

УДК 622.83:622.341.1

ДЕФОРМАЦИОННЫЕ ПРОЦЕССЫ МАССИВА ГОРНЫХ ПОРОД ПРИ ОТРАБОТКЕ ЯКОВЛЕВСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ

Ю. А. КАШНИКОВ¹, зав. кафедрой, д-р техн. наук, проф.,
geotech@psstu.ru

С. Г. АШИХМИН¹, д-р техн. наук, проф.

Д. В. ГОЛУБНИЧИЙ², генеральный директор

Д. Х. ГИЛЯЗЕВ², начальник службы гидромеханического мониторинга

¹Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия

²ООО «Яковлевский горно-обогатительный комбинат», пос. Яковлево, Белгородская обл., Россия

Отмечено, что в техническом проекте разработки железных руд Яковлевского месторождения для предотвращения прорыва воды из неосущенного нижнекарбонового водоносного горизонта предусмотрено оставление предохранительного целика из рудного массива. По результатам многолетних инструментальных наблюдений установлено превышение величин оседаний почвы предохранительного целика над проектными.

Для выяснения причин данного явления и оценки текущего напряженно-деформированного состояния горного массива разработана укрупненная 3D-геомеханическая модель. Результаты моделирования позволили прояснить сложившуюся ситуацию и спрогнозировать величину максимальных водопритоков в рудник при дальнейшем развитии горных работ.

Ключевые слова: геомеханика, инструментальные наблюдения, подработка, водоносные горизонты, деформированное состояние, численное моделирование

DOI: 10.17580/gzh.2025.10.04

Введение

Разработка богатых железных руд (БЖР) Яковлевского месторождения, расположенного в индустриально развитом центральном районе РФ, существенно осложняется техническими сложностями и дороговизной их извлечения с большой глубины из-под водоносных горизонтов. Техническим проектом для предотвращения прорыва воды из неосущенного нижнекарбонового водоносного горизонта и затопления рудника при отработке первой очереди Яковлевского рудника с отработкой БЖР в этаже от –365 до –425 м по системе нисходящих горизонтальных слоев с закладкой предусмотрены следующие горные меры охраны:

- оставление под водоупором нижнекарбонового горизонта на отм. –300 м предохранительного целика из массива руды мощностью 65 м;
- создание в верхней части отрабатываемого этажа искусственной предохранительной потолочины из закладочного материала повышенной прочности;
- нисходящая слоевая выемка руды с полной закладкой выработанного пространства твердеющими смесями;
- ведение в постоянном режиме мониторинга сдвижения подработанной толщи пород и земной поверхности.

Однако мониторинг деформационных процессов массива предохранительного целика и земной поверхности показал весьма существенное несоответствие прогнозных и реальных параметров деформирования. Как результат, на руднике сложилась ситуация, требующая внимательного анализа причин данного несоответствия.

Анализ ранее принятых проектных решений и результатов исследований

В проектных документах предполагалось, что мульда оседания поверхности и массива целика возникает только в результате усадки закладочной смеси в процессе твердения и ее недозакладки. При полном заполнении выработанного пространства очистной заходки двумя слоями (несущим слоем прочностью 4

МПа и доливкой прочностью 1 МПа) усадку закладки ожидали на уровне 2,5 %. Величин недозакладки в разных работах оценивали по-разному, чаще всего также на уровне 2,5 %.

Специалисты ООО «НОВОТЭК» предполагали, что при отработке этажа высотой $m = 60$ м (в интервале отметок от –365 до –425 м) по системе с закладкой эффективная мощность составит $m_{\text{эфф}} = 1,97$ м (т. е. расчет был на $m_{\text{эфф}} = 3,3$ % от выемочной мощности m). В этом случае высота зоны водопроводящих трещин (ЗВТ) по методу максимального оседания слоя составит $H_{\text{ЗВТ}} = 57$ м. Это меньше мощности предохранительного целика 65 м, поэтому условие безопасной глубины разработки $H_6 \geq H_{\text{ЗВТ}}$, по мнению специалистов ООО «НОВОТЭК», выполняется.

Ученые ИГД УрО РАН в своих расчетах ориентировались на эффективную мощность $m_{\text{эфф}} = 5$ % от выемочной мощности m . В этом случае при отработке этажа высотой $m = 60$ м максимальное оседание на верхней границе выработанного пространства должно было составить $m_{\text{эфф}} = 3$ м. Допустимость таких оседаний оценивали расчетом деформаций водоупора методами механики сплошной среды [1, 2], описывавшими распределение вертикальных и горизонтальных смещений и деформаций в массиве при задании на границе отработки оседания величиной, равной эффективной мощности отработанной залежи (этажа).

Обычно в качестве критических рассматривают горизонтальные деформации растяжения, которые формируют вертикальные трещины разрыва, секущие водоупор. В работах специалистов ИГД УрО РАН [3] при обосновании допустимых условий отработки Яковлевского месторождения в качестве критических приняты вертикальные деформации растяжения над

центром выработанного пространства на том основании, что при невыдержанной и резко меняющейся мощности водоупорного слоя горизонтальные трещины расслоения могут нарушить его сплошность и сформировать водоприток в рудник.

На железорудных месторождениях Кривбасса критические деформации ϵ_{kp} находятся в пределах 6–9 мм/м. ООО «НОВОТЭК» для условий Яковлевского рудника в качестве критической деформации принял $\epsilon_{kp} = 8$ мм/м. Данное значение ϵ_r было использовано в качестве геомеханического критерия формирования ЗВТ при математическом и численном моделировании.

Таким образом, задавшись критической деформацией растяжения для условий Яковлевского месторождения $\epsilon_{kp} = 0,008$, специалисты ИГД УрО РАН получили допустимые величины оседаний почвы целика, при которых в целике не возникает вертикальных деформаций растяжений, которые могут привести к прорыву воды из нижнекаменноугольного горизонта. Эти оседания почвы целика можно трактовать как значения допустимой эффективной мощности отработки залежи БЖР по системе горизонтальных слоев с закладкой.

В результате расчетов получены следующие значения допустимых оседаний кровли рудовмещающего целика в зависимости от пролета выработанного пространства в крест простирания залежи БЖР [3]:

- пролет 250 м, допустимая эффективная мощность отработки залежи 2,4 м;
- пролет 350 м, допустимая эффективная мощность отработки залежи 3,3 м;
- пролет 400 м, допустимая эффективная мощность отработки залежи 3,8 м.

Дальнейшее использование данного критерия предполагает определение оседаний подземных реперов, заложенных в предохранительном целике.

Отметим, что нигде в исследованиях не были учтены вывалы руды в кровле нулевого слоя при его отработке, которые дошли по высоте до 15 м и существенно сказались на проявлениях деформационных процессов как массива целика, так и земной поверхности.

Анализ результатов мониторинга деформаций земной поверхности и массива целика

Инструментальный мониторинг сдвижения предохранительного целика из массива руды и земной поверхности в разные периоды времени, начиная с 2007 г. (наблюдения по подземным реперам, заложенным в почву целика) и с 2010 г. по поверхностным реперам, выполняли специалисты рудника совместно с учеными ИГД УрО РАН, сотрудниками Санкт-Петербургского горного университета и в последние 3 года специалисты ПНИПУ с привлечением методов радарной космической интерферометрии [4, 5]. Основной целью мониторинга являлся контроль проектных параметров подработки нижнекарбонового водоносного горизонта – допустимого оседания верхней границы отработки – нижней границы

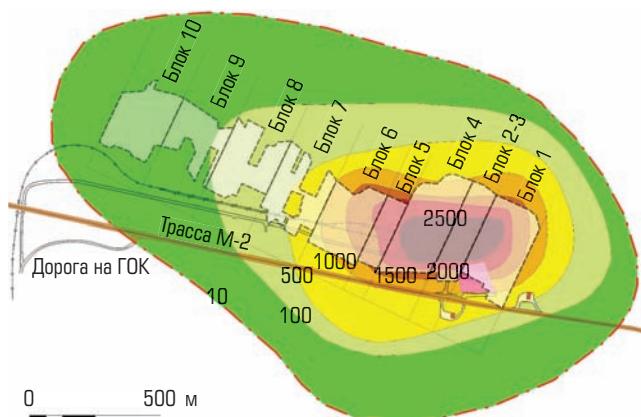


Рис. 1. Осадение (мм) земной поверхности за весь период наблюдений с 2010 г. по результатам нивелирования поверхности станции в мае 2024 г. Показано положение отработанного рудного тела на нулевом слое

предохранительного целика, фактически допустимой эффективной мощности залежи, при которой в водоупорном слое не возникнут деформации, превышающие критические.

В целом развитие процессов оседаний земной поверхности соответствует основным закономерностям, выявленным при разработке пологопадающих как рудных, так и угольных месторождений [6–8]. В начале процесса сформировалось плоское дно, затем по мере развития горных работ оно исчезло за счет снижения степени подработанности. Однако главный вывод по результатам многолетних инструментальных наблюдений за оседаниями поверхностных и подземных реперов в основных блоках заключается в том, что наблюдается 4–7-кратное (в зависимости от блока) превышение замеренных величин оседаний почвы предохранительного целика над проектными (соответственно, превышение фактической эффективной мощности над проектной). Иными словами, наблюдается весьма сильное различие между фактическими и проектными оседаниями горного массива и земной поверхности.

На **рис. 1** представлено положение мульды сдвижения земной поверхности, из чего следует, что максимальные оседания приурочены к блокам 2-3 и 4, в кровле которых наблюдаются максимальные значения вывалов. Схематичное положение отработанных блоков по простиранию на 01.2023 г. и кривой оседаний на сентябрь 2023 г. показано на **рис. 2**, откуда следует, что несмотря на сосредоточение очистных работ в блоке 6, максимумы оседаний приурочены к блокам 2-3 и 4, в которых зафиксирована максимальная интенсивность вывалов (процентное отношение объемов вывалов к добытому объему руды в блоке).

Анализ показывает, что начиная с 2017 г., по всем линиям начинается ускоренный рост оседаний большинства реперов, активно втянутых в зону сдвижения. При этом по всем профильным линиям, начиная с данного времени по сентябрь

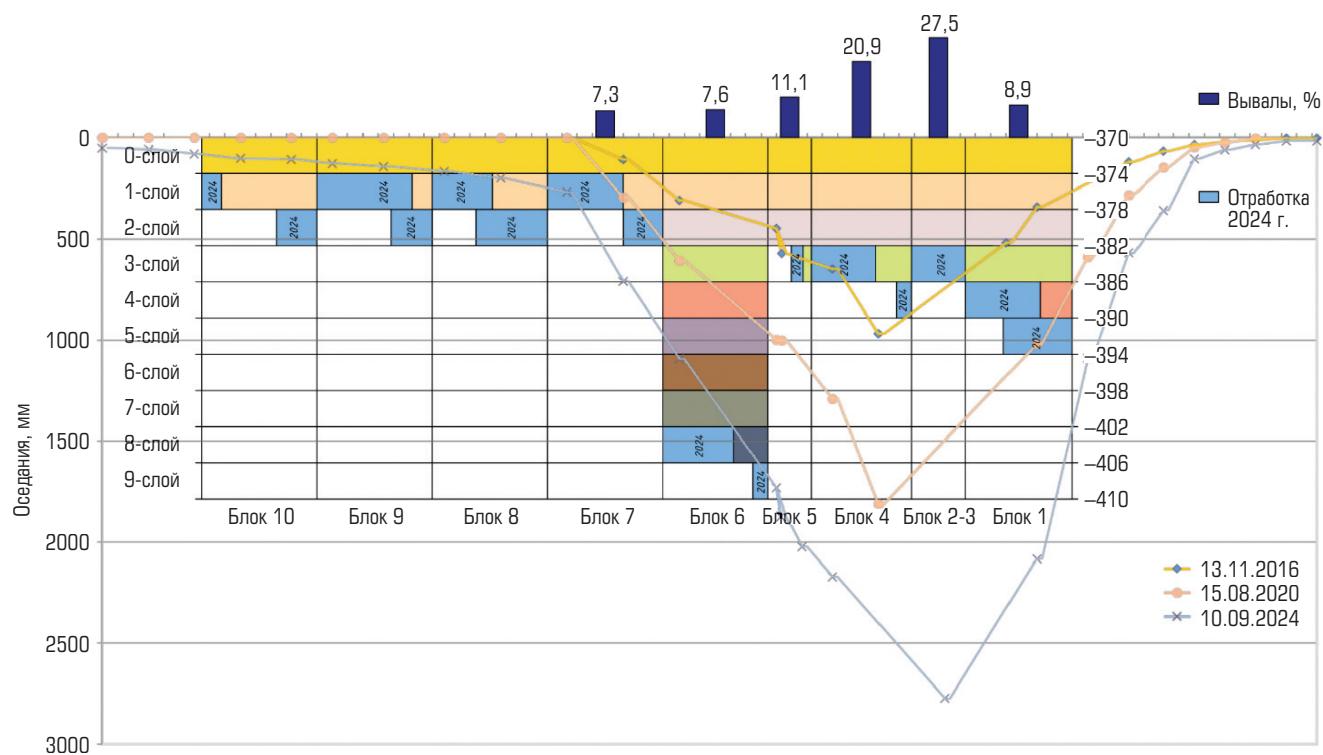


Рис. 2. Схематичное положение отработанных участков руды по простиранию месторождения, оседаний земной поверхности на ноябрь 2016 г., август 2020 г. и сентябрь 2024 г. и интенсивности вывалов по блокам

2021 г., не наблюдалось признаков замедления оседаний поверхности. Средняя скорость их роста за период с сентября 2019 г. по сентябрь 2021 г. составляет 30–35 мм/мес, т. е. представляется чрезвычайно высокой.

Максимальные оседания на начало сентября 2024 г. составили 2,85 м. В то же время наблюдения в сентябре 2022, 2023 и 2024 гг. зафиксировали снижение годовых скоростей оседаний как земной поверхности над основными блоками 4, 5, 6, так и массива предохранительного целика. Так, если скорость оседаний репера 70, расположенного над блоком 4, составила за период 09.2021–09.2022 гг. 37,2 мм/мес, то за период 09.2022–09.2023 гг. она была равна 26,3 мм/мес, а за период 09.2023–09.2024 гг. – уже 18,9 мм/мес. Вполне возможно, что это связано с началом процессов уплотнения рудного массива в зоне вывалов.

Увеличение максимальных оседаний (мм) подработанной толщи БЖР в блоках 5, 4 и 3-2, начиная с 2012 г. по 2022 г., практически происходит по линейному закону: $m_{\text{эфф}} = 230T$, где 230 – средняя скорость оседаний (19–20 мм/мес) мм/год; T – время в годах с начала 2012 г. Таким образом, если сопоставить величины оседаний по данным подземных наблюдений на сентябрь 2022 г. при отработке блоков 4 и 3-2, равные 2,8 м, и выемочной мощности отработанной части этих блоков $m = 12$ м (3 слоя), достигнутые в 2022 г., то получим, что на руднике при отработке блоков 5, 4 и 3-2 эффективная мощность $m_{\text{эфф}}$ залежи на конец

2022 г. составляет 23,3 % от выемочной мощности. Даже если оперировать для расчета величины $m_{\text{эфф}}$ оседаниями земной поверхности над блоками 5, 4 и 3-2, то она получится равной 16,6 % (при средних оседаниях над блоками порядка 2 м на сентябрь 2022 г.). Полученная в процессе мониторинга реальная оценка оседаний налегающей толщи в 4–7 раз превышает прогнозы специалистов ООО «НОВОТЭК», ИГД УрО РАН, СПбГУ. Причиной такого значительного превышения фактических оседаний подработанной налегающей толщи над расчетными является не только усадка закладочного материала и значительная, превышающая проектную, недозакладка отработанных слоевых заходок, но и влияние вывалов в кровле нулевого слоя этих блоков.

Полученные усредненные величины оседаний кровли целика над блоками 5, 4, 3-2 на 2022 и 2023 гг. (рис. 3) не превышают величины, нормируемые основным критерием (ИГД УрО РАН) и регламентирующие вопросы безопасной отработки рудника. Однако в 2024 г., учитывая существенную погрешность определения оседаний в связи с малым числом реперов, в блоках 5 и 4 будет фактически превышена критическая величина $m_{\text{эфф}}$ (см. рис. 3), что подтверждается численным моделированием (рис. 4).

Отмеченные в мае – июне 2022 г. интенсивные водопритоки в шахту, резкое снижение уровней в скважинах на нижнекаменноугольный горизонт свидетельствуют о том, что фактически водоупор, т. е. предохранительный целик, в каком-то

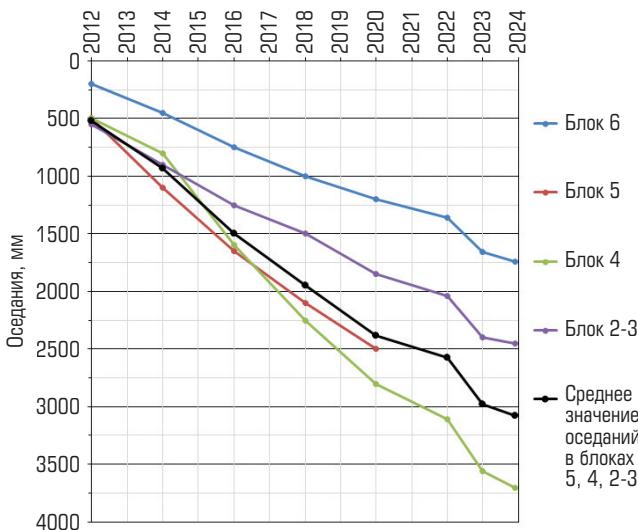


Рис. 3. Развитие во времени оседаний реперов подземной станции в основных блоках

месте оказался нарушен. Это означает превышение развившихся в целике деформаций над принятыми критическими, которые в силу неопределенности исходных геомеханических данных не могли быть установлены достаточно надежно. Нарушение критерия говорит о том, что дальнейшее его использование уже не имеет смысла. Иными словами, на данном этапе отработки блоков 1, 2-3, 4, 5, 6 следует отказаться от принятых критериев ИГД УрО РАН и СПбГУ. Однако этими критериями можно с успехом пользоваться при обеспечении безопасности отработки блоков 7–10.

Нарушение сплошности водоупора подтверждается исследованиями специалистов Санкт-Петербургского горного университета, которые предложили методику определения высоты ЗВТ, справедливо основанную на содержании глинистых пород в покрывающей толще [9, 10]. В качестве критериев оценки граничных величин параметров деформирования с учетом коэффициента запаса устойчивости, равного 2, были выбраны значения максимальной кривизны $K_r = 0,627 \cdot 10^{-3}$ 1/м и горизонтальных деформаций границы условного водоупора (подошвы карбоновых отложений) – $\varepsilon_{kp} = 0,0085 = 8,5 \cdot 10^{-3}$.

Далее, используя граничную кривизну и мощность $m = 3$ м (оседания почвы целика по данным наблюдений на 2022 г.), основываясь на закономерностях распределения деформаций в мульде, заложенных в методе типовых кривых, широко используемых на угольных месторождениях, специалисты СПбГУ определяют высоту распространения водопроводящих трещин $H_t = 138$ м. Иными словами, получается, что ЗВТ при эффективной мощности 3 м полностью вышла в водоносные слои карбона. Отметим, что подобный подход был использован при оценке безопасности полной отработки залежей рудника «Октябрьский» под водоносным горизонтом [11].

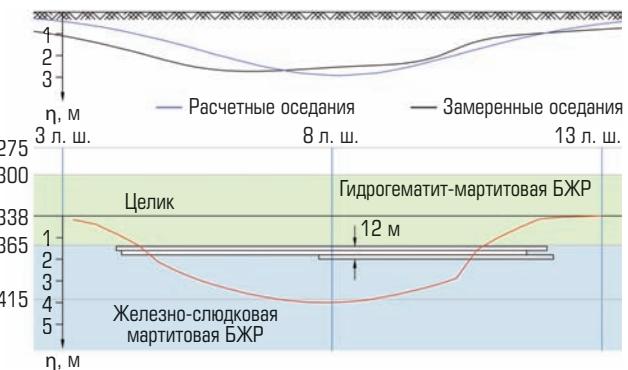


Рис. 4. Состояние горных работ на 2020 г., расчетные и замеренные оседания земной поверхности и целика (красная линия) на 2023 г. в разрезе по блоку 4

Численный анализ развития деформационных процессов

Для оценки текущего напряженно-деформированного состояния (НДС) горного массива и состояния водозащитного целика была разработана укрупненная 3D-геомеханическая модель Яковлевского рудника.

Размеры созданной модели составляют 5500 м по простирианию залежи, 4500 м в крест простириания и 1000 м по высоте. В целом модель содержит 362836 узлов и 350560 расчетных зон-ячеек. В центральной части модели, включающей отрабатываемое рудное тело и предохранительный целик, размеры расчетных ячеек составляют 20×20 м в плане и 4 м по высоте. На уровне обобщенной модели данный уровень детализации вполне достаточен для общего анализа деформационных процессов на месторождении.

Выделение в модели рудных зон, зон кварцитов и сланцев осуществляли на основании геологических разрезов в крест простириания, а контуры отработанных и заложенных рудных тел на различные даты определяли по планам развития горных работ. В верхней части модели воспроизведена слоистая толща покрывающих пород, включающая водоносные горизонты, юрские, келловейские и четвертичные отложения.

В качестве базовой механической модели руд была принята упругопластическая модель Кулона – Мора с разупрочнением как наиболее часто применяемая на практике [12–15]. В данной модели, помимо стандартных показателей, присутствуют параметры, определяющие характер и степень снижения прочностных свойств по мере развития пластических деформаций [16–19]. В настоящей работе принят линейный закон снижения исходных прочностных показателей C и ϕ до остаточных значений C^* и ϕ^* по мере роста эквивалентных пластических деформаций до некоторого референтного значения.

Массив кварцитов моделировали упругой средой, а в качестве модели покрывающих пород применена упругопластическая анизотропная модель, так как для слоистых осадочных пород характерна выраженная анизотропия упругих свойств.

Выемку очистных блоков моделируют путем деактивации соответствующих зон с последующим их заполнением линейно деформируемым материалом с эффективными характеристиками, отражающими суммарный эффект недозакладки и усадки закладочного материала. В модели также предусмотрена возможность учета пустот, образующихся в кровле нулевого слоя из-за недостаточно устойчивого массива (купола и вывалы). Данные пустоты также моделируют как линейно деформируемую среду с эффективными характеристиками обрушенных пород, которыми они заполняются при деформировании налегающего массива. Деформационные параметры закладочного массива и обрушенных пород определяли в ходе калибровки модели по результатам инструментальных наблюдений: для закладки $E_3 = 40$ МПа, $\nu = 0,2$; для обрушенных пород $E_b = 15$ МПа, $\nu = 0,2$.

За начальный этап принимали состояние горных работ на 01.07.2017 г. Выбор дат моделирования частично обусловлен проблемой учета влияния вывалов на НДС массива. В связи с недостаточностью исходной информации было принято, что к 2017 г. вывалы полностью сформировались. Второй проблемой является учет временного лага между выполнением горных работ и проявлением вызванных этим оседаний на земной поверхности. На основании подробных исследований временная задержка была принята равной ≈ 3 года. Таким образом, при расчете НДС по состоянию горных работ на 01.07.2017 г. измеренные оседания поверхности принимали по данным серии наблюдений 2020 г. На рис. 4 представлены расчетные и замеренные оседания земной поверхности и массива руды по средней линии целика. Можно отметить достаточно хорошее соответствие замеренных и рассчитанных оседаний.

В настоящее время на Яковлевском руднике за критические вертикальные деформации принимают значение 8 мм/м. С учетом того, что максимальные расчетные вертикальные деформации в 1,5–2 раза выше, чем в среднем по всему объему целика, можно видеть, что на 2020 г. вертикальные деформации превышают критическое значение (рис. 5). При этом наиболее вероятными местами образования водопроводящих трещин являются участки массива, примыкающие к краевым частям отработанных участков блоков или контактам отработанного рудного тела с породами висячего и лежачего бока; суммарная ширина таких участков составляет порядка 40–60 м. Кроме того, отмечается приуроченность концентрации деформаций к краевым частям мульды оседания на поверхности. В то же время, если выполнять моделирование с учетом этапов отработки каждого слоя, то получится распространение концентрации деформаций от центра блока к краям, т. е. вся область над выработанным пространством блоков является нарушенной с наличием деформаций, значения которых превышают полученные моделированием.

В условиях, когда на части рудного поля действующий критерий превышен, возникает вопрос о возможности дальнейшего развития горных работ на данных участках. Эта проблема

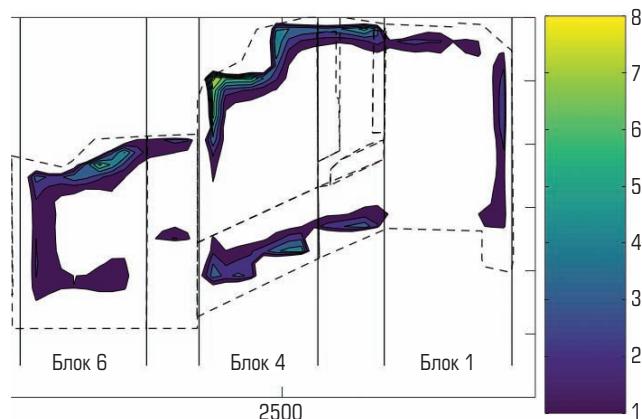


Рис. 5. Средние вертикальные деформации (мм/м) водозащитного целика на 2020 г.

в значительной степени сводится к прогнозу водопритоков в рудник в сложившейся горнотехнической ситуации.

При рассмотрении данного вопроса была использована методика расчета водопритоков ООО «НОВОТЭК», в которой отмечено, что основным фактором, влияющим на увеличение водопритоков, является увеличение коэффициента фильтрации рудного целика при изменении напряженного состояния массива в ходе ведения горных работ. Этот процесс может быть описан зависимостью [20]: $K = K_0 \exp(ak_0 ac_0 \Delta J_1)$, где K_0 – исходная проницаемость; ak_0 – коэффициент, учитывающий вид и плотность пород; ac_0 – коэффициент относительной сжимаемости пород; ΔJ_1 – изменение первого инварианта тензора напряжений. Изменение первого инварианта тензора напряжений определяли на основании численных расчетов разработанной трехмерной геомеханической модели. На основании полученных расчетных данных было оценено изменение первого инварианта напряжений ΔJ_1 в блоке 4 (наиболее опасный блок в плане прорывов) относительно исходного состояния.

Значение коэффициента фильтрации в зависимости от параметра ak_0 изменяется от 2 до 9 раз. В том случае, если параметры слабопроницаемого разделяющего слоя, представленного глинистыми отложениями в подошве каменноугольных пород, плотными переотложенными рудами и карбонатизированными бокситовыми образованиями, между нижнекаменноугольным и руднокристаллическим водоносными горизонтами при расчетах не изменяются [$k = 2 \cdot 10^{-4}$ м/сут], то соответствующие водопритоки в шахту растут от 715 до 790 м³/ч. Иными словами, при увеличении коэффициента фильтрации в пределах рудного тела в 2–8 раз водоприток в рудник увеличивается всего на 5–10 %.

Соответствующие результаты при снижении коэффициента фильтрации слабопроницаемого разделяющего слоя в 2 и 5 раз в результате подработки представлены в **таблице**.

Вышеприведенные расчеты показывают, что по мере развития деформационных процессов в целике не ожидается

катастрофических водопритоков. Рост водопритока в шахту при отработке рудного тела, согласно плану работ на 2024 г. и последующей выемке всех запасов нулевого и первого слоев, можно принять $800 \text{ м}^3/\text{ч}$. Опираясь на требования нормативных документов [21, 22], учитывая существенную неопределенность входящих в расчетную базу параметров и принимая в расчет максимальный рост коэффициента фильтрации, можно принять для соответствующих критерии I и II уровня с коэффициентами 1,25 и 1,5 соответственно 1000 и 1200 $\text{м}^3/\text{ч}$.

Данные критерии считаются превышенными, если среднечасовое поступление воды за месяц превышает критерий I уровня в течение 3 мес подряд (для критерия II уровня превышение составляет не менее 2 мес подряд)

Заключение

В рамках данной работы показано, что эффективное решение проблемы безопасной отработки месторождения с весьма сложными горно-геологическими условиями базируется на комплексном использовании самых современных методов мониторинга, численного и аналитического моделирования. При этом детальность и достоверность результатов расчетов определяется степенью детальности и полнотой имеющихся данных о свойствах и строении пород водозащитной толщи (в данном случае предохранительного целика), параметрическим

Водопритоки в рудник при снижении коэффициента фильтрации слабопроницаемого разделяющего слоя в 2 и в 5 раз в результате подработки

Коэффициент фильтрации $k_0, \text{ м}/\text{сут}$		Водоприток в рудник, $\text{м}^3/\text{ч}$	
руды	слабопроницаемого слоя	при $k_0 = 6 \cdot 10^{-4}$	при $k_0 = 1,5 \cdot 10^{-3}$
0,2	$6 \cdot 10^{-4}$	765	805
0,3		775	815
0,4		780	820
0,8		810	845

обеспечением геомеханической модели и надежностью данных мониторинга деформированного состояния горного массива и земной поверхности.

Итоговым результатом данной работы явилось установление причин значительного несоответствия проектных и фактических параметров деформирования массива предохранительного целика и земной поверхности и, как следствие, нарушения принятого на предприятии критерия допустимой эффективной мощности отработки залежи. Проведенные геомеханические расчеты показали, что доработка запасов нулевого и первого слоев в 2025 г. не приведет к катастрофическим водопритокам в рудник.

Библиографический список

- Григорьев А. М., Зотеев О. В., Макаров А. Б., Серафимин А. П. Разработка Яковлевского месторождения под водоносными горизонтами системой с закладкой // Развитие идей Д. М. Бронникова в области разработки рудных месторождений на больших глубинах: к 100-летию со дня рождения члена-корреспондента АН СССР Д. М. Бронникова: матер. Междунар. конф. – М. : ИПКОН РАН, 2013. С. 84–96.
- Григорьев А. М., Зотеев О. В., Макаров А. Б. Геомеханическое обоснование мониторинга массива при разработке рул Яковлевского месторождения КМА под неосущенными водоносными горизонтами // ГИАБ. 2013. Отдельный выпуск 4. С. 27–37.
- Регламент гидрогеомеханического мониторинга отработки запасов богатых железных руд Яковлевского месторождения. – Екатеринбург : ИГД УрО РАН, 2020.
- Дашко Р. Э., Ковалева Е. Н. Гидрогеологический мониторинг на Яковлевском руднике как инструмент повышения безопасности ведения очистных работ в сложных горно-геологических условиях // Записки Горного института. 2010. Т. 195. С. 19–23.
- Тютюкова В. А., Голубничий Д. В., Гилязев Д. Х. Определение оседаний земной поверхности по результатам совместной интерферометрической обработки данных космического радиолокационного зондирования Земли со спутников Sentinel-1a и Sentinel-1b // Маркшейдерия и недропользование. 2023. № 2(124). С. 69–75.
- Qu Q., Guo H., Khanal M. Monitoring and analysis of ground movement from multi-seam mining // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 2021. Vol. 148. ID 104949.
- Hejmanowski R., Sroka A. Time-space ground subsidence prediction by volume extraction from the rock mass // Proceedings of the 6th International Symposium on Land Subsidence. – Ravenna, 2000. Vol. 2.
- Ai Z. Y., Liang Q., Ye Z. K., Hu Z. K. Stress Distribution Around Arbitrarily Shaped Shallow Buried Tunnels in Transversely Isotropic Rock Mass // International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics. 2025. Vol. 49. Iss. 5. P. 1378–1395.
- Гвицман Б. Я., Кацельсон Н. Н., Бошенятов Е. В., Несторов Г. А., Самарин В. П. Безопасная выемка угля под водными объектами. – М. : Недра, 1977. – 175 с.
- Гусев В. Н. Прогноз безопасных условий разработки свиты угольных пластов под водными объектами на основе геомеханики техногенных водопроводящих трещин // Записки Горного института. 2016. Т. 221. С. 638–643.
- Дарбинян Т. П., Жерлыгина Е. С., Андреев А. А., Попов А. К. Оценка безопасности полной отработки залежей рудника «Октябрьский» под водонапорным горизонтом на основе определения высоты зоны водопроводящих трещин // Горный журнал. 2024. № 3. С. 25–33.
- Протосеня А. Г., Беляков Н. А., Буслова М. А. Моделирование напряженно-деформированного состояния блочного горного массива рудных месторождений при отработке системами разработки с обрушением // Записки Горного института. 2023. Т. 262. С. 619–627.
- Корчак П. А., Карасев М. А. Геомеханическое обоснование формирования зон хрупкого разрушения пород в окрестности сопряжений горных выработок рудников АО «Апатит» // Устойчивое развитие горных территорий. 2023. Т. 15. № 1(55). С. 67–80.
- Еременко А. А. Особенности отработки слепых рудных тел при геодинамической активности массива налегающих и вмещающих горных пород в окрестности выработанных пространств // Горный журнал. 2025. № 1. С. 94–99.
- Ye Z. K., Ai Z. Y. Non-iterative stress-displacement solution for surrounding rock mass with multiple non-circular deep tunnels // International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics. 2024. Vol. 48. Iss. 13. P. 3261–3283.
- Wittke W. Rock Mechanics Based on an Anisotropic Jointed Rock Model. – Weinheim : Ernst & Sohn, 2014. – 900 p.
- Jaeger J. C., Cook N. G. W., Zimmerman R. W. Fundamentals of Rock Mechanics. 4th ed. – Blackwell Publishing, 2007. – 488 p.

18. Жабко А. В. Критерий прочности блочных сред и обратные геомеханические расчеты // Известия вузов. Горный журнал. 2020. № 6. С. 37–47.
19. Li Y., Tang H., Zhu F., Hu Z. An anisotropic elastoplastic strong discontinuity model for shear failure in anisotropic rock masses // Computers and Geotechnics. 2024. Vol. 176. ID 106762.
20. Мироненко В. А., Шестаков В. М. Основы гидрогеомеханики. – М. : Недра, 1974. – 295 с.
21. РД 03-443-02. Инструкция о порядке определения критериев безопасности и оценки состояния гидротехнических сооружений накопителей

«GORNYI ZHURNAL», 2025, № 10, pp. 28–34
DOI: 10.17580/gzh.2025.10.04

Deformation processes in rock mass during mining of the Yakovlevskoe deposit

Information about authors

Yu. A. Kashnikov¹, Head of Department, Doctor of Engineering Sciences, Professor, geotech@psstu.ru

S. G. Ashikhmin¹, Doctor of Engineering Sciences, Professor

D. V. Golubnichiy², CEO

D. Kh. Gilyazev², Head of Hydromechanical Monitoring Services

¹Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russia

²Yakovlevsky Mining and Processing Plant (GOK), Yakovlevo, Belgorod Region, Russia

Abstract

In the Technical Project for the development of iron ores at the Yakovlevskoe deposit, safety measures have been designed to prevent water breakthrough from the un-dewatered Lower Carboniferous aquifer during extraction of rich ores using a descending horizontal layer system with backfilling. These measures include leaving a protective pillar of ore mass with a thickness of 65 meters under the water-bearing Lower Carboniferous horizon at a level of -300 meters, creating an artificial protective ceiling in the upper part of the mined-out level using higher strength backfill, and conducting descending layer extraction of ore with full backfill of mined-out space using hardening mixtures.

The results of long-term instrumental observations of the surface and underground benchmarks in the main blocks indicate that the measured soil subsidence above the protective pillar exceeds the projected values by 4–7 times (correspondingly, the actual effective thickness exceeds the projected one). To clarify the reasons for this phenomenon and to assess the current stress-strain behavior of the rock mass and the condition of the water protection pillar, a large-scale 3D geomechanical model was developed. Its parametric framework was based on the results of instrumental observations and tests of the physical and mechanical properties of rocks and ores. The base mechanical model of the ore mass was adopted to be the Mohr-Coulomb elastoplastic model with softening, including parameters governing the nature and degree of strength reduction in the course of development of plastic deformations, in addition to standard indicators. The modeling results clarified the current situation and allowed the prediction of the maximum water inflows into the mine as mining operations continued.

Keywords: geomechanics, instrumental observations, undermining, aquifers, strain state, numerical modeling.

References

1. Grigorev A. M., Zoteev O. V., Makarov A. B., Serafimin A. P. Development of the Yakovlevo deposit by systems of mining with backfill under aquifers. *Development of D. M. Bronnikov's Ideas on Ore Deposits at Great Depths: To Commemorate the 100th Anniversary of Corresponding Member of the USSR Academy of Sciences D. M. Bronnikov. International Conference Proceedings*. Moscow : IPKON RAN, 2013. pp. 84–96.
2. Grigorev A. M., Zoteev O. V., Makarov A. B. Geomechanical substantiation of Yakovlevskoe deposit development under undrained water-bearing horizons. *MIAB*. 2013. Special issue 4. pp. 27–37.
3. Hydrogeomechanical Monitoring Procedure for Mining High-Grade Iron Ore of the Yakovlevskoe Deposit. Yekaterinburg : IGD UrO RAN, 2020.
4. Dashko R. E., Kovaleva E. N. Hydro-geological monitoring on the Jakovlevsky mine as implement of increase safety conducting mine second working in difficult liquid-rich industrial wastes on the supervision of Gosgortekhnadzor of Russia : Approved by Gosgortekhnadzor of Russia, Decree No. 10 as of February 4, 2002. Available at: <https://docs.cntd.ru/document/901811029> (accessed: 29.08.2025).
5. Tyutyukova V. A., Golubnichiy D. V., Gilyazev D. Kh. Determination of land surface subsidence from the joint interferometric processing of Sentinel-1A and Sentinel-1B spaceborne radar data. *Marksheyderiya i nedropolzovanie*. 2023. No. 2(124). pp. 69–75.
6. Qu Q., Guo H., Khanal M. Monitoring and analysis of ground movement from multi-seam mining. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2021. Vol. 148. ID 104949.
7. Hejmanowski R., Sroka A. Time-space ground subsidence prediction by volume extraction from the rock mass. *Proceedings of the 6th International Symposium on Land Subsidence*. Ravenna, 2000. Vol. 2.
8. Ai Z. Y., Liang Q., Ye Z. K., Hu Z. K. Stress distribution around arbitrarily shaped shallow buried tunnels in transversely isotropic rock mass. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*. 2025. Vol. 49, Iss. 5. pp. 1378–1395.
9. Gvirtsman B. Ya., Katsnelson N. N., Boshenyatov E. V., Nesterov G. A., Samarin V. P. Safe Coal Mining Under Water-Bearing Objects. Moscow : Nedra, 1977. 175 p.
10. Gusev V. N. Forecasting safe conditions for developing coal bed suites under aquifers on the basis of geomechanics of technogenic water-conducting fractures. *Journal of Mining Institute*. 2016. Vol. 221. pp. 638–643.
11. Darbinyan T. P., Zherlygina E. S., Andreev A. A., Popov A. K. Evaluation of safety of full ore extraction under aquifer by determining fractured water-conducting zone height in Oktyabrsky Mine. *Gornyi Zhurnal*. 2024. No. 3. pp. 25–33.
12. Protosenya A. G., Belyakov N. A., Buslova M. A. Modelling of the stress-strain state of block rock mass of ore deposits during development by caving mining systems. *Journal of Mining Institute*. 2023. Vol. 262. pp. 619–627.
13. Korchak P. A., Karasev M. A. Geo-mechanical prediction of the brittle fracture zones in rocks in the vicinity of the excavation junction of LTD "Apatit" mines. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2023. Vol. 15, No. 1(55). pp. 67–80.
14. Eremenko A. A. Peculiarities of blind ore body mining in case of geodynamic activity of overlying and enclosing rock mass nearby mined-out voids. *Gornyi Zhurnal*. 2025. No. 1. pp. 94–99.
15. Ye Z. K., Ai Z. Y. Non-iterative stress-displacement solution for surrounding rock mass with multiple non-circular deep tunnels. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*. 2024. Vol. 48, Iss. 13. pp. 3261–3283.
16. Wittke W. Rock Mechanics Based on an Anisotropic Jointed Rock Model. Weinheim : Ernst & Sohn, 2014. 900 p.
17. Jaeger J. C., Cook N. G. W., Zimmerman R. W. Fundamentals of Rock Mechanics. 4th ed. Blackwell Publishing, 2007. 488 p.
18. Zhabko A. V. The criterion of block media strength and geomechanical back-calculation. *Izvestiya vuzov. Gornyi zhurnal*. 2020. No. 6. pp. 37–47.
19. Li Y., Tang H., Zhu F., Hu Z. An anisotropic elastoplastic strong discontinuity model for shear failure in anisotropic rock masses. *Computers and Geotechnics*. 2024. Vol. 176. ID 106762.
20. Mironenko V. A., Shestakov V. M. Basic Hydrogeomechanics. Moscow : Nedra, 1974. 295 p.
21. RD 03-443-02. Guide to determine safety criteria and condition of hydrotechnical facilities for storage of liquid industrial waste at industries, objects and organizations under supervision of Gosgortekhnadzor of Russia : Approved by Gosgortekhnadzor of Russia, Decree No. 10 as of February 4, 2002. Available at: <https://docs.cntd.ru/document/901811029> (accessed: 29.08.2025).
22. Rules of safety during mining operations and processing of solid minerals : Federal performance requirements in industrial safety area : Approved by Rostekhnadzor, Order No. 505 as of 8 December 2020. Available at: <https://docs.cntd.ru/document/573156117> (accessed: 29.08.2025).