

УДК 622.831

**ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ УСЛОВИЙ  
ОБРАЗОВАНИЯ ПРОВАЛОВ НА ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ  
ПОСЛЕ АВАРИЙНОГО ЗАТОПЛЕНИЯ КАЛИЙНЫХ РУДНИКОВ**

**А. А. Барях, С. Ю. Девятков, Н. А. Самоделкина**

*Горный институт УрО РАН, E-mail: bar@mi-perm.ru,  
ул. Сибирская, 78а, 614007, г. Пермь, Россия*

Рассмотрены условия образования провалов на земной поверхности после завершения активной стадии аварийного затопления калийного рудника. Методами математического моделирования показано, что взаимосвязанными предпосылками реализации этого негативного процесса являются локализация мульды сдвижения на сравнительно небольшой площади, высокие градиенты оседаний в ее краевой части, наличие полости растворения, способной вместить весь объем разрушенных пород. Полученные результаты открывают перспективу для адекватного пространственного и временного прогноза динамического обрушения пород над затопленными рудниками.

*Затопление рудника, растворение пород, провалы, математическое моделирование, разрушение*

Разработка месторождений минеральных солей связана с риском возникновения аварий, обусловленных разрушением водозащитной толщи (ВЗТ), и прорывом пресных или слабоминерализованных вод в горные выработки. Это, как правило, приводит к затоплению и гибели рудников [1]. Известный канадский горный инженер Ф. Пруггер в своей работе отметил: "...что из всех калийных рудников, введенных в эксплуатацию, потерянных в результате затопления больше, нежели действующих" [2].

Последствием прорыва пресных вод является интенсификация вследствие растворения соляных пород, деформаций земной поверхности [3, 4], вплоть до их реализации в динамической форме с образованием провалов, глубина которых может достигать сотен метров [5, 6]. Это создает реальную угрозу разрушения зданий и объектов инженерной инфраструктуры, расположенных на земной поверхности.

Аварийный водоприток в Первый Березниковский рудник (рудник БКПРУ-1), расположенный непосредственно в пределах г. Березники, был зафиксирован 17 октября 2006 г. около геологоразведочной скважины № 17 [7]. Ориентировочный дебит рассолов составил 300–400 м<sup>3</sup>/ч и привел к затоплению двух насосных станций. В период с 18 по 20 октября были задействованы дополнительные насосные мощности суммарной производительностью 600–650 м<sup>3</sup>/ч, кото-

---

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 15-05-04988 А) и частично Российского научного фонда (проект № 16-17-00101).

рые позволили справиться с водопритоком в рудник. 28 октября отмечено 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.

В конце июля 2007 г. в районе предполагаемого места прорыва вод в горные выработки сформировался провал на земной поверхности с первоначальными размерами в плане  $55 \times 80 \text{ м}$ . В первые месяцы после образования провал активно развивался, скорость его роста достигала  $80 \text{ м/мес}$ . Ситуация полностью стабилизировалась лишь после полного затопления рудника (конец 2008 г.) при поперечных размерах провала  $440 \times 320 \text{ м}$ . В настоящее время провал полностью заполнен подземными водами.

Следует отметить, что образование провалов на земной поверхности в месте прорыва вод в горные выработки зачастую сопровождается затоплением соляных шахт и калийных рудников. Исключительные явления представляют повторные провалы, которые происходят через относительно длительное время после затопления рудника [8].

В июле-августе 2010 г. в районе железнодорожного пути станции Березники сначала методами космической радарной интерферометрической съемки [9], а затем инструментальными наблюдениями выявлено локальное по площади увеличение скоростей оседания земной поверхности с  $10\text{--}15$  до  $30\text{--}40 \text{ мм/мес}$ . 25 ноября 2010 г. при проходе грузового состава под железнодорожными путями образовалась воронка, увеличивающаяся в размерах. Первоначальная ее глубина составляла  $7\text{--}10 \text{ м}$ . В 2011 г. провал был засыпан при поперечных размерах  $70 \times 120 \text{ м}$  и средней глубине  $90 \text{ м}$ .

В январе 2011 г. по результатам выполненных мониторинговых исследований выявлен участок, расположенный  $400 \text{ м}$  севернее провала на железнодорожных путях, где существует потенциальная возможность реализации подобных динамических процессов [9]. Данная территория весной 2011 г. была ограждена, доступ людей запрещен. 4 декабря 2011 г. здесь образовался провал на земной поверхности. Первоначальные его размеры составляли  $24 \times 33 \text{ м}$ , примерная глубина  $75\text{--}80 \text{ м}$ . В настоящее время поперечные размеры провала оцениваются в  $130 \times 140 \text{ м}$ .

Априори можно утверждать, что причина образования повторных провалов в первую очередь связана с масштабами затопления рудника БКПРУ-1. Объем заполнения выработанного пространства составил около  $80 \text{ млн м}^3$ , длительность — 2 года. Это привело к интенсификации негативных инженерно-геологических процессов вниз по разрезу подработанного массива и обрушению пород в купольную полость, сформированную в результате растворения соляных пород. Вместе с тем в настоящее время отсутствуют четкие геомеханические критерии реализации подобных явлений, что затрудняет пространственную локализацию потенциально опасных участков и не позволяет обеспечить достоверность временных прогнозных оценок.

#### **ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ**

Образованию провалов после затопления рудника предшествуют повышенные скорости оседаний земной поверхности, наблюдаемые на относительно небольших по площади участках, что ведет к формированию мульд сдвижения с высокими градиентами оседаний в их краевых частях, которые увеличиваются со временем. Согласно проведенным геомеханическим расчетам [10, 11], получение таких градиентов невозможно без введения в расчетную схему ослабленной по прочностным и деформационным свойствам области в интервале верхней части геологического разреза. Для образования провала необходимо также формирование в соляной толще полости растворения, объем которой должен быть достаточным для размещения обрушенных пород. При наличии данных условий создаются предпосылки к переходу статических деформаций подработанного массива в динамическую форму. Отвечающая этим условиям принципиальная схема геомеханических расчетов представлена на рис. 1.

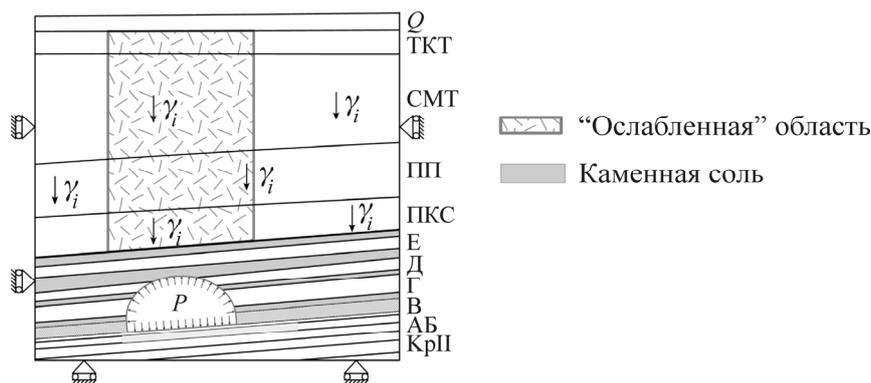


Рис. 1. Обобщенная схема расчета геомеханического состояния подработанного массива:  $Q$  — четвертичные отложения; ТКТ — терригенно-карбонатная толща; СМТ — соляно-мергельная толща; ПП — переходная пачка; ПКС — покровная каменная соль; Е, Д, Г, В — карналлитовые пласты; АБ, КрП — сильвинитовые пласты;  $P$  — гидростатическое давление рассолов

Математическое моделирование эволюции напряженно-деформированного состояния (НДС) затопленного подработанного массива проводилось применительно к горнотехническим и горно-геологическим условиям рудника БПКРУ-1. Геомеханический анализ возможности образования провала на земной поверхности основывался на математическом моделировании процесса деформирования массива, подработанного сильвинитовым пластом АБ и карналлитовым пластом В. Считалось, что выработанное пространство рудника полностью затоплено.

При математическом моделировании учитывались основные особенности строения подработанного массива, действие массовых сил, интенсивность  $\gamma_i$  которых определялась удельным весом пород  $i$ -го элемента геологического разреза. Граничные условия формулировались исходя из следующих соображений: верхняя граница (дневная поверхность) принималась свободной, выбранные размеры исследуемой области обеспечили равенство нулю на нижней границе вертикальных, а на боковых границах — горизонтальных перемещений.

Выработанное пространство моделировалось средой с пониженными по отношению к породам вмещающего пласта свойствами. Степень уменьшения механических свойств определялась фактическими параметрами камерной системы разработки.

Математическое моделирование НДС породного массива проводилось в упругопластической постановке для условий плоского деформированного состояния (ПДС). Учет фактора времени выполнялся на основе модификации метода переменных модулей упругости [12, 13]. Преимущество данного метода заключается в том, что он позволяет отдельно описать временной характер деформирования всех отработанных пластов, легко учесть разницу в сроках их отработки и оценить состояние подработанного массива на произвольный момент времени. Функция ползучести при этом вычисляется с использованием фактических и/или прогнозных графиков нарастания оседаний земной поверхности  $\eta(t)$ :

$$\Phi(t) = \eta(t) / v_0,$$

где  $v_0$  — упругие смещения, связанные с формированием выработанного пространства. Переменный модуль деформации соответствующего отработанного пласта находится соотношением

$$E_i^p(t) = \frac{(1 - \omega)E}{1 + (1 - \omega)\Phi(t)},$$

где  $\omega$  — коэффициент извлечения руды с пласта;  $E$  — модуль деформации породы.

Прогноз деформации земной поверхности после аварийного затопления рудника основывался на учете комплекса факторов, связанных с аварийным прорывом пресных вод в горные выработки [3]: уменьшение ширины междокамерных целиков и увеличение высоты очистных камер вследствие растворения соляных пород; дополнительная закладка, образующаяся за счет процессов выщелачивания; гидростатическое давление рассолов после полного заполнения ими выработанного пространства.

В предаварийный период нарастание оседаний земной поверхности  $\eta(t)$  во времени определяется кривой 1 на рис. 2. С момента начала процесса растворения  $t_1$  до полного заполнения выработанного пространства рассолами происходит увеличение скорости оседания (кривая 2). После полного заполнения выработанного пространства рассолами ( $t > t_2$ ) в результате формирования гидравлического подпора происходит “разгрузка” междокамерных целиков, что обуславливает снижение скоростей нарастания оседаний земной поверхности (кривая 3). В последующий период времени в зависимости от интенсивности процессов растворения может наблюдаться как стабилизация скоростей деформации земной поверхности и их постепенное уменьшение (кривая 3), так и увеличение вертикальных сдвижений (кривая 4).

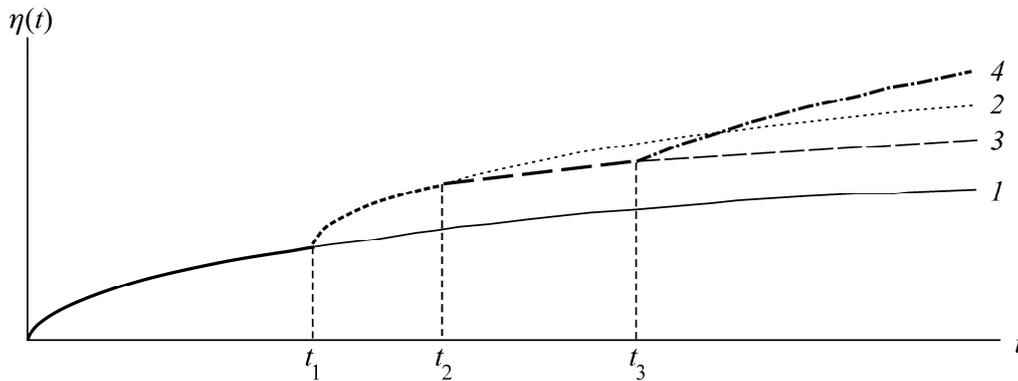


Рис. 2. Характерный график нарастания оседаний земной поверхности в процессе затопления рудника

Следует отметить, что интенсивность деградации несущих элементов камерной системы разработки вследствие растворения и связанные с этими процессами оседания земной поверхности зависят от целой группы факторов: места прорыва вод, степени их начальной минерализации, дебитов водопритоков, вскрытых горными выработками литотипов соляных пород, и др. В этой связи целесообразно в начальный период аварии провести гидрогеохимическое моделирование процесса затопления с предварительной оценкой степени деградации междокамерных целиков. В последующем данные результаты должны быть скорректированы в соответствии с реальным развитием процесса сдвижения пород путем решения обратной геомеханической задачи [3].

В качестве определяющего уравнения нелинейной связи напряжений и деформаций использовалась идеальная упругопластическая модель, которая является обобщением упругой и жесткопластической среды с внутренним трением. Паспорт прочности соляных пород описывался параболической огибающей кругов Мора [14], построенной по известным значениям их пределов прочности на растяжение ( $\sigma_r$ ) и сжатие ( $\sigma_s$ ). Условием разрушения соляного массива за счет образования трещин сдвига служило выполнение неравенства

$$K_k = \frac{\tau_{\max}}{\tau_{pr}} = \frac{\tau_{\max}}{\sqrt{(\sigma_p + \sigma_n)[2\sigma_p - 2\sqrt{\sigma_p(\sigma_p + \sigma_s)} + \sigma_s]}} \geq 1. \quad (1)$$

Касательное ( $\tau_{\max}$ ) и нормальное ( $\sigma_n$ ) напряжения определялись на площадках, где отношение  $\tau_{\max} / \tau_{pr}$  достигало максимального значения. В области растяжения предельное напряжение ограничивалось пределом прочности на растяжение:

$$\sigma_1 = \sigma_r. \quad (2)$$

При вычислении значения предельного касательного напряжения  $\tau_{pr}$  учитывалась зависимость прочностных параметров соляных пород (пределов прочности на одноосное растяжение и сжатие) от времени путем введения в расчет коэффициента длительной прочности, полученного по результатам реологических испытаний [15].

Численная реализация задачи осуществлялась методом конечных элементов в перемещениях [16] с дискретизацией рассматриваемой области на треугольные элементы первого порядка. Решение упругопластической задачи основывалось на методе начальных напряжений [17, 18] в соответствии со следующей процедурой. Если значения главных напряжений  $\{\sigma^e\}$  в произвольном конечном элементе, определенные по закону Гука, превышали предельные  $\{\sigma^{pr}\}$ , то в рамках итерационной процедуры проводилась их корректировка на величину  $\{\Delta\sigma\} = \{\sigma^e\} - \{\sigma^{pr}\}$ . В дальнейших расчетах  $\{\Delta\sigma\}$  принимались в качестве начальных напряжений и на каждой итерации суммировались. Вычислительный процесс завершался, когда все компоненты  $\{\Delta\sigma\}$  во всех конечных элементах не превышали наперед заданное малое значение.

Локализация пластических деформаций в физическом смысле трактовалась как разрушение соляных пород в области сжатия в результате развития трещин сдвига, в области растяжения — трещин отрыва [19, 20].

Воздействие на подработанный массив гидростатического давления рассола  $P$  в расчетной схеме соответствовало условиям полного дренажа, согласно которым давление в процессе деформации массива остается постоянным и равным  $\gamma_p H$ , где  $\gamma_p$  — удельный вес рассола,  $H$  — глубина горных работ. При этом поверхностные усилия на почву и кровлю отработанного пласта определялись гидростатическим давлением рассола, умноженным на относительную общую “пустотность” выработанного пространства, сформированную вследствие извлечения руды и последующего растворения междокамерных целиков.

В расчетной схеме принималось, что на начальном этапе полость растворения формируется на уровне выработанного пространства карналлитового пласта В. На каждом итерационном шаге решения ее размеры изменялись за счет дегградации междокамерных целиков и обрушения пород в зонах локализации трещин отрыва. При этом предполагалось, что одновременно имеет место разрыхление обрушенных пород и выщелачивание содержащегося в карналлитах хлорида магния ( $MgCl_2$ ).

В результате реализации этих процессов происходит заполнение полости продуктами разрушения. Оценка коэффициента заполнения проводилась по формуле

$$k_z = \frac{k_p k_s V_p}{V_0 + V_p}, \quad (3)$$

где  $V_0$  — объем полости растворения;  $V_p$  — суммарный объем разрушенных пород пластов каменной соли и карналлитов;  $k_p$  — коэффициент разрыхления разрушенных соляных пород (принимался в расчетах равным 1.1);  $k_s$  — коэффициент растворения (принимался в расчетах

равным 0.85 с учетом выщелачивания  $MgCl_2$  и выпадения в осадок солей  $NaCl$  и  $KCl$ ). При этих предположениях и условии, что растворению подвержены только карналлитовые пласты, коэффициент заполнения полости оценивается в 0.92.

Отметим, что в случае  $k_z \geq 1$  происходит полное заполнение полости обрушенными породами и переход статических деформаций соляного массива в динамическую форму с образованием провала становится невозможным.

Как уже указывалось, для обеспечения значительных градиентов оседаний земной поверхности необходимым является включение в синтезированную геомеханическую модель “ослабленной” по прочностным и деформационным свойствам области, развитой в верхней части разреза (см. рис. 1).

Таким образом, при математическом моделировании состояния подработанного массива фактические параметры мульды сдвижения и скорости оседания достигались за счет развития полости растворения в соляной толще и постепенного снижения механических свойств пород в верхней части разреза.

Для всех расчетных вариантов определялись поля напряжений и деформаций, по компонентам которых в рамках предложенных критериальных оценок анализировались процессы разрушения соляной толщи.

#### **АНАЛИЗ ФАКТОРОВ, ОПРЕДЕЛЯЮЩИХ ДЕФОРМАЦИЮ ПОДРАБОТАННОГО МАССИВА В ПРОЦЕССЕ РАСТВОРЕНИЯ СОЛЯНЫХ ПОРОД**

При проведении численных геомеханических расчетов принималось, что на участках отработки карналлитовых пород выщелачивание хлорида магния будет продолжаться после затопления рудника еще длительное время [3]. Это связано с тем, что плотность рассола, насыщенного по отношению к карналлиту, несколько выше, чем раствора, равновесного только с сильвином и галитом (1.269 и 1.232 г/см<sup>3</sup> соответственно). Учитывая, что карналлитовый пласт залегает на гипсометрически более высоких отметках, после заполнения выработанного пространства начнется конвективное перемешивание рассолов, вызванное оттоком более плотных флюидов из камер карналлитового пласта в наиболее погруженные части рудника и их заменой менее плотными рассолами, ненасыщенными по отношению к карналлиту. Это приведет к дальнейшему, теоретически полному, выщелачиванию карналлита на отработанных участках, к которым существует прямой доступ рассолов.

Реализация этих процессов обуславливает неоднородный характер деформации подработанного массива с формированием локальных участков активизации оседаний земной поверхности. При этом часто наблюдается миграция зон повышенных скоростей оседания в плане и во времени, что объясняется нестационарным характером растворения карналлитовых пород.

Предположим, что в результате растворения соляных пород интенсивное увеличение скорости оседаний земной поверхности происходит на сравнительно не протяженном участке расчетного профиля. На рис. 3 показана мульда сдвижения, отражающая два состояния подработанного массива: до начала интенсивного растворения (кривая 1) и в процессе выщелачивания хлорида магния (кривая 2). Как видно, кривая 2 при относительно небольшом (порядка 0.7 м) увеличении оседаний земной поверхности имеет значительный градиент их изменения в краевых частях. Это способствует повышению техногенной нагрузки на весь подработанный массив.

Целью данного этапа математического моделирования являлась оценка основных факторов, определяющих характер развития процесса сдвижения вследствие растворения соляных пород в затопленном выработанном пространстве рудника. Это достигалось путем варьирова-

ния размеров полости растворения и механических свойств подработанного массива в пределах “ослабленной” зоны для адекватного теоретического описания фактической мульды оседания земной поверхности (в частности, кривой 2 на рис. 3).

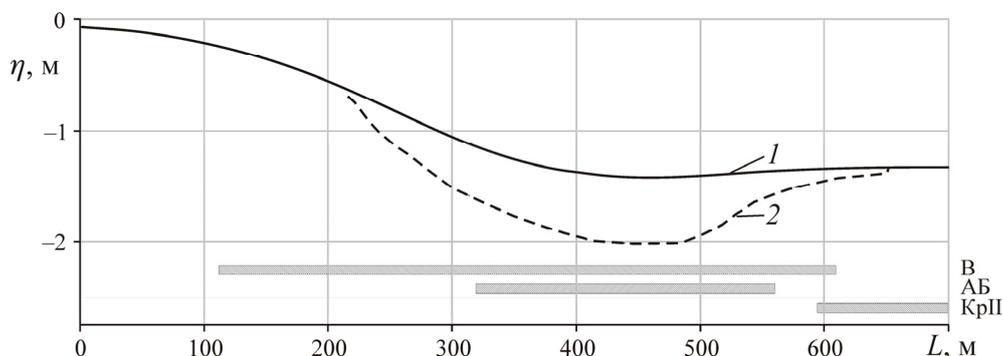


Рис. 3. Мульда сдвижения земной поверхности: 1 — до начала растворения; 2 — в процессе растворения

Результаты многовариантных расчетов показали (рис. 4), что размеры полости растворения определяют максимальные оседания земной поверхности. Уменьшение ее протяженности ведет к снижению максимальных оседаний (рис. 4а), увеличение — к их росту с одновременным расширением мульды сдвижения и, как следствие, выполаживанием ее краевой части (рис. 4б).

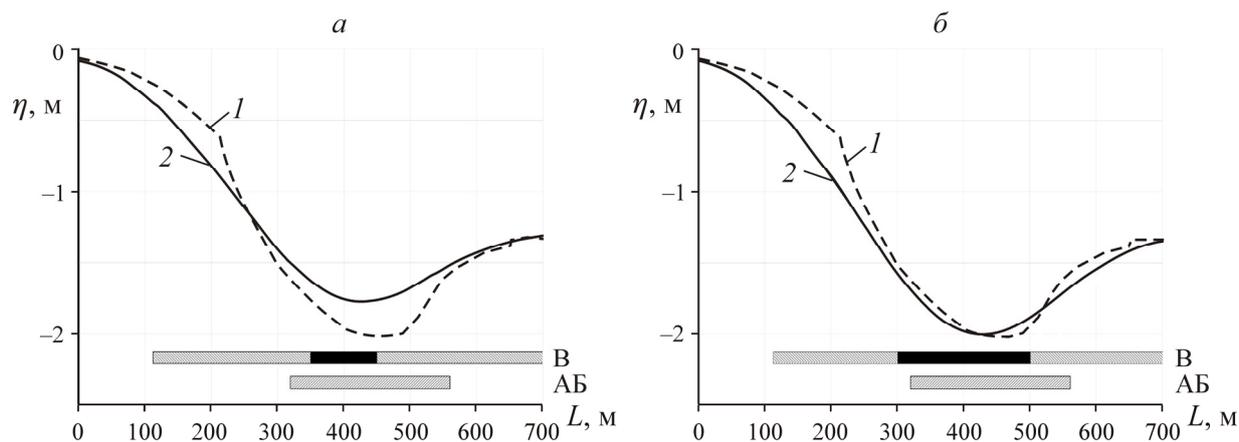


Рис. 4. Оседания земной поверхности (1 — фактическое; 2 — расчетное) при различных размерах полости растворения: а — 100 м; б — 200 м; ■ — полость

Таким образом, только путем вариации размеров полости растворения невозможно добиться приемлемого соответствия расчетных оседаний земной поверхности фактическим, локализованным в пределах относительно небольшой площади. Для обеспечения высоких градиентов оседаний в краевой части мульды сдвижения в расчетную схему вводится “ослабленная” по прочностным и деформационным свойствам зона, развитая в верхней части геологического разреза.

На рис. 5а показаны оседания земной поверхности, когда “ослабленная” зона развита в интервале ТКТ–ПКС при различной степени снижения в ее пределах механических свойств пород; рис. 5б иллюстрирует характер изменения мульды сдвижения при разной глубине распространения “ослабленной” зоны и заданном уровне снижения свойств.

Полученные результаты свидетельствуют, что путем вариации обоих этих факторов (глубины распространения “ослабленной” зоны и степени уменьшения механических свойств) можно добиться приемлемого соответствия расчетной мульды сдвижения и фактической, крае-

вая часть которой характеризуется значительными градиентами оседаний земной поверхности (кривая 1 на рис. 5). Вместе с тем установленные закономерности вносят определенную неоднозначность в параметрическое обеспечение расчетной схемы. Для ее преодоления рекомендуется выполнение инженерных сейсморазведочных исследований, результаты которых позволяют оценить интервал развития “ослабленной” зоны в верхней части геологического разреза.

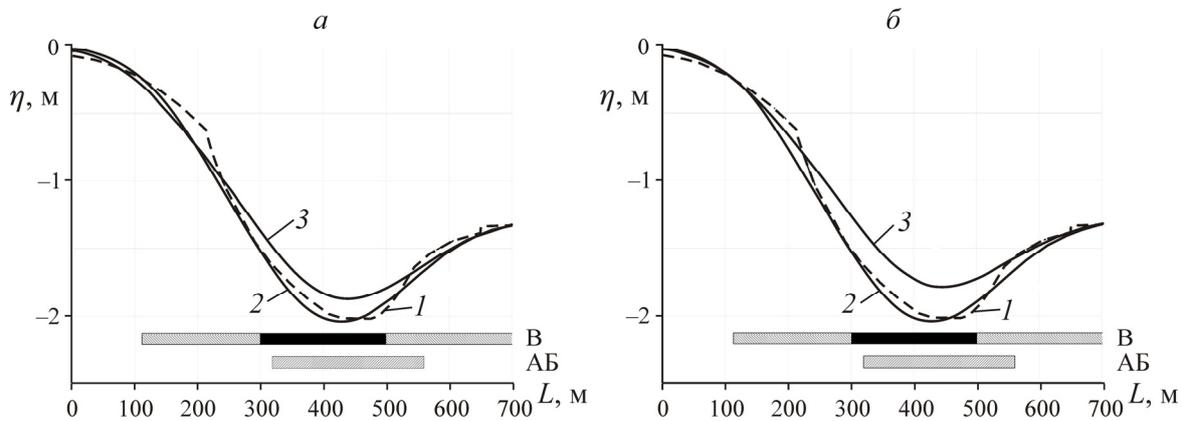


Рис. 5. Характер изменения мульды сдвижения: *а* — при уменьшении свойств пород в пределах “ослабленной” зоны в 1.2 (кривая 3) и 1.4 (кривая 2) раза; *б* — при различной глубине распространения “ослабленной” зоны — интервал ТКТ–СМТ (кривая 3) и ТКТ–ПКС (кривая 2); ■ — полость; кривая 1 — фактическая мульда сдвижения

## РЕЗУЛЬТАТЫ ПРОГНОЗНЫХ ОЦЕНОК ОБРАЗОВАНИЯ ПРОВАЛОВ НА ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ

В соответствии с выполненными исследованиями переходу статических деформаций соляного массива в динамическую форму сопутствуют повышенные скорости оседаний земной поверхности, локализованные на сравнительно небольших участках шахтного поля. При этом оседания в краевых частях мульды сдвижения характеризуются высоким градиентом, который увеличивается со временем. Также важнейшим условием перехода является наличие полости в соляной толще и “ослабленной” области в верхней части геологического разреза. Объединение этих зон создает предпосылки к образованию провала. Объем полости при этом должен быть достаточным для размещения разрушенных пород.

Верификация условий, определяющих возможность образования провалов, проводилась для участка “панели переходного периода” (ППП) затопленного рудника БКПРУ-1 (рис. 6). Здесь в 1940–1950 гг. отработан карналлитовый пласт В. Очистные камеры заложены каменной солью, однако достоверные сведения о степени их заполнения отсутствуют. На данном участке в 1950 г. также проведена выемка сильвинитового пласта АБ. Очистные камеры, вероятней всего, не заложены.

В конце 2011 – начале 2012 г. (через 3 года после полного затопления рудника) в северной части этого участка началась активизация процессов сдвижения. Скорости оседаний земной поверхности в эпицентре локальной мульды составили примерно 70 мм/мес. В течение последующего времени наблюдалась миграция зон максимальных скоростей оседаний. На некоторых реперах их значение достигало 120 мм/мес.

На рис. 6 показаны суммарные оседания земной поверхности на конец 2014 г. Сформировавшаяся здесь мульда сдвижения при относительно небольших поперечных размерах (около 300 м) характеризуется весьма значительными оседаниями земной поверхности: порядка 3.9 м. Это предопределяет высокий градиент оседаний в ее северо-восточной краевой части.

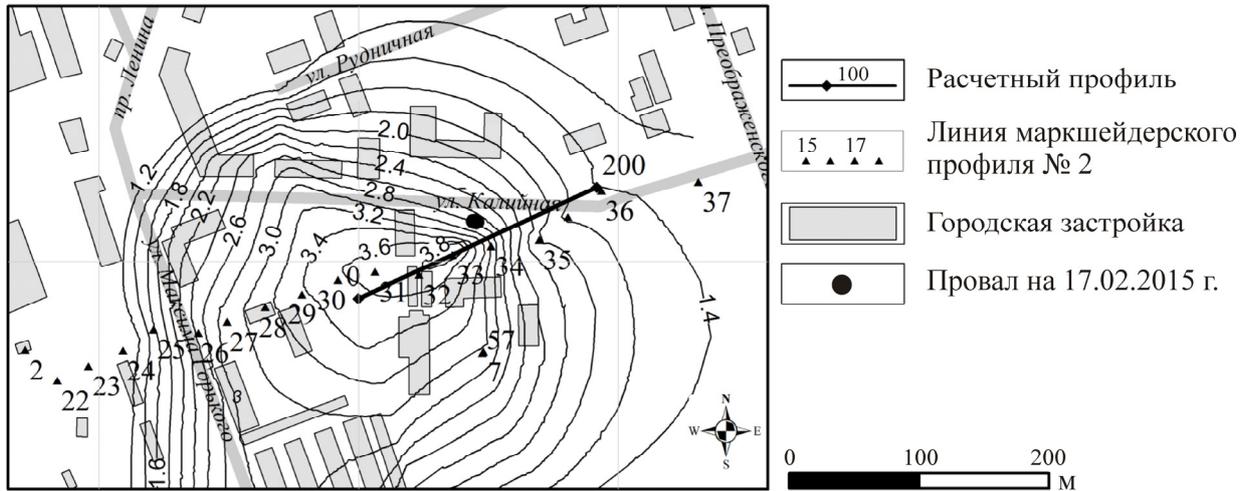


Рис. 6. Обзорная схема района исследований с изолиниями оседаний (м) на конец 2014 г.

Математическое моделирование напряженно-деформированного состояния подработанного массива на затопленном участке ППП выполнялось по геомеханическому расчетному профилю (рис. 6), проходящему с юго-запада на северо-восток через центральную часть мульды сдвижения вдоль маркшейдерской профильной линии № 2.

На рис. 7 приведены расчетные и фактические оседания земной поверхности, соответствующие активизации процесса сдвижения на участке ППП, на различные моменты времени. На рис. 8 представлена динамика разрушения пластов подработанного массива в процессе нарастания оседаний земной поверхности вдоль расчетного геомеханического профиля. Здесь одновременно показано формирование зон трещиноватости за счет сдвига и растяжения.

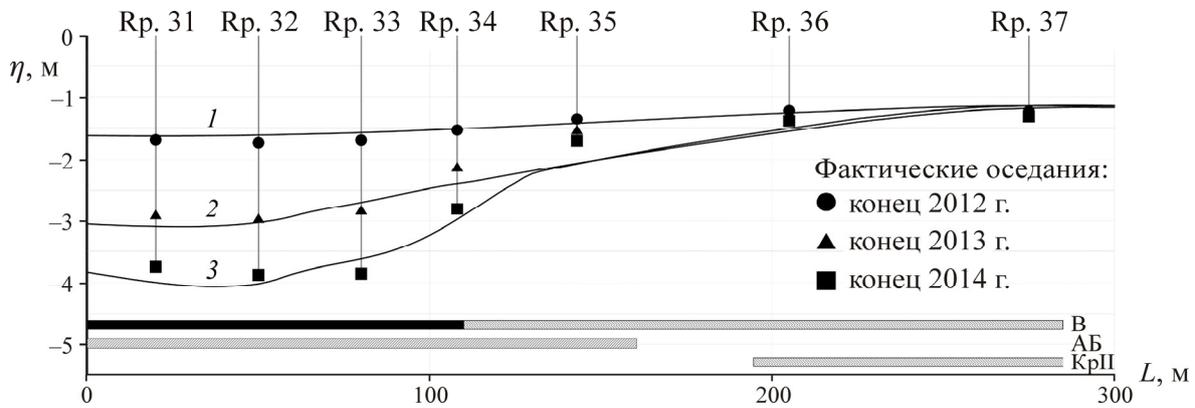


Рис. 7. Расчетные и фактические оседания земной поверхности: 1 — конец 2012 г.; 2 — конец 2013 г.; 3 — конец 2014 г.; ■ — полость

Принималось, что на конец 2012 г. ускорение деформаций подработанного массива происходит за счет уменьшения интегральных механических свойств пород карналлитового пласта В, обусловленное выщелачиванием хлорида магния. Эти предпосылки оказываются достаточными для получения приемлемого согласования между расчетными (кривая 1 на рис. 7) и фактическими оседаниями земной поверхности. Разрушение подработанного массива при этом не наблюдается (рис. 8а).

Дальнейшее нарастание оседаний во времени (конец 2013 г.) происходит со значительными скоростями (см. рис. 7). Результаты математического моделирования показывают, что для адек-

ватного описания этих процессов необходимым является одновременное включение в расчетную схему “ослабленной” зоны, развитой в верхней части геологического разреза, и формирование полости растворения в интервале соляной толщи.

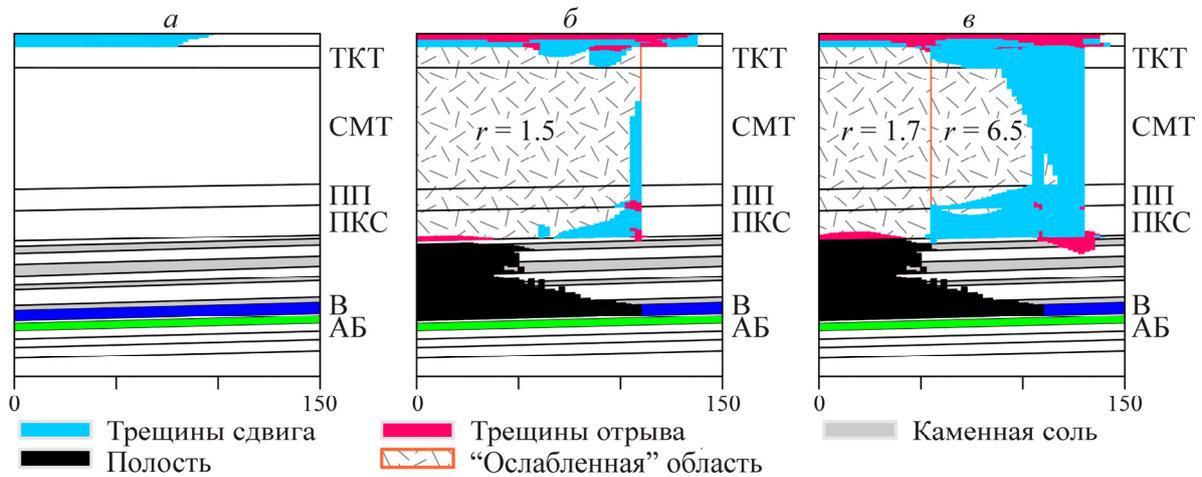


Рис. 8. Характер техногенного нарушения сплошности подработанного массива: *а* — конец 2012 г.; *б* — конец 2013 г.; *в* — конец 2014 г.

Согласно выполненным критериальным оценкам состояния подработанного массива, отмечается быстрое увеличение размеров полости по вертикали и ее выход к почве ПКС уже к концу 2013 г. (рис. 8б) при максимальных оседаниях 3.1 м. Степень снижения механических свойств пород в пределах “ослабленной” зоны по отношению к нормативным значениям принималась равной  $r = 1.5$ . Данные допущения позволили получить вполне удовлетворительное соответствие между расчетной (кривая 2 на рис. 7) и фактической мульдами сдвижения. Деформационные процессы приводят к формированию и инверсионному распространению области техногенной трещиноватости вдоль вертикальной границы “ослабленной” зоны (рис. 8б). Вместе с тем образование сквозной области техногенной нарушенности, способной инициировать образование провала на земной поверхности, на данный момент времени не прогнозируется.

Интенсивное нарастание оседаний земной поверхности наблюдалось в течение 2014 г. (рис. 7). В геомеханических расчетах эти процессы отражались постепенным уменьшением (до  $r = 1.7$ ) механических свойств пород в пределах “ослабленной” зоны (рис. 8в). Отмечено, что более высокие скорости оседания реализовывались в краевой части мульды сдвижения (Рр. 33, 34). Для описания данных эффектов деформирования подработанного массива задана более высокая ( $r = 6.5$ ) степень снижения механических свойств в краевой части “ослабленной” зоны (рис. 8в). Это позволило получить согласование расчетных и фактических оседаний земной поверхности (кривая 3 на рис. 7). Соответствующий характер развития области техногенной трещиноватости представлен на рис. 8в. Как видно, в этом случае возможно формирование сквозной нарушенной зоны, простирающейся от кровли полости растворения до земной поверхности. Таким образом, на конец 2014 г. создаются предпосылки к образованию провала на земной поверхности в северной части участка, подработанного “панелью переходного периода”.

17 февраля 2015 г. в районе репера 34 маркшейдерской линии 2 (см. рис. 6) произошел провал пород. Его начальные размеры в плане составили  $6 \times 7.5$  м. Положение провала полностью согласуется с выполненными расчетами — провал образовался на участке высокого градиента оседаний в краевой части мульды сдвижения.

По результатам математического моделирования объем полости (в расчете на 1 м ее протяженности) на момент образования сквозной зоны нарушенности породного массива (рис. 8в) оценивается в  $5300 \text{ м}^3$ , из которых  $1520 \text{ м}^3$  приходится на каменную соль (не подвержена растворению) и  $3780 \text{ м}^3$  — на пласты карналлитового состава. При принятых в расчетах коэффициентах разрыхления и растворения обрушенных пород, а также с учетом того, что начальный объем выработанного пространства карналлитового пласта В составляет  $365 \text{ м}^3$ , свободный объем полости оценивается в  $5300 - (1520 + (3780 - 365) \cdot 0.85) \cdot 1.1 = 435 \text{ м}^3$ . Объем обрушенных пород в пределах расчетной зоны техногенной нарушенности (рис. 8в) с учетом их разрыхления составляет  $3190 \text{ м}^3$ . Этого объема оказывается достаточно для того, чтобы полностью заполнить свободное пространство полости и при этом образовать на земной поверхности провал глубиной до 20 м. Данная оценка в целом согласуется с натурными измерениями глубины провала.

### ВЫВОДЫ

Согласно проведенным экспериментально-аналитическим исследованиям, условиями образования провала на земной поверхности являются:

- мульда сдвижения с большой разницей оседаний в ее краевой части;
- высокий градиент оседаний (выше 3–4 %), увеличивающийся со временем;
- ослабленная по прочностным и деформационным свойствам пород область в верхней части геологического разреза;
- полость растворения, способная вместить весь объем разрушенных пород.

Выполнение данных условий создает предпосылки для перехода статических деформаций породного массива в динамическую форму. Обоснованные выводы по возможности образования провала на земной поверхности для конкретных горно-геологических условий могут быть получены только по результатам математического моделирования и сопровождающего комплекса геофизических исследований.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шиман М. И. Предотвращение затопления калийных рудников. — М.: Недра, 1992.
2. Prugger F. F., Prugger A. F. Water problems in Saskatchewan mining — what can be learned from them? CIM bulletin, 1991, Vol. 84, No. 945.
3. Барях А. А., Самоделкина Н. А., Потапов А. А., Коносавский П. К. Прогноз деформаций земной поверхности при аварийном затоплении калийного рудника // Материалы IV Междунар. науч. конф. “Теория и практика геомеханики для эффективности горного производства и строительства”. — Варна, Болгария, 2010.
4. Шокин Ю. П. Анализ причин затопления калийных рудников ГДР и ФРГ подземными водами и рассолами // Труды ВНИИГ. — 1969. — Вып. 51.
5. Whyatt J., and Varley F. Catastrophic failures of underground evaporite mines, Proceedings of 27-th International Conference on Ground Control in Mining, NIOSH, Spokane Research Laboratory, USA, 2008.
6. Rauche H. Sinkhole formation over flooded potash mines — case studies from the Motherland of the potash industry, Fall 2000 Meeting San Antonio, Texas, USA, 2000.
7. Красноштейн А. Е., Барях А. А., Санфиоров И. А. Горнотехнические аварии: затопление Первого Березниковского калийного рудника // Вестн. ПНЦ УрО РАН. — 2009. — № 2.

8. **Барях А. А., Санфиоров И. А.** О природе провалов на земной поверхности после затопления Первого Березниковского рудника // Стратегия и процессы освоения георесурсов: сб. науч. тр. Вып. 10. — Пермь: ГИ УрО РАН, 2012.
9. **Буш В., Хебель Х-П., Шафер М., Вальтер Д., Барях А. А.** Контроль оседания подработанных территорий методами радарной интерферометрии // Маркшейдерия и недропользование. — 2009. — № 2.
10. **Самоделкина Н. А.** Прогноз негативных последствий затопления рудника БКПРУ-1 // Стратегия и процессы освоения георесурсов: сб. науч. тр. Вып. 12. — Пермь: ГИ УрО РАН, 2013.
11. **Девятков С. Ю.** К вопросу определения условий формирования провалов на земной поверхности // Стратегия и процессы освоения георесурсов: сб. науч. тр. Вып. 12. — Пермь: ГИ УрО РАН, 2013.
12. **Барях А. А., Самоделкина Н. А.** Об одном подходе к реологическому анализу геомеханических процессов // ФТПРПИ. — 2005. — № 6.
13. **Амусин Б. З., Линьков А. М.** Об использовании переменных модулей при решении одного класса задач линейно-наследственной ползучести // Механика твердого тела. — 1974. — № 6.
14. **Кузнецов Г. Н.** Механические свойства горных пород. — М.: Углетехиздат, 1947.
15. **Барях А. А., Асанов В. А., Паньков И. Л.** Физико-механические свойства соляных пород Верхнекамского калийного месторождения: учеб. пособие. — Пермь: Изд-во Перм. техн. ун-та, 2008.
16. **Зенкевич О.** Метод конечных элементов в технике. — М.: Мир, 1975.
17. **Малинин Н. Н.** Прикладная теория пластичности и ползучести. — М.: Машиностроение, 1975.
18. **Фадеев А. Б.** Метод конечных элементов в геомеханике. — М.: Недра, 1987.
19. **Барях А. А., Асанов В. А., Самоделкина Н. А., Паньков И. Л., Телегина Е. А.** Геомеханическое обеспечение защиты калийных рудников от затопления // Горн. журн. — 2013. — № 6.
20. **Барях А. А., Самоделкина Н. А.** Разрушение водоупорных толщ при крупномасштабных горных работах. Ч. II // ФТПРПИ. — 2012. — № 6.

*Поступила в редакцию 17/VIII 2015*