к необходимости актуализации потенциально опасных участков действующих рудников.

Может быть предложено несколько способов ранжирования отработанных участков по степени опасности. В соответствии с одним из подходов [5], оценку предлагается производить по комплексу факторов, которые можно условно разделить на три группы: природные условия разработки, уровень техногенного воздействия на водозащитную толщу и фактическую реакцию подработанного массива на реализованные параметры разработки. К первой группе относятся такие параметры, как допустимые прогибы водозащитной толщи и прочностные свойства обрабатываемых пластов. Вторую группу составляют степень нагружения междукамерных целиков, степень подработанности ВЗТ, коэффициент закладки, а также время, прошедшее с момента отработки. Показатели, относящиеся к третьей группе, характеризуют интенсивность проявления горного давления и определяются оседанием земной поверхности, состоянием горных выработок и сейсмической активностью. По совокупности частных расчетных коэффициентов оценивается комплексный показатель опасности. Проблема данного подхода заключается в необходимости введения весовых коэффициентов влияния различных факторов на результирующий показатель. Вместе с тем, такой подход позволяет выявить неблагоприятные участки, требующие организации комплексного мониторинга и детального изучения. Широкое распространение получила практика выполнения дополнительных геофизических работ с последующим комплексным анализом методами математического моделирования [6]. Расчётные модели, учитывающие фактические оседания зем-

ной поверхности и выявленные аномалии в строении ВЗТ, позволяют выполнять оценки состояния ВЗТ на заданные периоды времени вплоть до конца процесса сдвижения. В зависимости от участка, моделирование может выполняться в плоской (по линейному профилю) или в трехмерной постановке.

В соответствии с принятой на сегодняшний день классификацией, к 1 категории опасности относятся участки, в пределах которых существуют предпосылки для образования сквозных субвертикальных трещин в процессе отработки рудника. Вторая категория опасности присваивается участкам, в пределах которых нарушение сплошности прогнозируется на конец процесса сдвижения, к третьей относятся участки, где на конец процесса сдвижения суммарная мощность ненарушенных слоёв ВЗТ менее допустимой.

Наличие большого объёма геологической информации, разнообразие зон отработки с различными параметрами и накопленных данных по сдвижению потребовало выбора определенной последовательности анализа. На первом этапе выполнялась проверка отработанных участков на соответствие требованиям нормативных документов по критерию суммарной мощности ненарушенных слоёв ВЗТ и по критерию допустимых и предельных наклонов. Такая оценка учитывает строение ВЗТ и параметры ведения горных работ. Проверка выполняется по всем границам смены параметров отработки и у постоянно остановленных границ (граница с целиком). Следующая проверка включала анализ фактически измеренных оседаний земной поверхности по профильным линиям и сравнение их с предельной величиной. В случае нарушения критериев на границе блоков, соответствующая категория опасности присваивалась блоку, который определяет формирование неблагоприятной ситуации. На данном этапе анализа участкам, где критерии безопасности не выполняются на конец процесса сдвижения, присваивается третья категория опасности. Принимается, что превышение допустимых величин деформаций на текущий момент может привести к формированию сквозной зоны трещиноватости на конец процесса сдвижения, и таким участкам присваивается вторая категория опасности.

На следующем этапе выполнялся анализ результатов всего выполненного на шахтном поле объёма сейсмогеомеханических исследований. Моделирование позволяет оценить сроки формирования и развития зоны трещиноватости в породах ВЗТ. Опасность в блоке либо подтверждалась, либо корректировалась, причём в сторону как уменьшения категории опасности, так и увеличения. Участкам шахтного поля, в пределах которых по результатам математического моделирования нарушение сплошности ВЗТ прогнозируется в процессе отработки рудника, присваивалась первая категория опасности.

Такой фактор, как превышение степени нагружения междукамерных целиков, учитывался на участках, где не выполнялся сейсмогеомеханический контроль. При отсутствии сейсмогеомеханических исследований участкам, в пределах которых степень нагружения междукамерных целиков превышает нормативное значение более чем на 10%, присваивалась категория опасности не ниже 3.

В качестве примера на рис. 1 рассмотрен участок шахтного поля одного из рудников. Блок 129 граничит с блоками 97, 127, 159, 2 ЮЗП и 3 ЮЗП. Допустимые деформации ВЗТ на данном участке определяются исходя из строения ВЗТ (минимально допустимой мощности ненарушенных слоёв) и предельных наклонов (для конкретной степени нагружения целиков и глубины отработки) и составляют $[V_m] = 3,8$ м, $[V_i]_п = 1,5$ м соответственно. Участок обрабатывался в 1965-76 годах по пластам КрП и АБ, закладка не выполнялась. В 1984-85 годах вследствие разрушения междупластья произошло резкое увеличение скоростей оседаний (профильная линия заложена в 1968 году). На текущий момент фактические оседания достигли 3,2 м, расчетные оседания на конец

процесса сдвижения составят 5,8 м. В ходе сравнения оседаний на смежных участках установлено, что на текущий момент времени величина ΔV уже превышает критическую величину $[V_i]_n$ на границе с 3 ЮЗП (оседания на текущий момент составляют 1,5 м). На конец процесса сдвижения перестанут выполняться критерии безопасности на границе с 2 ЮЗП и блоком 159. На данном этапе анализа блоку 129 присваивается 2 категория опасности. Выполненное сейсмогеомеханическое моделирование показало, что на конец процесса сдвижения на границе между 129 блоком и 2 ЮЗП формируется зона трещиноватости (рис. 1б), на границе со 159 блоком сохранность ВЗТ обеспечивается вплоть до окончания процесса сдвижения (рис. 1в). На основании комплексного анализа с учетом сейсмогеомеханических исследований блоку 129 присвоена вторая категория опасности. Рекомендовано провести дополнительные исследования на границе между 129 блоком и 3 ЮЗП, по результатам которого категория опасности может быть скорректирована. По описанной технологии выполнено районирование всех отработанных площадей шахтного поля.

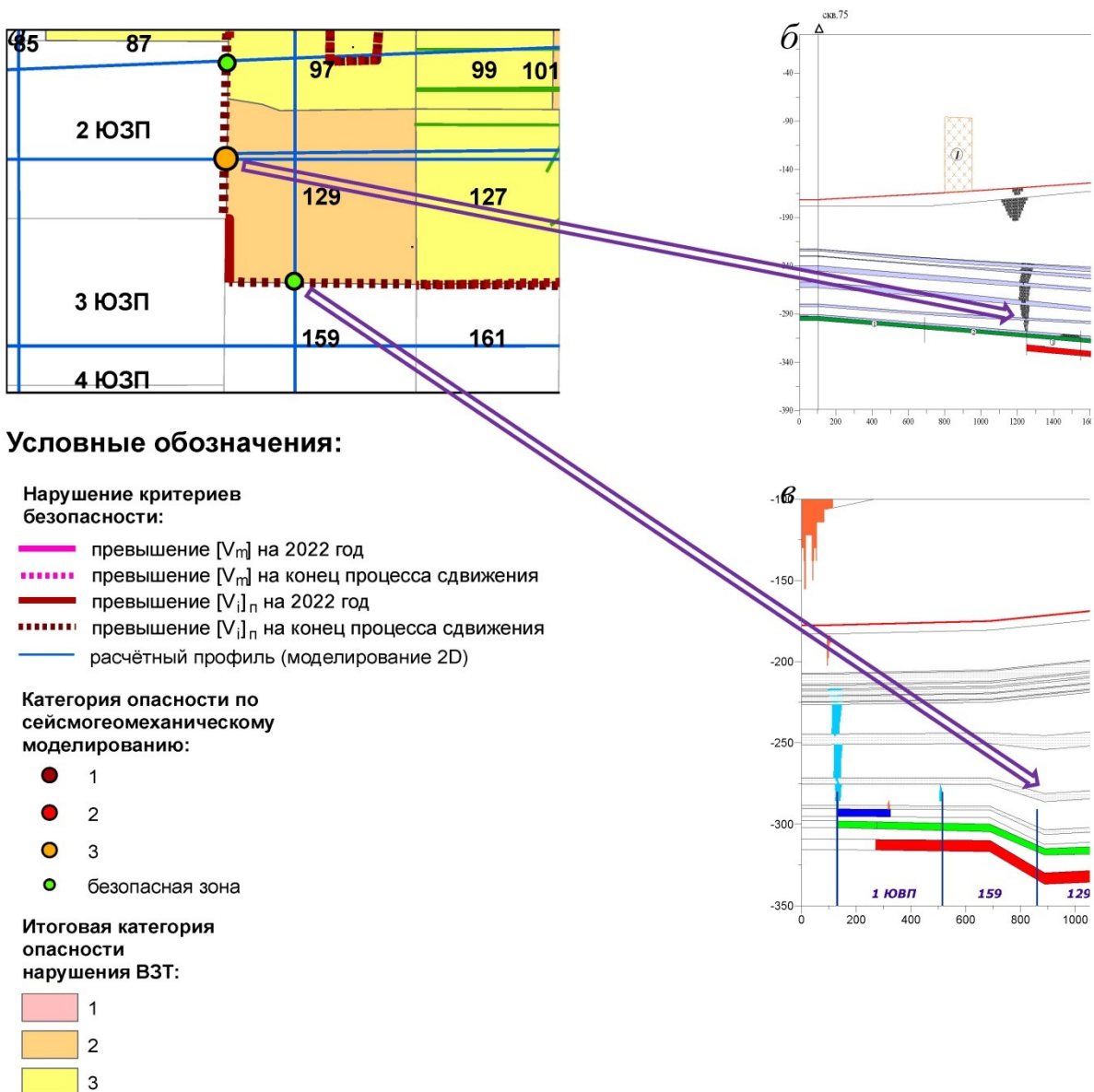


Рис. 1. Анализ участков на соответствие «Указаний...» [3] (а) и результаты сейсмогеомеханического моделирования ВЗТ по расчётным профилям на конец процесса сдвижения (б, в).

Таким образом, после систематизации и анализа имеющейся информации выделены участки, в пределах которых ожидается нарушение целостности ВЗТ на различные периоды времени, а также границы между смежными участками, по которым не выполняются инженерные критерии безопасности и требуются дополнительные исследования. На основе построенных карт рекомендуется выполнить сейсмогеомеханические исследования на границах участков, где критерии безопасности, предусмотренные «Указаниями...», на текущий момент уже не выполняются. Для объектов первой, второй и третьей категории рекомендуется разработать проект мониторинга, в котором должны быть определены его элементы, включающие наблюдения за сдвижением земной поверхности, визуальный и инструментальный контроль выработанного пространства, геофизические и геомеханические исследования.

По результатам районирования для снижения риска возникновения аварийных ситуаций оценивается необходимость и планируются закладочные работы, рассматривается возможность и целесообразность создания зон смягчения, определяется периодичность обследования выработанного пространства, а также необходимость и сроки применения других доступных горных мер охраны, вплоть до мокрой ликвидации отдельного участка шахтного поля или всего рудника с целью исключения образования провалов в дальнейшем в случае прорыва пресных вод в выработанное пространство.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках государственного задания (рег. номер НИОКТР 124020500031-4)

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Барях А.А., Евсеев А.В. Ликвидация калийных рудников и соляных шахт: обзор и анализ проблемы // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2019. – № 9. – С. 5-29. – DOI: 10.25018/0236-1493-2019-09-0-5-29.
2. Prugger F.F., Prugger A.F. Water problems in Saskatchewan potash mining – what can be learned from them // CIM Bulletin. – 1991. – V. 84, № 945. – P. 58-66.
3. Указания (мероприятия) по защите рудников ПАО «Уралкалий» от затопления и охране объектов на земной поверхности от вредного влияния подземных разработок на Верхнекамском месторождении солей. Ч. 1. Основные положения: утв. ПАО «Уралкалий». – Пермь, Березники, 2022 г. – 117 с.
4. Барях А.А., Тенисон Л.О. Обоснование инженерных критериев безопасной подработки водозащитной толщи на Верхнекамском месторождении солей // Горный журнал. – 2021 – № 4. – С. 57-63. – DOI: 10.17580/gzh.2021.04.08.
5. Барях А.А., Асанов В.А., Токсаров В.Н., Аникин В.В. Методика оценки потенциальной опасности нарушения сплошности водозащитной толщи на отработанных участках калийных рудников // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2011. – № 9. – С. 19-24.
6. Барях А.А., Санфиоров И.А., Федосеев А.К., Бабкин А.И., Цаюков А.А. Сейсмогеомеханический прогноз состояния водозащитной толщи на калийных рудниках // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2017. – № 6. – С. 10-22. – DOI: 10.15372/FTPRPI20170602.