

УДК 622.831 + 550.834

**СЕЙСМО-ГЕОМЕХАНИЧЕСКИЙ ПРОГНОЗ СОСТОЯНИЯ
ВОДОЗАЩИТНОЙ ТОЛЩИ НА КАЛИЙНЫХ РУДНИКАХ**

**А. А. Барях, И. А. Санфиров, А. К. Федосеев,
А. И. Бабкин, А. А. Цаюков**

*Горный институт УрО РАН, E-mail: Bar@MI-Perm.ru,
ул. Сибирская, 78а, 614007, г. Пермь, Россия*

Представлена система контроля безопасной разработки месторождений водорастворимых руд в сложных горно-геологических условиях. Система основана на геомеханической интерпретации поверхностных и шахтных сейсморазведочных исследований, реализуемых в мониторинговом режиме. Математическое моделирование состояния водозащитной толщи выполняется с учетом всего комплекса горнотехнических и горно-геологических факторов, установленных по результатам сейсморазведочных работ. Показано, что система сейсмо-геомеханического мониторинга позволяет контролировать эволюцию напряженно-деформированного состояния водозащитной толщи, что обеспечивает возможность своевременного принятия дополнительных мер охраны и минимизирует риски возникновения аварийных ситуаций.

Калийные рудники, водозащитная толща, сейсморазведочные наблюдения, математическое моделирование, напряженно-деформированное состояние, разрушение

DOI: 10.15372/FTPRPI20170602

Разработка месторождений минеральных солей связана с риском возникновения аварий, обусловленных разрушением водозащитной толщи (ВЗТ), и, как следствие, прорывом пресных или слабоминерализованных вод в горные выработки [1, 2]. Это, как правило, приводит к затоплению и “гибели” рудников [3]. Данная проблема относится к категории мировых задач горнодобывающей отрасли. Аварийные затопления калийных рудников и соляных шахт отмечены практически на всех континентах [4]. Последствием прорыва пресных вод является интенсификация деформаций земной поверхности вследствие растворения соляных пород — вплоть до их реализации в динамической форме с образованием провалов, глубина которых может достигать сотен метров [5, 6]. Безусловно, это создает реальную угрозу разрушения зданий и объектов инженерной инфраструктуры, расположенных на земной поверхности.

Традиционная схема геомеханического обеспечения безопасности горных работ базируется на инженерных подходах, адаптированных к некоторым усредненным по площади горно-геологическим условиям разработки и не отражает локальные особенности строения подработанных толщ, латеральную изменчивость физико-механических свойств пород и структурных характеристик геологических сред [7]. Контроль взаимодействия горных работ с неоднород-

ным по строению и свойствам породным массивом ограничивается периодическими измерениями оседаний земной поверхности, без детального изучения их причин. Подобные подходы влекут за собой серьезные риски возникновения аварийных ситуаций из-за несоответствия параметров горных работ реальным горно-геологическим условиям.

Возможности учета пространственно-временной изменчивости физико-геологических факторов в геомеханических расчетах появляются за счет развития и адаптации к потребностям горного производства методов разведочной геофизики. В качестве основного предлагается сейсморазведка на отраженных волнах с привлечением интерференционных систем регистрации по методике многократных перекрытий [8]. Построенные по результатам сейсморазведочных работ физико-геологические модели породного массива представляют параметрическую основу геомеханического обеспечения безопасности горных работ.

На этапе геомеханического анализа физико-геологические модели трансформируются в соответствующие (двумерные или трехмерные) расчетные схемы математического моделирования, отражающие наряду с особенностями геологического строения массива исходное напряженное состояние недр, закономерности деформирования пород под нагрузкой, технологические параметры ведения очистных работ [9]. Адекватность геомеханических расчетов контролируется данными маркшейдерских наблюдений за оседаниями земной поверхности с привлечением результатов мониторинговых сейсморазведочных наблюдений.

МЕТОДИКА И ТЕХНОЛОГИЯ СЕЙСМОРАЗВЕДОЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

На современном этапе развития методов и средств сейсморазведочных исследований их реализация позволяет обеспечить для различных интервалов геологического разреза приемлемый уровень детализации неоднородностей в строении породного массива. Так, для сейсмогеологических условий Верхнекамского месторождения калийных солей (ВКМКС) наземные малоглубинные сейсморазведочные исследования в мониторинговом режиме позволяют локализовать участки “негативных” изменений упругих параметров породного массива размерами в несколько десятков метров по латерали в интервале глубин от 100 до 500 м и в пределах первого десятка метров по вертикали. При этом наиболее уверенно картируется верхняя граница выделяемых участков.

Подобные исследования могут быть дополнены инженерными сейсморазведочными наблюдениями, которые обеспечивают детальное изучение верхней части разреза от приповерхностных отложений до первых горизонтов ВЗТ. Минимальная размерность такой детализации составляет первые метры. Наличие информации о состоянии верхней части разреза дает возможность на этапе геомеханической интерпретации оценить ее “вклад” в степень техногенной нарушенности ВЗТ [10].

В случае повышенной детализации геологического строения и определения состояния породного массива на уровне продуктивных пластов необходимы высокочастотные сейсморазведочные исследования из горных выработок. Для этого проводятся шахтные сейсмоакустические наблюдения в частотном диапазоне от 100 до 2 000 Гц [8]. Регистрация сейсмических данных во внутренних точках среды позволяет изучать разрез в различных направлениях выработанного пространства, обеспечивая разрешающую способность до 0.5 м в направлении распространения упругих волн. При этом положение нижней границы выделяемых участков устанавливается наиболее достоверно.

Максимально детальная сейсмогеологическая информация об изменении свойств пород на проблемных участках шахтных полей возможна при организации комплекса многоуровневых и разночастотных сейсмических исследований, проводимых на земной поверхности и из горных выработок. Характерное для ВКМКС слоистое залегание и скоростная дифференциация пластов

обосновывают применение интерференционных систем сбора сейсморазведочных данных. Для каждого метода в соответствии с требуемой глубиной и разрешающей способностью рассчитываются параметры систем наблюдений [8]. Основные пространственные характеристики систем наблюдений на разных глубинных уровнях представлены в виде таблицы.

Характеристика систем наблюдений

Параметр системы наблюдений	Малоглубинная	Инженерная	Шахтная
X_{\min} , м	8	0	0
X_{\max} , м	256–504	64–26	32–126
$\Delta X_{SP} = \Delta X_{OP}$, м	4–8	1–2	0.5–2.0
H_{\max} , м	300	100	50
f_{\max} , Гц	80–120	200–300	600–2000
V_{avg} , км/с	3.0–3.5	1.5–2.5	3.7–4.3
Разрешающая способность, м:			
вертикальная	6–10	2–4	0.5–2.0
горизонтальная	30–40	7–12	3.5–6.5

Примечание. X_{\min} и X_{\max} — минимальное и максимальное удаления пункта взрыва от пунктов приема; H_{\max} — максимальная глубина целевого интервала; f_{\max} — максимальная частота регистрируемых колебаний; V_{avg} — средняя скорость в целевом интервале глубин; ΔX_{SP} , ΔX_{OP} — соответственно шаг пунктов возбуждения и пунктов приема; кратность наблюдений для всех видов сейсморазведочных исследований $N \geq 32$

При реализации представленных систем для малых и сверхмалых глубин и при наблюдениях на земной поверхности применяются разные источники упругих колебаний. В одном случае используется энергия пороховых газов в замкнутом объеме неглубокого шпура (до 1 м) [11], в другом — механическое воздействие автоматизированного молота, ускоряющегося под действием разгонных пружин. В городских условиях, на грунтовых и асфальтированных дорогах, в пределах охранных зон водоводов, нефте- и газопроводов, мест прокладки кабеля и на территории промышленных предприятий действует механический источник колебаний, в полевых условиях и в лесу — пороховой. Оба источника обеспечивают генерацию сейсмических колебаний в частотном диапазоне не ниже 120–150 Гц. Это удовлетворяет требованиям разрешающей способности малоглубинных наблюдений в целевом интервале продуктивных пластов (200–300 м).

Для целей инженерной сейсморазведки разработан облегченный вариант автоматизированного молота, в котором для увеличения частоты генерируемых колебаний уменьшена масса молота-бойка и существенно увеличена скорость его движения в момент удара о плиту-подложку. При незначительных объемах полевых работ в качестве источника может служить ручная кувалда массой не менее 5 кг. Оба источника позволяют регистрировать сейсмические волновые поля в диапазоне от 10 до 300 Гц [8].

В силу технологических условий производства сейсморазведочных исследований в горных выработках применяются только ручные ударные источники. Во внутренних точках среды такие источники характеризуются расширенным спектром колебаний — 2 кГц и выше.

Сбор сейсморазведочных данных осуществляется разработанным для записи высокочастотных сигналов сейсмоакустическим регистратором “IS-128”, представляющим собой телеметрическую систему сбора информации, построенную на полевых удаленных модулях. Минимальный шаг дискретизации полевых модулей — 33 мкс обеспечивает регистрацию сигналов частотой до 5 кГц. Для преобразования упругих колебаний используются высокочувствительные геофоны электродинамического типа.

Граф цифровой обработки для каждого из этапов многоуровневого комплекса сейсморазведочных исследований адаптирован в соответствии с физико-геологическими особенностями целевого интервала исследований, регистрируемым частотным диапазоном, требуемой разрешающей способностью и влиянием условий регистрации на сейсмические данные. Конечные результаты цифровой обработки в виде временных разрезов и различных амплитудно-динамических и скоростных характеристик являются входящей информацией этапа интерпретации.

Результат интерпретации многоуровневых сейсморазведочных исследований — физико-геологические модели повышенной детальности. Их разработка базируется на изучении поля скоростей продольных отраженных волн, качественных особенностей волновой картины, поведения амплитудных и спектральных характеристик сейсмической записи. Локализация предположительно “ослабленных” участков учитывается комплексом сейсмических методов. Детальность моделей ограничивается частотным составом регистрируемых колебаний. В зависимости от технологии проведения сейсморазведочных работ (одиночные профили, площадная или пространственная сейсморазведка) разрабатываются двумерные или трехмерные физико-геологические модели.

В случае реализации полномасштабного комплекса сейсмических исследований возможно построение разноуровневых моделей реальных сред, согласованных по эффективным кинематическим параметрам, включающим времена регистрации и скорости распространения упругих волн до целевых отражающих горизонтов. К этому же направлению относится и комплексирование разнонаправленных упругих волн, регистрируемых в горных выработках и на пространственно совмещенных с ними наземных профилях. Здесь за счет анализа волновой информации, получаемой по направлению сверху вниз и снизу вверх, в пределах разрешающей способности шахтных сейсмических исследований повышается точность вертикальной локализации геологических неоднородностей, определения их строения и свойств.

Физико-геологические модели повышенной детальности, построенные по результатам полномасштабного комплекса сейсморазведочных исследований, являются исходной информацией для текущих и прогнозных геомеханических оценок состояния ВЗТ на потенциально опасных участках шахтных полей калийных рудников.

МЕТОДИКА ГЕОМЕХАНИЧЕСКОГО АНАЛИЗА

В рамках сейсмо-геомеханического подхода методика геомеханического анализа базируется на крупномасштабном математическом моделировании напряженно-деформированного состояния подработанного массива изменения под воздействием горных работ. Выработанное пространство моделируется средой с пониженными по отношению к породам соответствующего пласта механическими свойствами. Степень уменьшения механических свойств определяется параметрами камерной системы разработки.

Математическое моделирование состояния ВЗТ выполняется в упругопластической постановке с учетом всего комплекса горнотехнических (количество отработанных пластов, параметры системы разработки, порядок отработки, наличие закладки выработанного пространства и т. д.) и установленных по результатам сейсморазведочных работ горно-геологических (особенности строения, гипсометрия пластов и др.) факторов.

Для оценки изменения состояния ВЗТ и всего подработанного массива во времени используется реологический подход, основанный на математическом описании графиков нарастания оседаний земной поверхности. В рамках линейной теории наследственной вязкоупругости принимается, что вертикальные смещения дневной поверхности изменяются во времени согласно соотношению [12]:

$$v(t) = v_0 [1 + \Phi(t)], \quad (1)$$

где v_0 — упругие смещения, связанные с формированием выработанного пространства; $\Phi(t)$ — функция ползучести. Поскольку реальные графики нарастания оседаний определяются разностью полных и упругих смещений, то

$$\eta(t) = v(t) - v_0 = v_0 \Phi(t). \quad (2)$$

В этом случае задача определения реологических параметров подработанного массива сводится к подбору такой теоретической функции $\eta(t)$, которая наилучшим образом описывала бы экспериментальную или прогнозную кривую нарастания оседаний земной поверхности. Реализация данного подхода основывается на модификации известного метода переменных модулей деформаций [13]. Согласно ей [12], переменными во времени модулями описывается деформирование не всех элементов геологического разреза, а лишь отработанных пластов. При этом модуль деформации пласта на момент отработки характеризуется соотношением

$$E^p = \frac{b}{a+b} E = (1 - \omega) E, \quad (3)$$

где a, b — соответственно ширина камеры и междукамерного целика; ω — коэффициент извлечения руды с пласта; E — модуль деформации породы.

Математически легко показать, что в зоне полной подработки зависимость вертикальных смещений от времени будет определяться выражениями (1), (2), если переменный модуль отработанного пласта представить в виде [12]:

$$E_t^p(t) = \frac{E^p}{1 + (1 - \omega)\Phi(t)}. \quad (4)$$

При отработке нескольких пластов действие выражения (4) с соответствующими параметрами (коэффициент извлечения, модуль деформации пород) и функцией ползучести $\Phi(t)$ распространяется на каждый из них. С учетом (4) реализация предложенного реологического подхода сводится к отысканию для каждого отработанного пласта временной функции $\Phi(t)$. Для построения функции ползучести используются фактические графики нарастания оседаний земной поверхности. При прогнозных оценках геомеханической ситуации функция ползучести $\Phi(t)$ основывается на построении прогнозных графиков в соответствии с рекомендациями [7] или экстраполяцией фактических кривых.

В качестве определяющего уравнения нелинейной связи напряжений и деформаций берется идеальная упругопластическая модель, которая является обобщением упругой и жесткопластической среды с внутренним трением. При трехмерном математическом моделировании в каждой точке подработанного массива известен полный тензор напряжений. В этом случае из уравнений статики можно найти напряжения, действующие на любой наклонной площадке, проходящей через произвольную точку [14].

Оценка степени изменения состояния ВЗТ при развитии процесса сдвижения базируется на анализе потенциальной возможности формирования в массиве трещин субвертикальной ориентации. Для рассматриваемой идеальной упругопластической среды связь между деформациями и напряжениями на допредельной стадии описывается законом Гука, а предельные напряжения в области сжатия определяются критерием Кулона – Мора, представленным в виде двухзвенной аппроксимации параболической огибающей кругов Мора:

$$\tau_{\max} = \tau_{\text{пр}} = C + \sigma_n \operatorname{tg} \varphi \quad (5)$$

с коэффициентом сцепления C и коэффициентом внутреннего трения $\operatorname{tg} \varphi$, заданными выражениями:

$$C = \begin{cases} C_1 & \text{при } \sigma_n \leq \sigma_c / 2, \\ C_2 & \text{при } \sigma_n > \sigma_c / 2, \end{cases} \quad \operatorname{tg} \varphi = \begin{cases} \operatorname{tg} \varphi_1 & \text{при } \sigma_n \leq \sigma_c / 2, \\ \operatorname{tg} \varphi_2 & \text{при } \sigma_n > \sigma_c / 2, \end{cases}$$

где $\tau_{\text{пр}}$ — предельное напряжение сдвига; σ_c , σ_p — соответственно пределы прочности при одноосном сжатии и растяжении;

$$\begin{aligned} C_1 &= \sqrt{\sigma_p + \sigma_c / 2} \sqrt{2\sigma_p - 2\sqrt{\sigma_p(\sigma_p + \sigma_c)} + \sigma_c}, \\ C_2 &= \left(2\sqrt{\sigma_p + \sigma_c / 2} - \sqrt{\sigma_p + \sigma_c}\right) \sqrt{2\sigma_p - 2\sqrt{\sigma_p(\sigma_p + \sigma_c)} + \sigma_c}, \\ \operatorname{tg} \varphi_1 &= 2\left(\sqrt{\sigma_p + \sigma_c / 2} - \sqrt{\sigma_p}\right) \sqrt{2\sigma_p - 2\sqrt{\sigma_p(\sigma_p + \sigma_c)} + \sigma_c} / \sigma_c, \\ \operatorname{tg} \varphi_2 &= 2\left(\sqrt{\sigma_p + \sigma_c} - \sqrt{\sigma_p + \sigma_c / 2}\right) \sqrt{2\sigma_p - 2\sqrt{\sigma_p(\sigma_p + \sigma_c)} + \sigma_c} / \sigma_c. \end{aligned}$$

Напряжения τ_{max} и σ_n в выражении (5) вычисляются через значения главных напряжений (σ_1, σ_3):

$$\begin{aligned} \tau_{\text{max}} &= \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3) \sin 2\beta, \\ \sigma_n &= \frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_3) + \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3) \cos 2\beta, \end{aligned} \quad (6)$$

где β — угол между плоскостью роста субвертикальной трещины и одной из горизонтальных осей координат (например, z).

В области растяжения предельное напряжение ограничивается пределом прочности на растяжение:

$$\sigma_1 = \sigma_p. \quad (7)$$

Прочностные характеристики пород, слагающих массив, в расчетах корректируются с учетом коэффициентов длительной прочности для соляных пород и структурного ослабления для пород надсоляной толщи.

Численная реализация задач трехмерного математического моделирования осуществляется по полуаналитической схеме метода конечных элементов, включающей разложение вектора смещений в ряд Фурье по горизонтальной пространственной координате [15]. Решение упруго-пластической задачи основывается на методе начальных напряжений [16]. При проведении геомеханических расчетов выделенные на этапе сейсморазведочных работ природные аномалии учитываются как области с пониженными, в соответствии с установленным коэффициентом ослабления, прочностными и деформационными свойствами соляных пород.

Для отражения природного генезиса “ослабленных” зон при математическом моделировании вычисляется поле дополнительных напряжений, обусловленное только ведением горных работ. Исходное вертикальное напряжение по всему разрезу, включая и “ослабленные” зоны, принимается равным γH (γ — удельный вес пород, H — глубина горных работ).

Локализация пластических деформаций в физическом смысле трактуется как разрушение пород ВЗТ: в области сжатия вследствие развития трещин сдвига, в области растяжения — трещин отрыва. Исходя из этих позиций проводится анализ опасности нарушения сплошности ВЗТ под воздействием горных работ. Пространственное положение выделенных по результатам математического моделирования зон техногенной нарушенности пластов ВЗТ, контролируется сейсморазведочными исследованиями. При необходимости выполняется корректировка геомеханической модели для согласованного изменения прочностных и деформационных свойств пород в соответствии с интерпретационными геофизическими оценками.

РЕАЛИЗАЦИЯ СЕЙСМО-ГЕОМЕХАНИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА

Рассмотрим один из примеров реализации режимного сейсмо-геомеханического контроля на шахтных полях ВКМКС.

На участке 4 и 5 блоков третьей юго-восточной панели (3 ЮВП) Четвертого Березниковского калийного рудника (рис. 1), в пределах которого отработаны два сильвинитовых пласта АБ и Кр2, на реперах с 48 по 53 профильной линии 5 отмечено резкое увеличение скоростей оседания земной поверхности (с 50–60 мм/год в 2012 г. до 1400 мм/год в 2014 г.), связанное с интенсивным разрушением конструктивных элементов камерной системы разработки. Ранее (1999, 2009 и 2012 гг.) в данном районе уже проводились сейсморазведочные наблюдения. По их результатам в интервале ВЗТ выделен ряд аномалий природного генезиса, характеризующихся нарушением волновой картины, изменением кинематических и динамических параметров упругих волн.

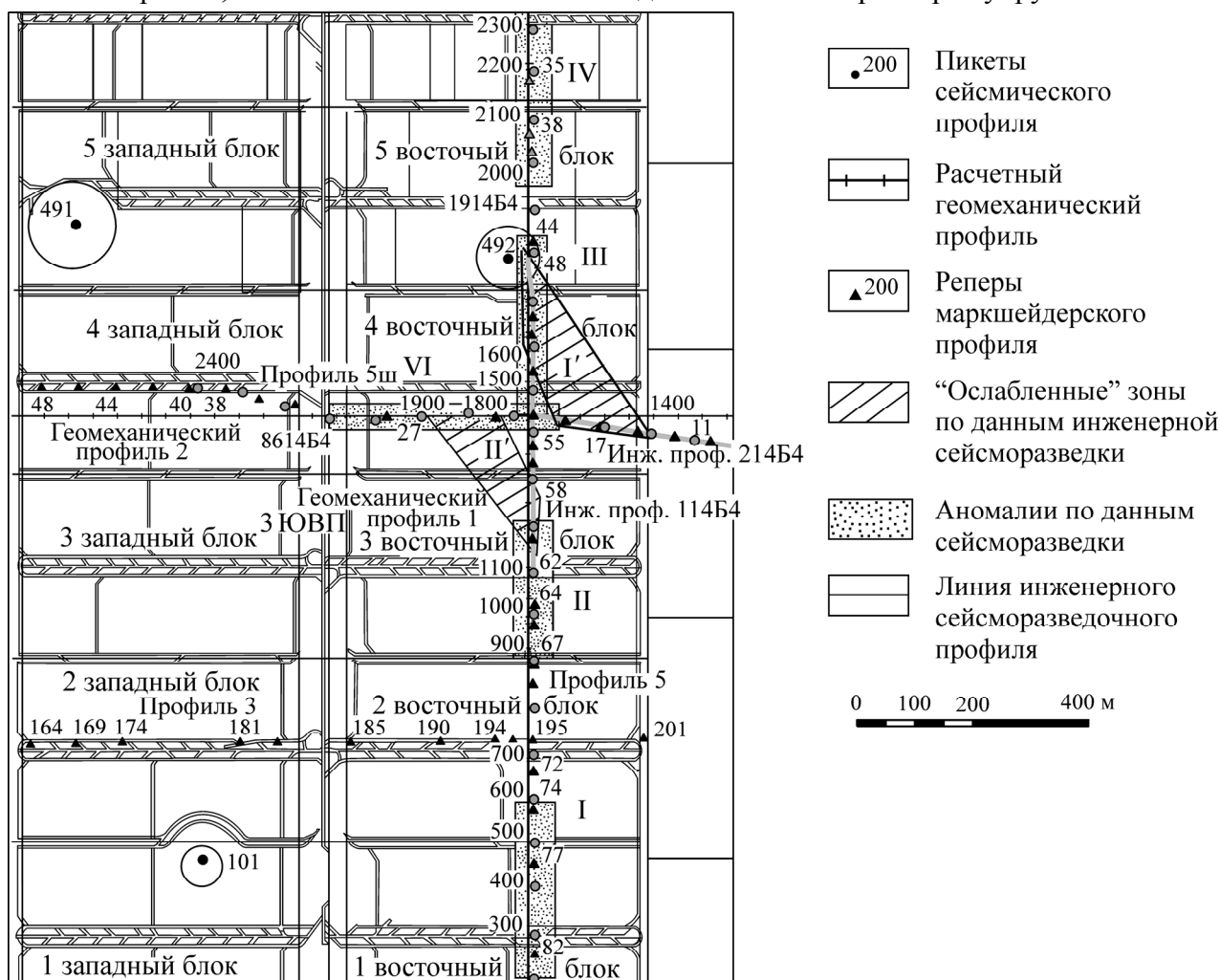


Рис. 1. Обзорная схема работ (I–VI — аномальные зоны)

В связи со сложившейся ситуацией на данном участке выполнен первый этап комплексных сейсмо-геомеханических исследований. В 2014 г. наблюдения, направленные на оценку состояния ВЗТ, проведены по профилям 1914Б4 и 8614Б4, имеющим меридиональное и широтное простирание соответственно (рис. 1). По их результатам на рассматриваемом участке выделено шесть аномальных зон, пространственная привязка которых дана на рис. 1. Основные изменения волновой картины, по сравнению с предыдущими сейсморазведочными исследованиями, связаны с появлением аномальной зоны III в районе охранного целика скв. 492 (четвер-

тый восточный блок), где отмечены интенсивные деформации породного массива. Очевидно, что эта зона имеет техногенную природу и может быть объединена с аномалией VI, выделенной по профилю 8614Б4. Интервал зоны III простирается до кровли пласта АБ, а зону VI можно отнести к аномалии природно-техногенного типа. По результатам пространственного анализа структурно-физических параметров на данном участке аномалии контролируются обширной областью с пониженными физическими свойствами пород ВЗТ (рис. 2), обусловленной, возможно, природными факторами — влиянием девонской рифогенной структуры.

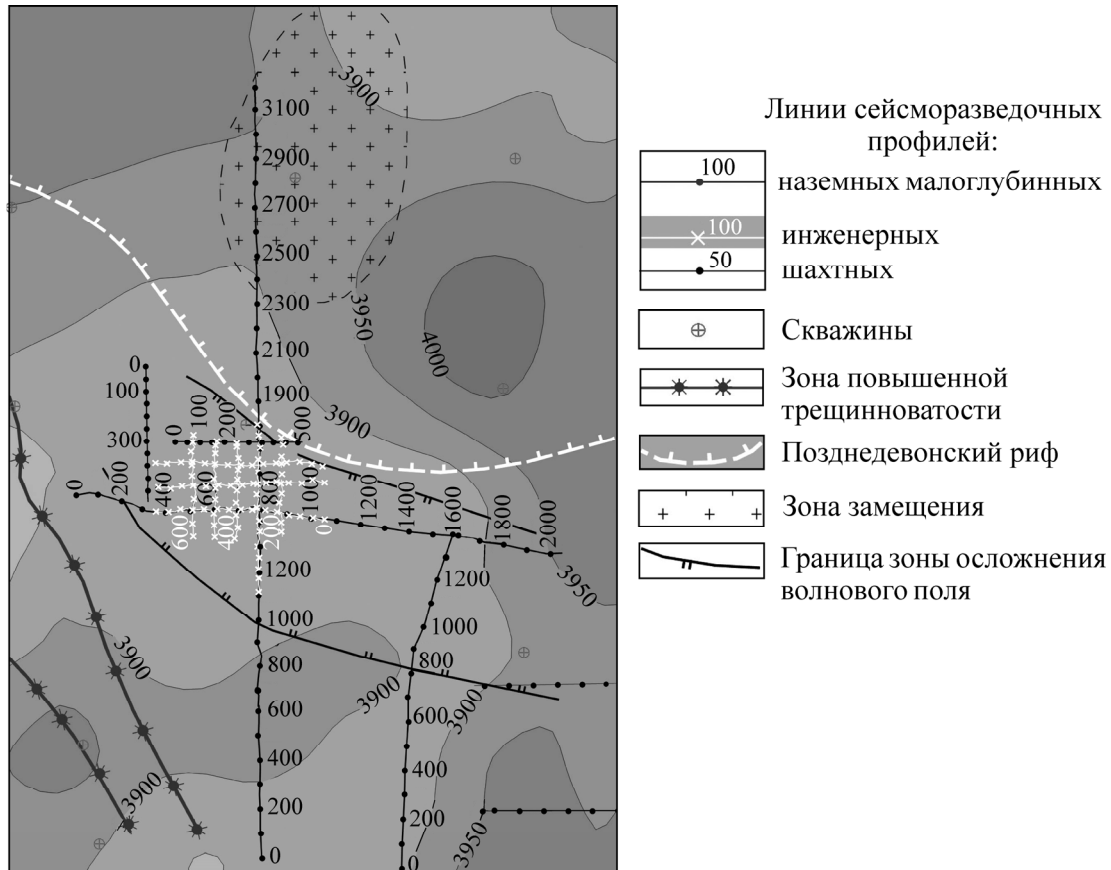


Рис. 2. Особенности геологического строения ВЗТ

Предварительные геомеханические расчеты показали, что для обеспечения больших фактических градиентов оседания земной поверхности в районе сейсморазведочной аномалии III (рис. 3) необходимо включение в модель “ослабленной” по механическим свойствам зоны, развитой в интервале надсоляной толщи.

Для уточнения особенностей строения и состояния верхней части геологического разреза проведены инженерные сейсморазведочные работы. Детализация строения водозащитной толщи выполнена за счет шахтных сейсморазведочных исследований.

На рис. 4 представлены временные разрезы различных этапов сейсморазведочного комплекса. Пространственно совмещенные малоуглубинные и инженерные наблюдения в пределах одной профильной линии с частичным перекрытием охватывают интервал от земной поверхности до подстилающих солей. Шахтные наблюдения проведены в 300 м севернее инженерных сейсморазведочных профилей. Они перекрывают ВЗТ в интервале продуктивных пластов и покровной каменной соли (ПКС). Для инженерно-геологического и шахтного временных разрезов конфигурация отражающих горизонтов во временной области учитывает также пространственное расположение линии приведения.

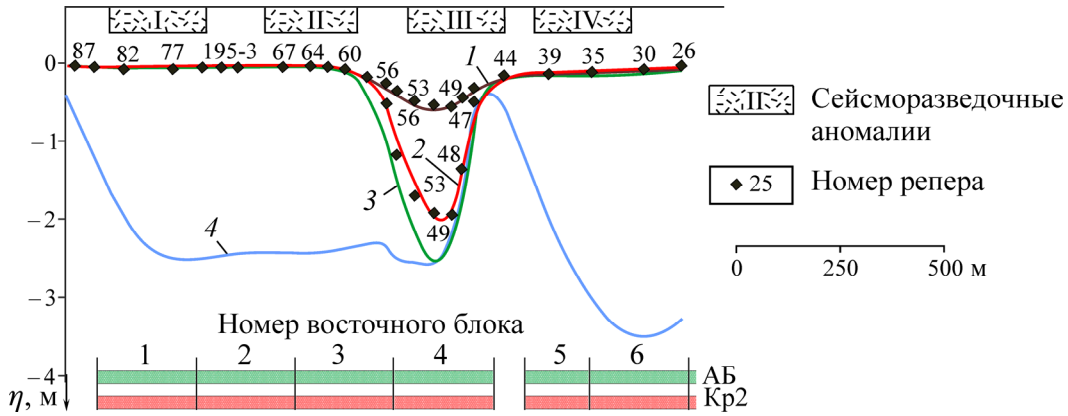


Рис. 3. Расчетные оседания земной поверхности: 1 — на конец 2013 г.; 2 — на ноябрь 2014 г.; 3 — на начало 2016 г.; 4 — на конец процесса сдвижения

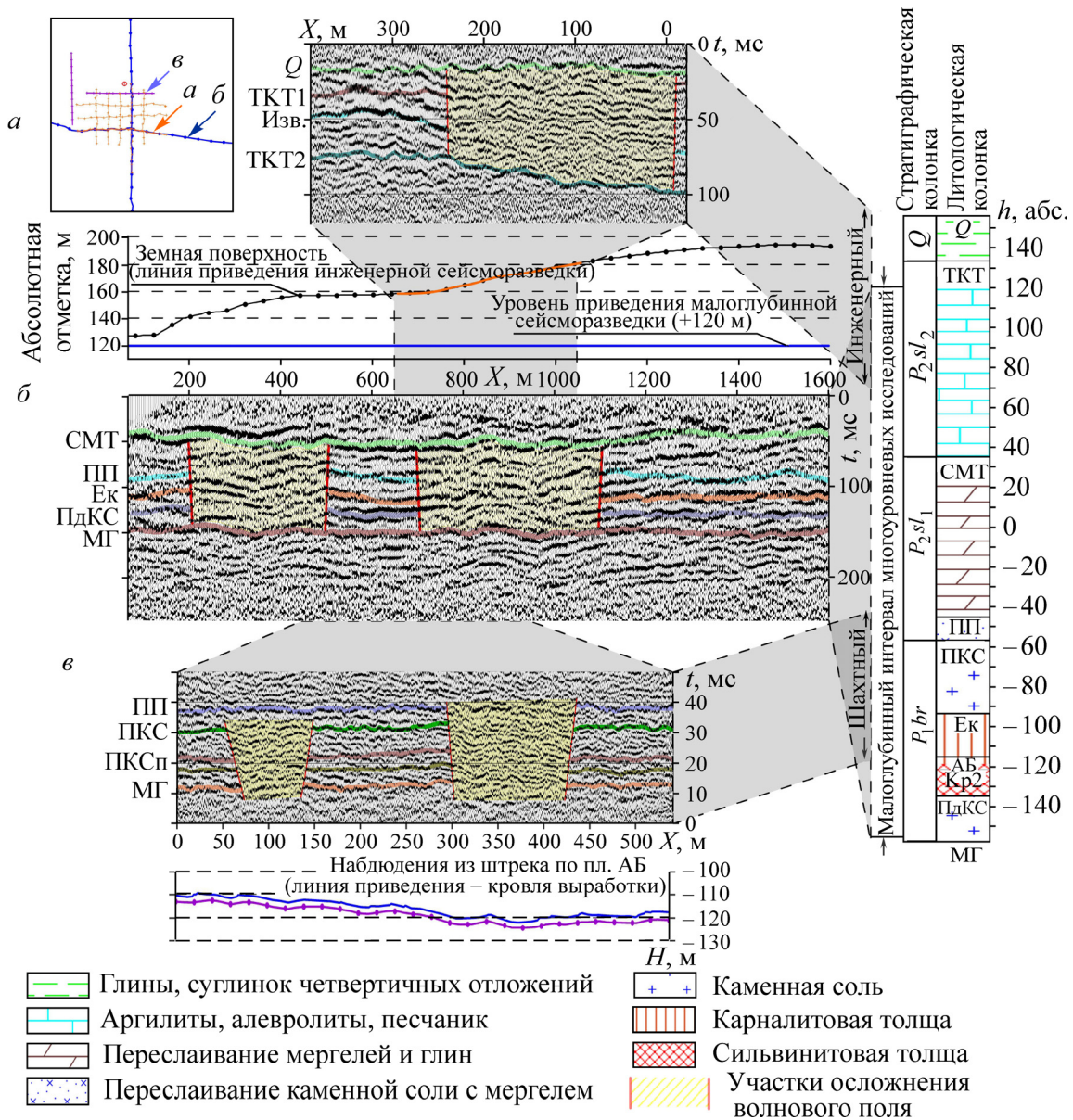


Рис. 4. Пространственно-совмещенные временные разрезы сейсмических исследований: а — инженерные; б — малоуглубинные; в — шахтные

“Негативные” изменения физических свойств породного массива на различных уровнях и с различной степенью детализации отмечены в совмещенных физико-геологических моделях (рис. 5), где в координатах профильных линий и глубин представлено распределение значений интервальных скоростей ($V_{инт}$) распространения упругих волн продольного типа.

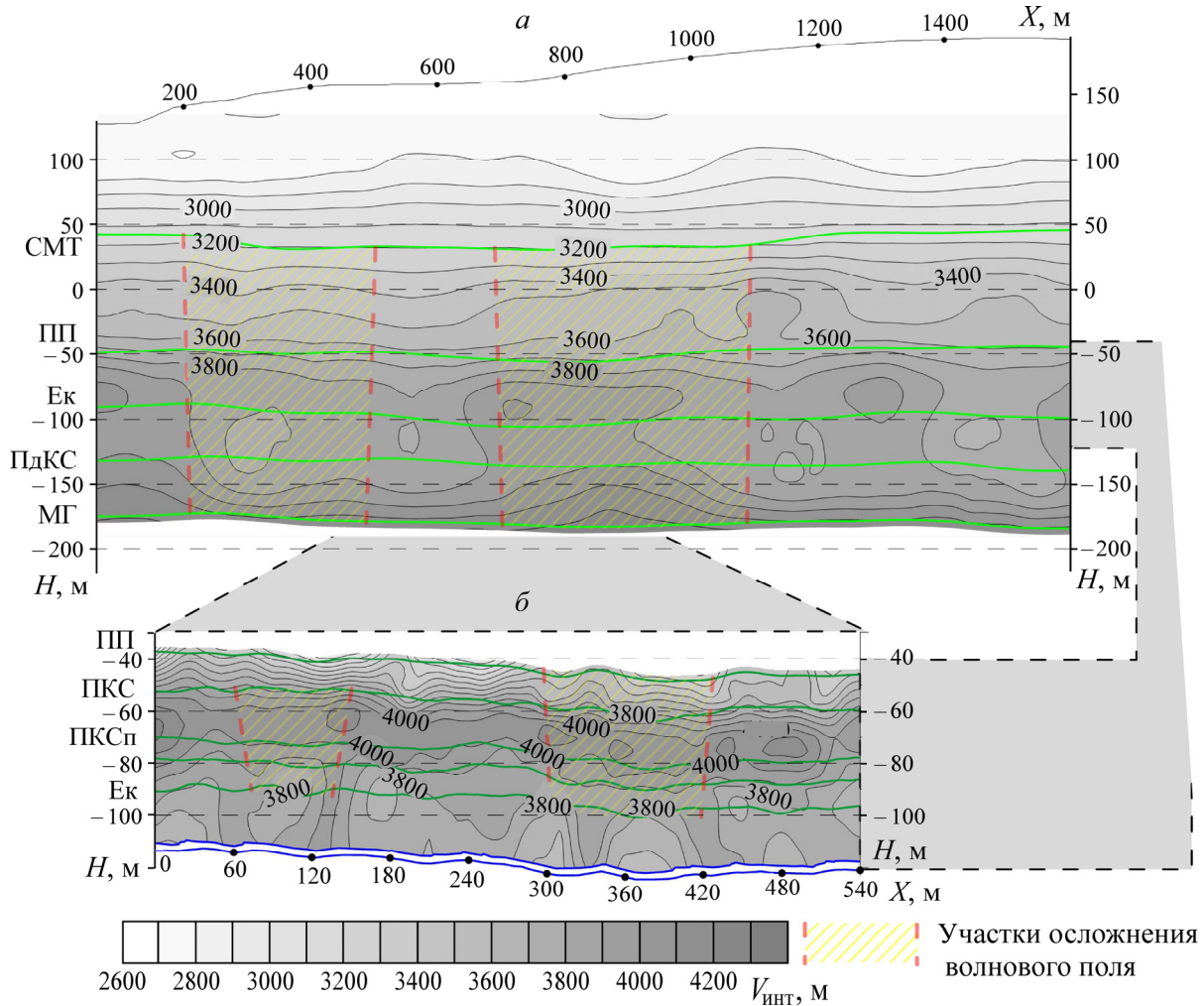


Рис. 5. Физико-геологические модели малоглубинных (а) и шахтных (б) исследований

Положение в плане закартированных “ослабленных” зон в надсоляной толще показано на рис. 1. Их наличие также подтверждено результатами бурения инженерно-геологической скважины, во время которого отмечены провалы инструмента вплоть до аварийных остановов, связанных с деформациями буровой установки. Согласно результатам инженерных сейсморазведочных работ, в геомеханическую расчетную схему в интервале надсоляной толщи введены “ослабленные” по прочностным и деформационным свойствам зоны.

С учетом всего комплекса проведенных сейсморазведочных работ для участка 3 ЮВП выполнен трехмерный геомеханический анализ состояния ВЗТ. При этом разрушение соляных пород вследствие сдвига определялось критерием Кулона–Мора (5), который может быть представлен в виде

$$K = \frac{\tau_{\max}}{\tau_{\text{пр}}} \geq 1. \quad (8)$$

В области растяжения условием разрушения являлось соотношение (7).

На рис. 6 показано пространственное распределение зон техногенной нарушенности в водо-защитной толще в районе скв. 492 (рис. 1). Такое трехмерное представление позволяет определить наиболее опасные по нарушению сплошности ВЗТ участки: меридиональный разрез I–I и субмеридиональный разрез II–II. В их пределах в районе южной границы охранного целика скв. 492 разрушению подвержены все пласты соляных пород за исключением нижнего интервала ПКС. Рекомендовано выполнить с максимально возможной степенью заполнения закладку очистных камер пластов АБ и Кр2 на участке 4 восточного блока (южная граница охранного целика) и обеспечить закладку камер пласта Кр2 со степенью заполнения 0.75 на участке 5 восточного блока (северная граница охранного целика).

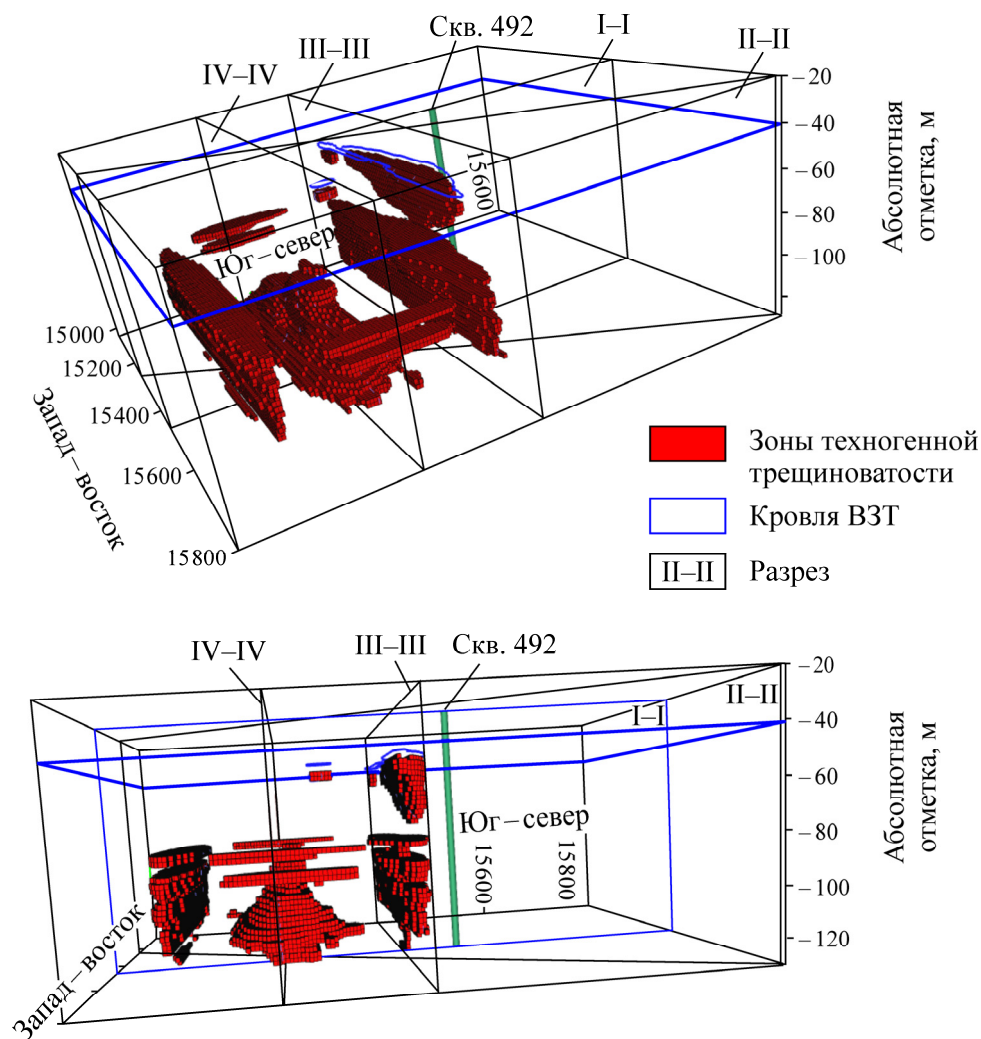


Рис. 6. Пространственное положение зон техногенной нарушенности

В 2015 г. удалось обеспечить закладку выработанного пространства по пластам Кр2 и АБ со степенью заполнения 0.6 и 0.3 соответственно. Начиная с мая 2015 г. отмечено заметное снижение скоростей оседания земной поверхности. Однако при этом высокий градиент оседаний в северной и южной краевых частях мульды сдвижения сохранялся.

Режимные сейсморазведочные работы, выполненные в 2016 г., показали, что основные “негативные” изменения сейсмических параметров сосредоточены в интервале продуктивной толщи в центральной части южного полублока 3 ЮВП, к югу и юго-востоку от границ целика

скв. 492. Это полностью согласуется с результатами геомеханического моделирования, в соответствии с которыми в центральной части южного полублока разрушены все пласты ВЗТ до каменной соли И–3. В районе южной границы охранного целика скв. 492 нарушена сплошность всех пластов каменной соли за исключением нижнего интервала ПКС. Вместе с тем по результатам прогнозных оценок произошла определенная стабилизация геомеханической обстановки в районе скв. 492, связанная с проведением закладочных работ и выраженная в относительном замедлении процессов разрушения пород ВЗТ (рис. 7).

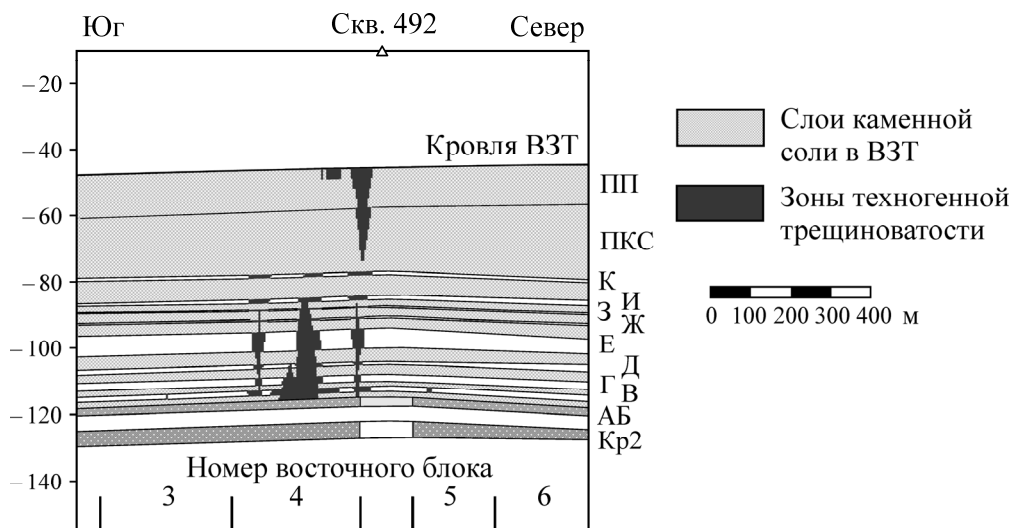


Рис. 7. Распределение зон техногенной трещиноватости в ВЗТ на 2025 г. по разрезу I–I

Таким образом, организация режимного сейсмо-геомеханического мониторинга позволяет контролировать эволюцию напряженно-деформированного состояния водозащитной толщи и при своевременной его реализации обеспечивает возможность принятия дополнительных мер охраны, что снижает риски возникновения аварийных ситуаций.

ВЫВОДЫ

Разработанная система сейсмо-геомеханического контроля состояния защитных элементов подземной разработки месторождений водорастворимых руд обеспечивает адекватную геомеханическую оценку влияния пространственно-временной изменчивости структурно-физических параметров породного массива на сохранность водоупорных толщ. По результатам математического моделирования определяется изменение во времени напряженно-деформированного состояния подработанного массива, дается оценка устойчивости водозащитной толщи и выполняется прогноз развития процессов сдвижения с обязательным учетом инженерно-геологической составляющей.

Прогноз включает определение пространственного положения наиболее деформируемых участков, что является основанием для проектирования режимной сети сейсморазведочных наблюдений. Обработка и интерпретация регистрируемых данных позволяет откорректировать пространственно-временные геомеханические прогнозы устойчивости породного массива. Комплексная сейсмо-геомеханическая оценка контролируемого участка действующего шахтного поля представляет основу проекта горнотехнических мероприятий по минимизации рисков, связанных с прорывом пресных вод в горные выработки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Шокин Ю. П.** Анализ причин затопления калийных рудников ГДР и ФРГ подземными водами и рассолами // Труды ВНИИГ. — 1969. — Вып. 51. — С. 23–40.
2. **Prugger F. F. and Prugger A. F.** Water problems in Saskatchewan mining – what can be learned from them? CIM bulletin, 1991, Vol. 84, No. 945. — P. 58–66.
3. **Красноштейн А. Е., Барях А. А., Санфиоров И. А.** Горнотехнические аварии: затопление Первого Березниковского калийного рудника // Вестн. Перм. науч. центра. — 2009. — № 2. — С. 4–9.
4. **Rauche H.** Die Kaliindustrie im 21 Jahrhundert, Springer Vieweg, 2015. — 580 p.
5. **Барях А. А., Самоделкина Н. А.** Геомеханическая оценка интенсивности деформационных процессов над затопленным калийным рудником // ФТПРПИ. — 2017. — № 4. — С. 33–46.
6. **Барях А. А., Девятков С. Ю., Самоделкина Н. А.** Теоретическое обоснование условий образования провалов на земной поверхности после аварийного затопления калийных рудников // ФТПРПИ. — 2016. — № 1. — С. 50–61.
7. **Указания** по защите рудников от затопления и охране обрабатываемых объектов в условиях Верхнекамского месторождения калийных солей (технологический регламент). — СПб., 2008. — 96 с.
8. **Санфиоров И. А., Бабкин А. И., Ярославцев А. Г., Прийма Г. Ю., Фатькин К. Б.** Сейсморазведочные исследования условий разработки калийной залежи // Геофизика. — 2011. — № 5. — С. 53–59.
9. **Барях А. А., Санфиоров И. А.** Комплексное геомеханическое и геофизическое обеспечение безопасности подземных работ // Горн. журн. — 2005. — № 12. — С. 79–83.
10. **Yaroslavtsev A. G., Baryakh A. A., Sanfirov I. A., Fedoseev A. K., Tsayukov A. A.** Engineering seismic application in geomechanical calculations of complex mine technical objects, 12th Conference and Exhibition Engineering Geophysics, European Association of Geoscientists and Engineers, EAGE, Anapa, 2016. — P. 154–160.
11. **Пат. 2439620 РФ.** Импульсный пороховой источник упругих колебаний / И. А. Санфиоров, А. Г. Ярославцев, А. Е. Ахматов, А. И. Бабкин, А. А. Голдобин, С. И. Миньков // Опубл. в БИ. — 2012. — № 1.
12. **Барях А. А., Самоделкина Н. А.** Об одном подходе к реологическому анализу геомеханических процессов // ФТПРПИ. — 2005. — № 6. — С. 32–41.
13. **Амусин Б. З., Линьков А. М.** Об использовании переменных модулей при решении одного класса задач линейно-наследственной ползучести // МТТ. — 1974. — № 6. — С. 162–166.
14. **Тимошенко С. П., Гудьер Дж.** Теория упругости. — М.: Наука, 1975. — 576 с.
15. **Зенкевич О.** Метод конечных элементов в технике. — М.: Мир, 1975. — 271 с.
16. **Малинин Н. Н.** Прикладная теория пластичности и ползучести. — М.: Машиностроение, 1975. — 400 с.

Поступила в редакцию 12/X 2017