

ГОРНОТЕХНИЧЕСКИЕ АВАРИИ: ЗАТОПЛЕНИЕ ПЕРВОГО БЕРЕЗНИКОВСКОГО КАЛИЙНОГО РУДНИКА



А.А. Барях,
доктор технических наук,
заместитель директора
Горного института УрО РАН



А.Е. Красноштейн,
член-корреспондент РАН,
доктор технических наук,
директор Горного института
УрО РАН



И.А. Санфиров,
доктор технических наук,
заместитель директора
Горного института УрО РАН

Обсуждаются причины крупномасштабной аварии на Первом Березниковском калийном руднике, связанной с прорывом надсолевых вод и затоплением горных выработок. Рассматриваются негативные последствия аварии, обусловленные растворением соляных пород пресными водами. Представлена система комплексного мониторинга развития аварийной ситуации, направленная на локализацию последствий затопления рудника для урбанизированной территории.

Горнодобывающая калийная промышленность является поставщиком минерального сырья для производства калийных удобрений, потребление которых с каждым годом увеличивается. Россия занимает одно из ведущих мест в мире по производству хлористого калия. Вся российская добыча калийных солей в настоящее время сосредоточена в пределах одного Верхнекамского месторождения, расположенного на территории Пермского края. Верхнекамское месторождение калийных солей (ВКМКС) является вторым в мире по разведанным запасам – более 3,8 млрд тонн.

Основной особенностью подземного способа разработки калийных и соляных месторождений является необходимость

сохранения водонепроницаемости пачки пород, расположенной между кровлей верхнего обрабатываемого пласта и подошвой первого снизу водоносного горизонта, называемой в горной практике водозащитной толщей (ВЗТ). Эта особенность в значительной мере осложняет разведку и разработку месторождений, которые должны вестись способами, исключающими возможность проникновения воды в рудник. При нарушении сплошности ВЗТ пресные или слабоминерализованные воды, растворяя соляные породы, размывают трещины, что ведет к увеличению водопритока и затоплению рудника. Чтобы избежать этого, на калийных и соляных рудниках, как правило, применяют камерную систему разработ-

ки, при которой вышележащая толща пород поддерживается регулярно оставляемыми междукамерными целиками.

Несмотря на применяемые меры защиты рудников от затопления, в практике разработки месторождений водорастворимых руд на всех континентах имеют место достаточно многочисленные случаи аварийных рассолопроявлений в горные выработки.

Известный канадский горный инженер А.Ф. Пруггер в своей работе «Уроки затопления калийных рудников Саскачевана» отметил: «Верным, вероятно, является утверждение, что из всех калийных рудников, введенных в эксплуатацию, потерянных в результате затопления больше, нежели действующих».

Колыбелью мировой калийной промышленности является Штасфуртская седловина в Германии. Здесь в 1851 году бурением было вскрыто залегание калийных солей и начата проходка шахтного ствола. Этот год считается годом рождения калийной горнодобывающей отрасли. Уже через 15 лет после начала разработки калийных месторождений был затоплен один из калийных рудников. Общее число затопленных калийных рудников и соляных шахт на территории Германии превысило 80 [1]. В 1975 году был затоплен восстановленный после консервации в 1940 году калийный рудник «Ронненберг».

Анализ аварийных водопроявлений на шахтах и рудниках Германии показал [2], что в начальный период их существования главной причиной прорывов рассолов и вод в выработанное пространство являлась недостаточная информация о геологии и гидрогеологии участков месторождений, вовлекавшихся в эксплуатацию. Пять рудников в Магдебург-Гальберштадском бассейне были затоплены в результате отсутствия сведений о наличии и характере последствий тектонических воздействий на поднятие соленосной толщи. Практически при отсутствии ВЗТ велись работы на затопленных рудниках «Иессенитц» и «Фридрих-Франц». По мере повышения качества геологического и гидрогеологического обеспечения горных работ уменьшилась опасность катастрофического исхода водопроявлений. В тех случаях, когда параметры системы разработки, способы управления горным давлением (закладка выработанного пространства) принимались в соответствии с

горно-геологическими условиями выемки, добыча калийной руды осуществлялась в течение многих лет при контролируемых притоках рассолов.

В числе бассейнов мира с наиболее неблагоприятными горно-геологическими условиями разработки калийных руд находится самое крупное – Саскачеванское месторождение (Канада). Для расположенных на его территории калийных рудников характерны достаточно интенсивные водопроявления. Они могут быть условно разделены на две группы [2]: прорывы вод вследствие вскрытия зон нарушений, гидравлически связанных с водоносными породами (затопленный рудник «Пейшнс Лейк», авария на руднике «Роканвилль»); водоприток за счет нарушения сплошности пород, вмещающих разрабатываемый пласт (рудники «Колонсей», «Ванской»). Следует отметить, что за 30 лет эксплуатации Саскачеванского месторождения накоплен громадный опыт борьбы с рассолопроявлениями, который включает детальную разведку строения породного массива различными методами, отлаженную технологию водоподавления.

В последние десятилетия случаи аварийного затопления отмечены во многих странах: соляные шахты «Вапно» (Польша, 1975 г.), «Джеферсон Исланд» (США, 1980 г.) «Ретсоф» (США, 1994 г.), калийные рудники «Холле» (Республика Конго, 1977 г.), «Пейшнс Лейк» (Канада, 1987 г.) и «Потокан» (Канада, 1997 г.).

Первый аварийный прорыв воды на калийных и соляных месторождениях бывшего СССР относится к 1919 году, когда на участке Соль-Илецкого месторождения в камере высотой 70 м, шириной 25 м и длиной 240 м произошло обрушение потолочины мощностью 25–30 м. На земной поверхности образовалась провальная воронка диаметром 20 м и глубиной 15 м.

В 50-е годы произошли прорывы надсолевых вод в очистные выработки рудников № 7 и 8 Солотвинского месторождения каменной соли, что привело к интенсивному развитию карста. В 1952 году горные работы в руднике № 7 были прекращены. Основная причина возникновения этих аварийных ситуаций – образование водопроводящих трещин в водоупорном целике под воздействием горных работ [2].

В 1979 году вследствие разрушения во

времени междукамерных целиков и развития трещин в породах ВЗТ практически за 36 часов был затоплен Соль-Илецкий рудник № 1.

Две крупнейшие аварии произошли и на Верхнекамском месторождении калийных солей. В 1986 году был затоплен Третий Березниковский калийный рудник. Первые рассолопроявления ($10 \text{ м}^3/\text{ч}$) были обнаружены в начале января 1986 года в камере № 50 западного полублока 8-го блока. Очистные работы при этом продолжались. К 1 марта приток достиг $150 \text{ м}^3/\text{ч}$ и продолжал интенсивно увеличиваться. 9 марта его ориентировочное значение составило $5000 \text{ м}^3/\text{ч}$. 12 марта рассолы пришли на пункты посадки людей в околоствольном дворе. Один из самых мощных калийных рудников прекратил свое существование. Погибло уникальное горношахтное оборудование, конвейерные линии, потеряно около 300 млн т извлекаемых запасов калийных солей. В конце июля над местом прорыва вод сформировался провал на земной поверхности, образование которого сопровождалось взрывом газа. В качестве официальной версии аварии принято заключение о несоответствии параметров и порядка ведения очистных работ конкретным горно-геологическим условиям обработки 8-го блока.

Аварийный водоприток в Первый Березниковский рудник (рудник БКПРУ-1), расположенный непосредственно в пределах города Березники, был зафиксирован 17 октября 2006 года в районе рассолосборника на 4–5-й западных панелях около геологоразведочной скважины № 17. Ориентировочный дебит рассолов составил $300\text{--}400 \text{ м}^3/\text{ч}$ и привел к затоплению двух насосных станций. В период с 18 по 20 октября были задействованы дополнительные насосные мощности суммарной производительностью $600\text{--}650 \text{ м}^3/\text{ч}$, которые позволили справиться с водопритоком в рудник. 28 октября отмечено появление рассолов на 6-й западной панели и увеличение водопритока до $1200 \text{ м}^3/\text{ч}$. В связи с таким высоким дебитом откачка рассолов была прекращена, горные работы остановлены, процесс затопления рудника стал неуправляемым.

Выполненный химический анализ состава рассолов не оставлял сомнений, что в горные выработки поступают воды из надсолевого комплекса. Это однозначно свидетельствовало о нарушении сплош-

ности водозащитной толщи, вероятней всего в восточной части 3–4-й западных панелей, где отработаны два сильвинитовых пласта АБ (1964–1965) и КрII (1976–1977). Закладка очистных камер производилась в 1994–1996 годах в условиях интенсивного проявления горного давления и активизации процесса сдвижения.

На момент аварии максимальные оседания земной поверхности на данном участке превысили 3,7 м. Доступ в выработанное пространство оказался невозможным, вследствие чего точное место прорыва вод не могло быть установлено.

В связи с этим одной из важнейших задач начального этапа аварии являлась локализация зоны нарушения сплошности ВЗТ. Для ее решения применялся комплекс геофизических методов, выполнялись геомеханические исследования.

Геофизические работы проводились в несколько этапов. На начальной стадии изучалось состояние ВЗТ в пределах всего района аварии. Для этого использовался комплекс методов: профильные сейсморазведочные наблюдения по методике многократных перекрытий, электроразведочное зондирование и площадная гравиметрическая съемка. По результатам интерпретации геофизических данных выделено несколько участков с аномальными отклонениями измеряемых параметров, указывающими на возможность нарушения сплошности ВЗТ.

Геомеханические исследования включали трехмерное математическое моделирование изменения под воздействием горных работ напряженно-деформированного состояния породного массива в пределах 2–6-й западных панелей. Схема расчета отражала реальный характер залегания пластов, конфигурацию выработанного пространства, параметры очистной выемки, наличие дополнительного гравитационного воздействия от солеотвала. Численная реализация математического моделирования проводилась по полуаналитической схеме метода конечных элементов, основанной на разложении вектора перемещений в ряд Фурье по одной из координат.

Выделение зоны потенциальной опасности нарушения сплошности ВЗТ производилось по критериям деформаций растяжения и Кулона–Мора. Согласно результатам расчетов отмечено несколько областей, в пределах которых критерийные параметры разрушения достигают



Рис. 1. Пространственное положение зоны возможного нарушения сплошности ВЗТ

наибольших значений. При этом их максимум локализуется в районе восточной части 3–4-й западных панелей, примыкающей с запада к целику под промплощадку и с юга к охранному целику скважины № 17 (рис. 1).

Маркшейдерские наблюдения за движением земной поверхности показали на данном участке увеличение скорости оседания земной поверхности в 4–6 раз по сравнению с наблюдениями 2005–2006 годов.

Для локализации нарушения сплошности ВЗТ в пределах выделенной по результатам геомеханических расчетов зоны выполнялись инженерные сейсморазведочные исследования и площадная электроразведка методом естественного поля. Установлены изменения в сейсморазведочной волновой картине и в значениях ее параметров, вероятно, обусловленные деформационными процессами в нижней части соляно-мергельной толщи на площади ускоренных оседаний земной поверхности (рис. 2). Зона повышенных градиентов потенциалов естественного поля указывала на возможность вертикальных водных перетоков. С учетом всех отмеченных пространственных закономерностей изменения анализируемых параметров эта площадь по геофизическим данным также оценена как место

аварийного поступления вод в рудник. По результатам всего комплекса исследований определена наиболее вероятная зона нарушения водоупорных свойств соляных пород и прорыва вод в горные выработки рудника (рис. 3).

На этапе выполнения этого комплекса исследований установлена также причина аварии, связанная с аномальным строением соляной и надсоляной толщ, которое в условиях отработки двух сильвинитовых пластов с относительно высокой степенью нагружения междукамерных целиков привело к значительным деформациям ВЗТ. Отсутствие зон смягчения около целика под промплощадку и охранного целика вокруг скважины № 17 обусловило наложение краевых эффектов, вследствие чего напряжения в ВЗТ достигли критических значений, ее сплошность нарушилась и произошел прорыв надсолевых вод в горные выработки рудника.

Вторая оперативная геомеханическая задача была направлена на оценку первоначальных последствий повышенных водопритокков в рудник, которые связаны с размывом соляных пород верхней части ВЗТ. Размыв ведет к образованию карстовой полости и создает угрозу обрушения или внезапного проседания вышележащих пород, что представляет опасность для функционирования расположенных в

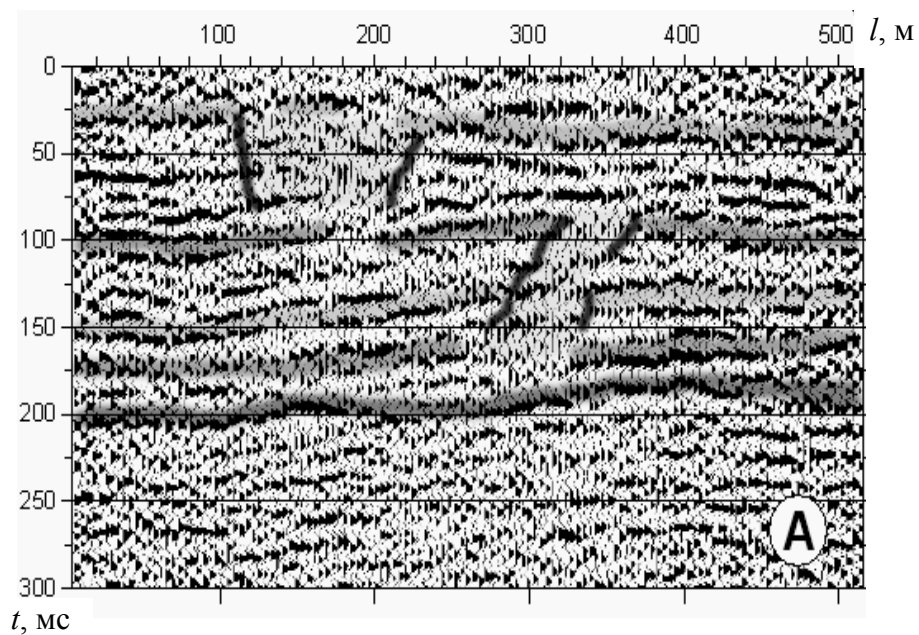


Рис. 2. Временной разрез с признаками нарушения сплошности ВЗТ

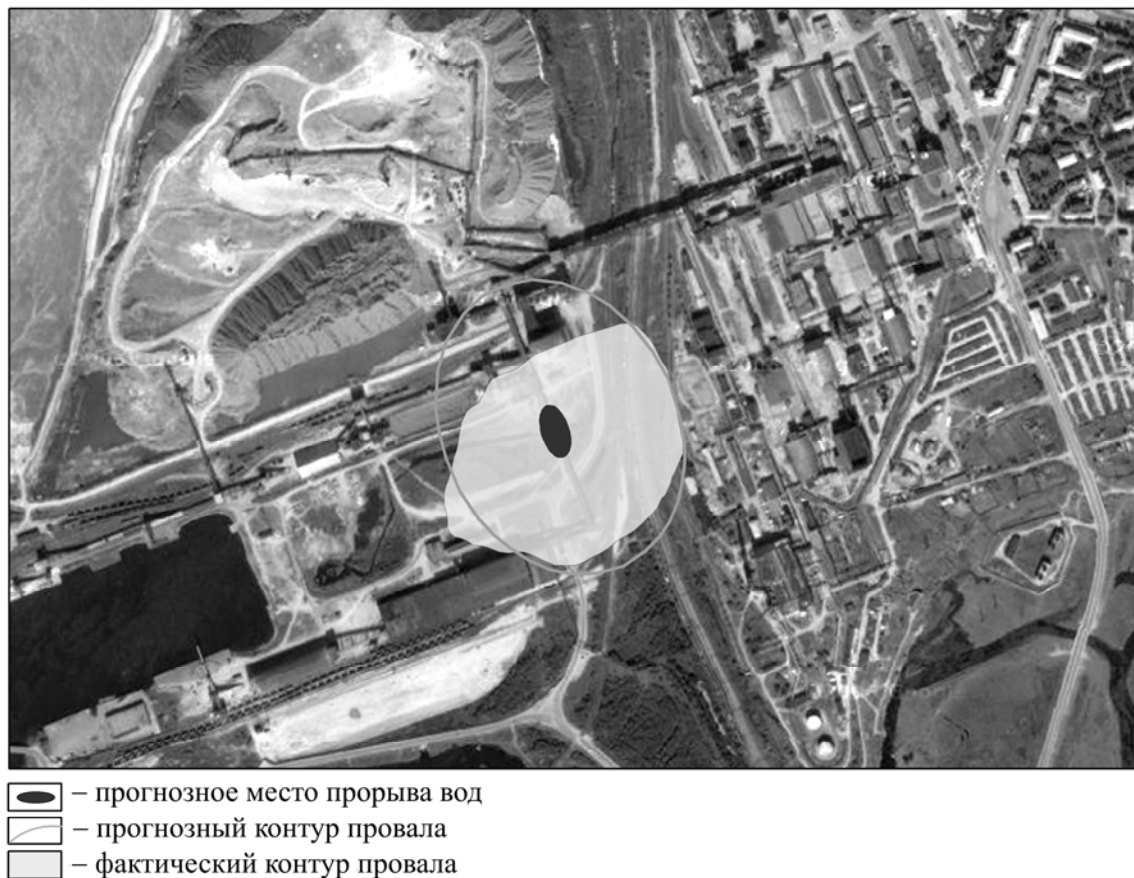


Рис. 3. Схема места прорыва вод и провала на земной поверхности

данном районе трассы федеральной железной дороги, ТЭЦ и промышленных объектов рудника.

Для прогноза возможных размеров карстовой воронки над предполагаемым местом поступления рассолов в горные выработки выполнялось математическое

моделирование процесса разрушения пород надсоляной толщи вследствие размыва верхней части ВЗТ. В расчетах принималось, что латеральный размер карстовой полости не ограничивается вплоть до обрушения вышележащих пород. Математическое моделирование проводилось

в упругой постановке в двух вариантах: без учета динамики разрушения пород и с учетом реализации этих процессов. Дополнительно рассматривался третий вариант расчета, учитывавший наряду с динамикой разрушения пород локализацию пластических деформаций в соляно-мергельной толще (СМТ). Горизонтальный размер карстовой полости в соляной толще варьировался в диапазоне от 100 до 250 м. Характер разрушения пород надсоляной толщи оценивался по прочностным и деформационным критериям (рис. 4).

Результаты расчета по первым двум вариантам достаточно хорошо согласуются между собой. В этих постановках провал над карстовой полостью формируется при протяженности зоны размыва верхней части соляной толщи, равной 250 м, а радиус возможной воронки обрушения на земной поверхности составляет 200 м. Данный размер может рассматриваться в качестве верхней оценки.

Результаты, отражающие развитие в СМТ пластических деформаций, показывают, что образование воронки реализуется при протяженности карстовой полости в 150 м. Ее радиус на земной поверхности оценивается в 130 м.

Ввиду повышенного риска для ответственных объектов прогнозный радиус возможной воронки обрушения на земной поверхности принимался равным 200 м. Контуры воронки отстраивались от предполагаемого места течи (см. рис. 3).

На основании полученных оценок прогнозных размеров возможного провала на земной поверхности административными органами было принято решение о переносе прилегающего участка федеральной железной дороги и выводе людей из производственных объектов, находящихся в опасной зоне.

В конце июля 2007 года в районе предполагаемого места прорыва вод в горные выработки сформировался провал на земной поверхности (рис. 5, а) с первоначальными размерами в плане 55×80 м. В первые месяцы после образования провала активно развивался, скорость его роста достигала 80 м в месяц. Ситуация полностью стабилизировалась лишь к концу 2008 года при поперечных размерах провала 440×320 м (рис. 5, б). Расположение провала достаточно хорошо согласуется с прогнозными оценками, полученными в начальный период аварии (см. рис. 3). В настоящее время провал полностью за-

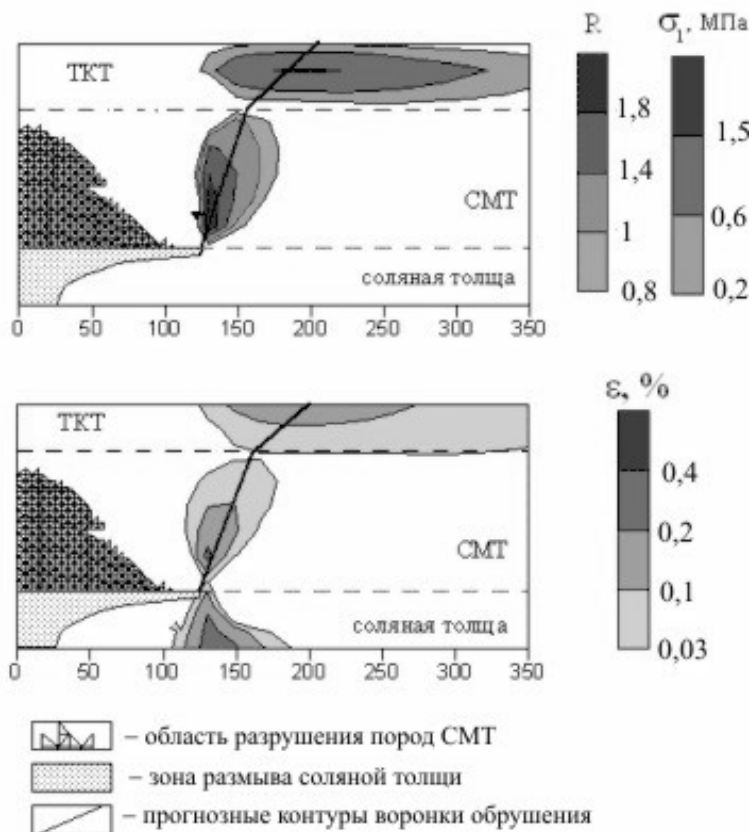


Рис. 4. Оценка характерных размеров зоны обрушения над карстовой полостью



а



б

Рис. 5. Провал на земной поверхности: а – июль 2007 г.; б – октябрь 2008 г.

полнен подземными водами.

Для контроля обстановки в районе возможного образования провала практически с первых дней аварии была развернута современная разноуровневая сеть сейсмологических наблюдений, действовавшая в режиме реального времени, выполнялись периодические сейсморазведочные и газогеохимические исследования. Результаты сейсмологического мониторинга позволяли прогнозировать направление развития провала (рис. 6), что в определенной мере обеспечивало безопасную эксплуатацию трассы железной дороги.

Однако контроль участка провала представлял лишь один, хотя и достаточно важный элемент в общей системе научного сопровождения аварии, ориентированного на прогноз, предупреждение и минимизацию последствий затопления рудника в рамках последовательной реа-

лизации комплексного мониторинга ситуации. Мониторинг осуществлялся в соответствии с разработанным и согласованным с органами Ростехнадзора проектом по нескольким взаимосвязанным направлениям.

Первое направление включало контроль уровня водопритоков и динамику заполнения выработанного пространства, оценку минерализации рассолов и состава атмосферы рудника.

Вторая компонента представляла наиболее актуализированную часть мониторинга и была связана с контролем подработанной территории города Березники и прилегающих районов, в пределах которых расположены ответственные инженерные объекты и сооружения. Необходимость контроля обусловлена тем, что при поступлении слабоминерализованных вод в рудник происходит растворение несущих элементов камерной систе-



Рис. 6. Сейсмологический контроль разрушения пород в районе провала

мы разработки (междукамерных целиков, кровли и почвы камер). Это ведет к интенсификации деформаций подработанного массива, включая и земную поверхность. Для условий рудника БКПРУ-1 последствия растворения соляных пород усугублялись отработкой на значительной площади пласта карналлитовой породы, объемы выщелачивания которой значительно превышают аналогичные показатели по сильвиниту и каменной соли. К тому же даже после окончания затопления рудника растворение карналлита будет продолжаться. Это связано с тем, что плотность рассола, насыщенного по отношению к карналлиту, несколько выше, чем раствора, равновесного только с сильвином и галитом ($1,269 \text{ г/см}^3$ и $1,232 \text{ г/см}^3$ соответственно). Поскольку карналлитовый пласт залегают на гипсометрически более высоких отметках, после заполнения выработанного пространства начнется конвективное перемешивание рассолов. Оно обусловлено оттоком более плотных флюидов из камер карналлитового пласта в наиболее погруженные части рудника и их заменой менее плотными рассолами, ненасыщенными по отношению к карналлиту. Этот процесс приведет к дальнейшему, теоретически полному выщелачиванию карналлита.

Прогноз степени растворения соляных пород выполнялся Санкт-Петербургским филиалом института геоэкологии РАН. Некоторые оценки интенсивности растворения соляных пород предоставлены фирмой «Эркосплан» (Эрфурт, Германия).

Анализ процесса растворения соляных пород производился численно-аналитическим методом с использованием специализированных программных средств и отражал гидравлические условия движения рассолов, диффузионный механизм растворения основных минералов, возможные сценарии развития аварийной ситуации (уровень водопритока в рудник, степень минерализации поступающих рассолов).

На основе результатов гидрогеохимических расчетов построены локальные геомеханические модели деформирования конструктивных элементов камерной системы разработки, соответствующие различным горнотехническим ситуациям и отражающие разную степень деградации несущих элементов в пределах отработанной части шахтного поля.

Локальные расчетные схемы синтезированы в обобщенную трехмерную математическую модель массива, подработанного в пределах всего шахтного поля рудника БКПРУ-1. Данная модель описывает основные особенности геологического строения массива и технологии горных работ (количество отработанных пластов, конфигурацию выработанного пространства, параметры системы разработки и реализованные меры охраны), характер деформирования и разрушения соляных пород под нагрузкой.

В долгосрочных прогнозах (после полного затопления рудника) в геомеханических расчетах учитывалось также воздействие на подработанный массив гидростатического давления рассола в заполненном выработанном пространстве. Его влияние отражалось по схеме полного дренажа, согласно которой давление в процессе деформации массива остается постоянным. Величина поверхностных усилий на почву и кровлю отработанного пласта определялась гидростатическим давлением рассола пропорционально относительной общей «пустотности» выработанного пространства, сформированной вследствие извлечения руды и последующего растворения междукамерных целиков. В рамках упругопластической модели подработанной соляной толщи на участках локализации пластических деформаций ее разгрузка за счет гидростатического подпора осуществлялась по нагрузочной прямой.

В качестве примера на рис. 7. иллюстрируются построенные по результатам математического моделирования прогнозные изолинии горизонтальных деформаций сжатия и растяжения земной поверхности. Данные оценки ожидаемых деформаций сравнивались с соответствующими для конкретных зданий и сооружений значениями допустимых и предельных показателей. На основе этого сопоставительного анализа определялась степень опасности воздействия деформаций подработанной территории на расположенные в ее пределах объекты.

Наряду с прогнозными оценками в постоянном режиме осуществляется инструментальный контроль оседания земной поверхности. Для этого на подработанной территории города Березники расширена сеть маркшейдерских наблюдений. Дополнительно впервые в российской горной практике совместно с Клаузальским



Рис. 7. Прогнозные изолинии горизонтальных деформаций сжатия (-) и растяжения (+) земной поверхности

техническим университетом (Германия) организован режимный площадной контроль сдвижений с использованием спутниковой радарной интерферометрической технологии. Эти исследования базируются на данных спутников ENVISAT и TerraSAR-X. Первый спутник использует длину волны 5,6 см (сантиметровый диапазон) и при проведении спутниковой съемки покрывает площадь примерно 100×100 км. Участок местности записывается каждые 35 дней с однотипными параметрами съемки. Геометрическое разрешение радара составляет порядка 25×25 м. Новый спутник TerraSAR-X (запущен в июле 2007 года Немецким центром воздухоплавания и аэрокосмонавтики) имеет более короткую длину волны (порядка 3,1 см) и работает в рентгеновском диапазоне излучения импульса. Его данные обладают существенно лучшим разрешением (2×2 м) и при съемке покрывают территорию площадью примерно 30×50 км. Временной период облета орбиты и записи сцен, необходимых для построения комбинаций интерферограмм, составляет 11 дней.

При значительных скоростях оседания земной поверхности (до 100 мм/мес. и более) данные интерпретации снимков спутника ENVISAT не обеспечивают достоверных количественных оценок. Более эффективными в этом отношении являются результаты определения оседаний

по снимкам спутника TerraSAR-X. Благодаря высокому геометрическому разрешению и малому периоду облета по данным спутника TerraSAR-X достаточно четко регистрируются значительные скорости оседания земной поверхности (рис. 8, а). При этом адекватные результаты получаются даже на участках с преимущественно растительным покровом (рис. 8, б). Вместе с тем следует отметить, что интерпретация данных спутника TerraSAR-X по участкам с относительно низкими скоростями оседания земной поверхности зачастую является затруднительной.

Таким образом, одновременный анализ снимков спутников ENVISAT и TerraSAR-X позволяет осуществлять оптимальный площадной контроль деформации подработанных территорий в широком диапазоне изменения скоростей оседания земной поверхности.

Основным недостатком космического радарного контроля в условиях города Березники являются сложности оценки оседания земной поверхности в зимний для Урала период (с ноября по март). Наличие в это время снежного покрова и плохие метеоусловия (снегопады) позволяют лишь на качественном уровне сделать выводы об изменении скоростей оседания земной поверхности (увеличение – уменьшение).

Фактическая информация, полученная

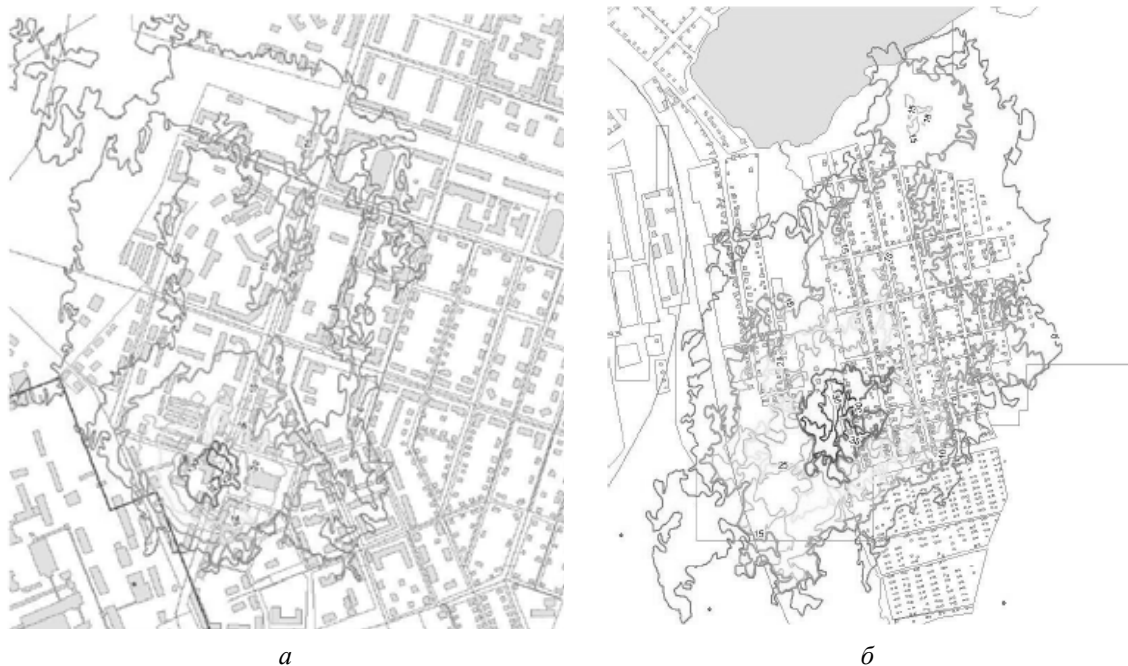


Рис. 8. Оседания земной поверхности (мм) в районе ул. Ленина в г. Березники (а) и в пос. Зырянка (б) за период с 8.07.2008 по 19.07.2008 (11 дней)

по результатам контроля процесса сдвижения инструментальными методами и с применением космических технологий, дает возможность осуществлять постоянный интерактивный прогноз деформаций земной поверхности, обусловленных растворением пород и закладочного материала, путем корректировки соответствующих геомеханических моделей.

В настоящее время с позиции затопления рудника авария завершена. Все горные выработки заполнены рассолами, сформировался гидравлический подпор, идет восстановление уровня подземных вод. Тем не менее, последствия аварии остаются. Они связаны с процессами де-

формации земной поверхности и их воздействием на здания и сооружения, наличием в выработанном пространстве «газовоздушных шапок», подтоплением и заболачиванием территорий вследствие их оседания. В этой связи важность и актуальность комплексного мониторинга аварийной ситуации сохраняется. Его полноценная реализация позволит прогнозировать критические ситуации в пространстве и во времени, своевременно предусматривать необходимые защитные мероприятия, что даст возможность минимизировать негативные последствия затопления рудника для города Березники и прилегающих районов.

Библиографический список

1. Шокин Ю.П. Анализ причин затопления калийных рудников ГДР и ФРГ подземными водами и рассолами / Ю.П. Шокин // Тр. ВНИИГ. – 1969. – Вып. 51. – С. 23–40.
2. Шиман М.И. Предотвращение затопления калийных рудников / М.И. Шиман. – М.: Недра, 1992. – 176 с.