

УДК 550.34; 622.83

**НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ МАССИВА ГОРНЫХ ПОРОД
КОРОБКОВСКОГО ЖЕЛЕЗОРУДНОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ
НА УЧАСТКЕ ЗОНЫ ТЕКТОНИЧЕСКИХ НАРУШЕНИЙ**

**Г. Г. Кочарян¹, С. Р. Золотухин², Э. В. Калинин³,
Л. Л. Панасьян³, В. Г. Спунгин¹**

¹Институт динамики геосфер РАН, E-mail: gevorgkidg@mail.ru,
Ленинский проспект, 38, корп. 1, 119334, г. Москва, Россия

²АО "Комбинат КМАруда", E-mail: info@kmaruda.ru,
ул. Артема, 2, 309510, Белгородская область, г. Губкин, Россия

³Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова,
E-mail: admin@geol.msu.ru, Ленинские горы, 1, 119991, г. Москва, Россия

С учетом физико-механических характеристик пород и расположения структурных элементов массива рассчитаны величины действующих литостатических напряжений. Полученные результаты сопоставлены с данными натурных наблюдений. Показано, что вертикальные напряжения закономерно возрастают с глубиной, хотя вдоль горизонтальных сечений их значения сильно различаются из-за сложной структуры массива. В среднем вертикальные напряжения близки к литостатическим. Горизонтальные напряжения, измеренные методом разгрузки, многократно превышают значения, полученные расчетным путем, что обусловлено неоднородностью свойств массива или свидетельствует о присутствии тектонического сжатия.

Массив горных пород, зоны разломов, подземная разработка, железорудное месторождение, литостатические напряжения, аналитические расчеты, натурные измерения

DOI: 10.15372/FTPRPI20180102

Известно, что наличие разломов затрудняет работы при проходке и эксплуатации подземных выработок. Деформации и разрушения подземных выработок в значительной степени определяются расположением близлежащих разломов [1, 2].

Выбор технологии проходки, типа и конструкции крепи горных выработок зависит от прочностных характеристик литологических разностей, интенсивности трещиноватости, первоначального напряженного состояния массива горных пород. Эти параметры существенно меняются в зонах влияния крупных тектонических нарушений. Важно подчеркнуть, что проблемы, связанные с нестабильностью пород, часто возникают даже в тех случаях, когда выработка не пересекает зону разлома, а расположена на некотором расстоянии от нее [3, 4]. Это, очевидно, вызвано изменением напряженно-деформированного состояния среды и/или гидрогеологического режима [5 – 8].

Считается, что на небольших глубинах соотношение компонент поля напряжений согласуется с гипотезой А. Н. Динника и усредненная горизонтальная компонента меньше вертикальной. Превышение горизонтальной компоненты над вертикальной обычно объясняется либо наличием региональных тектонических напряжений, либо эрозией значительного по мощности поверхностного слоя пород [9].

В результате проведенных на Коробковском железорудном месторождении Курской магнитной аномалии (КМА) измерений параметров поля напряжений в массиве установлено, что в пределах отдельных участков заметно превышение горизонтальных напряжений над вертикальными [10, 11], что вызывает определенные опасения в связи с имеющимися планами перехода горных работ на более глубокие горизонты. В настоящей работе выполнены расчеты действующих в массиве литостатических напряжений с учетом физико-механических характеристик пород и расположения структурных нарушений — разломов, даек, нарушенных зон. Расчеты осуществлялись в двумерном варианте по геологическому разрезу, пересекающему наиболее крупную зону тектонических нарушений на участке добычи руды. Оценка параметров поля напряжений по данным численных расчетов может служить отправной точкой для анализа результатов инструментальных наблюдений.

КРАТКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ГЕОЛОГИЧЕСКОГО СТРОЕНИЯ КОРОБКОВСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ И НАИБОЛЕЕ КРУПНОЙ ЗОНЫ ТЕКТОНИЧЕСКИХ НАРУШЕНИЙ В ЕГО ПРЕДЕЛАХ

Коробковское железорудное месторождение, известное с 1919 г., входит в состав железорудных месторождений КМА и представлено крутопадающими залежами железистых кварцитов нижнего протерозоя. В его строении выделяют две железорудные подсвиты — нижнюю коробковскую ($PR_1 kr_1$) и верхнюю коробковскую ($PR_1 kr_3$), разделенные промежуточной сланцевой подсвитой ($PR_1 kr_2$). С поверхности залежи перекрыты осадочными образованиями девонской, юрской, меловой и четвертичной систем общей мощностью 65–178 м. Всего на месторождении выделено 8 рудных залежей длиной 380–3500 м и горизонтальной мощностью 50–1050 м. Мощность наиболее крупной Главной залежи колеблется в пределах 500–1000 м, Стретенской — 120–400 м, Юго-Восточной — 150–200 м, Восточной — 100–200 м. Общая площадь месторождения составляет около 5 км², его большая часть (~90 %) находится в пределах городской черты г. Губкин. С 1952 г. месторождение разрабатывается подземным способом АО “Комбинат КМАруда”. Добыча руды ведется с помощью взрывных работ, этажно-камерной системой разработки под защитой предохранительной рудной потолочины, опирающейся на систему междукамерных целиков. Безопасность разработки месторождения обеспечивается прочностью конструкции “потолочина–камеры–целики”, зависящей от структурно-тектонического строения и физико-механических свойств руд и горных пород, наиболее ослабленных в зонах тектонических нарушений разных порядков. К настоящему времени практически все залежи и большая часть Стретенской выработаны на уровне этажа между гор. –70 и –125 м. Обсуждаются вопросы безопасности разработки месторождения на более глубоком этаже между гор. –125 и –180 м.

Результаты натурных измерений напряженно-деформированного состояния показали, что в массиве пород Главной залежи на глубинах от +30 до –200 м горизонтальные напряжения в 1.5–2.0 раза превышают вертикальные [10–12]. Вместе с тем до настоящего времени никаких геодинамических проявлений при разработке Коробковского месторождения не наблюдалось, что свидетельствует о спокойной геодинамической обстановке в пределах его рудного поля.

На Коробовском месторождении выявлено 11 зон разломов северо-западного, 3 зоны северо-восточного и 1 разлом субширотного простирания. Большая их часть отражена в геофизических полях в виде зон резких градиентов магнитного поля, поля силы тяжести либо линий смещения таких зон в плане. Однако смещений в подошве меловых отложений по этим разломам не отмечалось, что свидетельствует об их низкой активности на современном этапе. Вместе с тем по части разломов сформированы палеодолины в предчетвертичном рельефе. Предполагается, что такие разломы проявляются в осадочном чехле как зоны повышенной трещиноватости, подвергавшиеся в предчетвертичное время избирательному размыву. Именно с ними связываются возможные геодинамические риски при проведении горных работ, не исключается техногенная активизация разломов.

Наиболее крупная зона тектонических нарушений, представленная тектонической брекчией и сильнотрещиноватыми рудными и безрудными породами общей мощностью около 100 м, была вскрыта горизонтальной горной выработкой в начале 80-х годов прошлого века на участке сочленения Главной и Стретенской залежей. Прочность массива здесь незначительная, в связи с чем обработка участка этажно-камерной системой, применяемой на шахте им. Губкина, длительное время не осуществлялась.

В настоящее время эта зона вскрыта вентиляционными ортами на уровне гор. –71 м, а также откаточными ортами на уровне гор. –125 м. Простирание зоны северо-западное с углом 285–295°, в целом близкое к простиранию протерозойских пород и Стретенской залежи, падение практически вертикальное. В пределах зоны находятся полосы сильнотрещиноватых дробленых протерозойских пород (рис. 1), физико-механические свойства которых приближаются к свойствам щебенки.

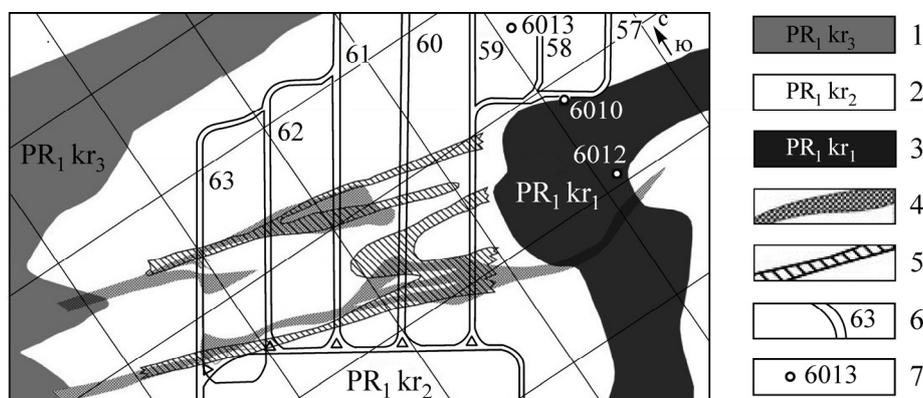


Рис. 1. Строение зоны тектонических нарушений Коробовского месторождения в плане. Сетка 100 × 100 м: 1 — верхняя железорудная подсвита; 2 — промежуточная сланцевая подсвита; 3 — нижняя железорудная подсвита (состав горных пород этих подсвит приведен в таблице); 4 — полосы сильнотрещиноватых пород в зоне тектонических нарушений на гор. –71 м; 5 — полосы сильнотрещиноватых пород в зоне тектонических нарушений на гор. –125 м; 6 — схема вентиляционных ортов на гор. –71 м и номер орта; 7 — положение скважины по профилю XXVI-150 на дневной поверхности и номер

Мощность и количество этих полос меняется вдоль простирания и падения зоны. Общая мощность зоны на участках, вскрытых горными выработками, варьирует от 80 до 120 м, мощность отдельных полос интенсивно дробленых пород в ее пределах — от 3 до 30 м. Количество таких полос в разных горных выработках, пересекающих зону нарушений, колеблется от 2 до 4. Между этими полосами массив интенсивно расчленен прослоями сланцев, диорит-порфирито-

выми и гнейсовыми дайками, послойными трещинами с зеркалами скольжения. Трещины заполнены глиной трения и рыхлыми материалами, по ним наблюдается капез. Прочность пород на одноосное сжатие на участке зоны изменяется от 12.0 до 28.1 МПа. Средняя прочность образцов пород участка 17.0 МПа при коэффициенте вариации 0.42. Коэффициент крепости пород участка по шкале Протодяконова $f \leq 2$. Обеспечение устойчивости горных выработок в пределах полос наиболее дробленых пород осуществляется с помощью массивных железобетонных конструкций.

Установлена гидравлическая связь зоны с водоносными осадочными породами. Опережающими скважинами на удалении 30 м от забоя на гор. –71 м подсечена обводненная зона с дебитом $2.5 \text{ м}^3/\text{ч}$ при напоре до 15 атм. При проведении гидроразрыва в этих скважинах на удалении от стенки выработки $\sim 0.3 \text{ м}$ кривая нагнетания не имела пика критической нагрузки, т. е. в непосредственной близости от контура выработки прочность массива на разрыв крайне мала, а на удалении от него $\sim 1.8 \text{ м}$ оценивается как незначительная — $\sim 1.2 \text{ МПа}$.

Для расчета действующих в массиве Коробковского месторождения напряжений и влияния на НДС массива описываемой зоны тектонических нарушений выбран разрез в северо-западной его части по профилю XXVI-150 (рис. 2), составленный по скважинам детальной разведки Стретенской залежи. В геологическом строении разреза участвуют крутопадающие толщи железистых кварцитов и сланцев коробковской свиты нижнего протерозоя, перекрытые сверху горизонтально залегающими мезо-кайнозойскими карбонатными и песчано-глинистыми отложениями мощностью около 120 м.

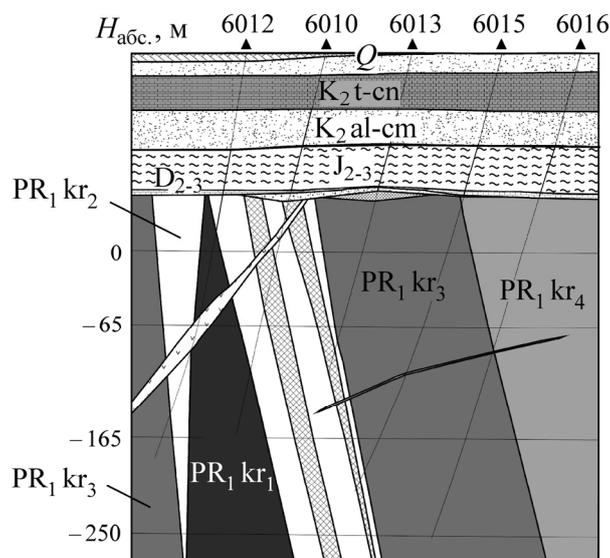


Рис. 2. Схематический геологический разрез по линии XXVI-150. Условные обозначения протерозойских образований соответствуют приведенным на рис. 1. Состав мезо-кайнозойских отложений дан в таблице

Зона тектонических нарушений представлена здесь двумя полосами сильнотрещиноватых пород, расположенных в толще промежуточной сланцевой подсвиты $PR_1 kr_2$. Одна полоса (левая на рис. 2) мощностью от 15 до 20 м распространяется на всю глубину разреза, другая (правая на рис. 2) выклинивается с глубиной. Ее мощность меняется по падению от 15 до 5 м. Протерозойские образования и зона нарушений пересекаются также двумя дайками диоритового состава. Мощность одной из них достигает 15 м, другой не превышает 5 м.

МЕТОДИКА РАСЧЕТОВ ПОЛЯ НАПРЯЖЕНИЙ

Поле напряжений в массиве пород для выбранного разреза рассчитывалось в рамках задачи плоской теории упругости для прямоугольной области. Решение осуществлялось вариационно-разностным методом [13, 17], где, как известно, используются не уравнения равновесия, а функционал полной энергии деформации, который в положении равновесия системы является стационарным. Дифференциальные соотношения в выражении полной энергии деформации заменяются разностными. Минимизация полной энергии деформации приводит к системе алгебраических уравнений относительно узловых перемещений.

Краевая задача решалась с применением оригинального набора итерационных параметров с помощью приема, учитывающего значения функций в “законтурных точках” [17]. В итерационном процессе вычислялись узловые перемещения, по которым определялись деформации, а затем напряжения. Программа LEVMAG, реализующая этот вариационно-разностный метод, разработана специалистами механико-математического и геологического факультетов МГУ [14]. Ранее примененная методика расчета использовалась для исследования закономерностей изменения структуры поля напряжений в массивах сложного геологического строения, например Кольской сверхглубокой скважины, Норильского месторождения и др. [15, 16].

Для решения поставленной задачи выбранный геологический разрез Коробковского месторождения представлен в виде прямоугольной области шириной 400 и глубиной 450 м. На эту область наложена прямоугольная сетка с шагом 5 м, имеющая по горизонтали 81 и по вертикали 91 точку в центре ячеек. В каждой из 7371 ячеек заданы объемный вес пород, модуль упругости и коэффициент Пуассона. Граничные условия: верхняя граница свободна от напряжений, нижняя жестко закреплена, на боковых границах запрещены горизонтальные перемещения, но разрешены вертикальные. На границах областей с различными свойствами соблюдается условие непрерывности перемещений. Значения деформационных свойств горных пород, используемые в расчетах, представлены в таблице.

Значения деформационных свойств горных пород, используемые в расчетах НДС

Тип и возраст горных пород	Объемный вес, т/м ³	Коэффициент Пуассона	Модуль Юнга, МПа
Суглинки Q	1.81	0.28	0.20
Мел трещиноватый K_2 t-сн	1.92	0.28	6.00
Песок K_2 al-сн	1.62	0.32	0.40
Глина песчаная J_{2-3}	1.97	0.40	8.00
Песчаник D_{2-3}	2.25	0.14	40.00
Рудные брекчии	3.37	0.14	120.00
<i>Коробковская свита.</i> Сланцы двуслюдяные, биотитовые, гранато-биотитовые PR_1 kr_4	2.82	0.30	64.00
<i>Верхняя железорудная подсвита.</i> Кварциты магнетитовые, амфиболо-магнетитовые, железно-слюдково-магнетитовые с прослоями малорудных кварцитов и межрудных сланцев PR_1 kr_3	3.40	0.27	143.00
<i>Промежуточная сланцевая подсвита.</i> Сланцы кварцево-двуслюдяные, кварцево-гранато-биотитовые PR_1 kr_2	2.88	0.26	123.00
<i>Нижняя железорудная подсвита.</i> Кварциты куммингтонито-магнетитовые, карбонатно-актинолитовые-магнетитовые, железно-слюдково-магнетитовые, талько-карбонатно-магнетитовые PR_1 kr_1	3.36	0.22	113.15
Дайки диоритового состава	2.68	0.29	69.00
Полосы сильнотрещиноватых пород в зоне тектонических нарушений на участке смыкания Главной и Стретенской залежей	2.00	0.40	0.46

Для всех разновидностей пород, слагающих разрез, использованы средние значения деформационных свойств, полученные при испытаниях образцов, изготовленных из монолитов, отобранных в горных выработках Коробковского месторождения. Измерения выполнены в разные годы по стандартным методикам в лабораториях ВИОГЕМ, Воронежского университета, ФГУ ГЦАС “Воронежский” и ООО “ГеоСпецСтрой-Инжиниринг” (г. Пушкин, Московская обл.) и приведены в отчетах этих организаций, находящихся в фондах АО “Комбинат КМАруда”. Для полос сильнотрещиноватых пород в зоне тектонических нарушений приняты минимальные из полученных значений для соответствующих пород.

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Согласно данным расчета, установлены распределения напряжений в рассматриваемом модельном массиве. Изолинии поля нормальных напряжений σ_z , действующих на горизонтальных площадках (вертикальные напряжения), приведены на рис. 3а, а изменение напряжений с глубиной — на рис. 3б.

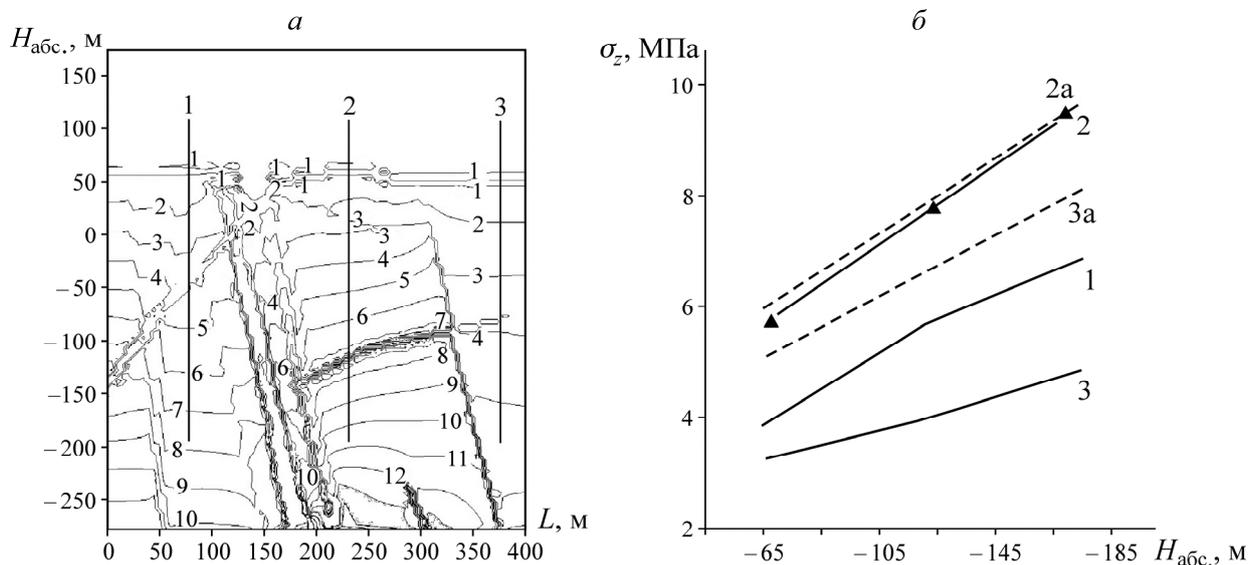


Рис. 3. Результаты расчета поля вертикальных напряжений: а — изолинии поля вертикальных напряжений; б — изменения напряжений с глубиной вдоль трех расчетных профилей. Штриховые линии 2а и 3а — расчет по соотношению $\sigma_z = \rho_1 g h_0 + \rho_2 g (H - h_0)$ для профилей 2 и 3, значки — результаты измерений из [10, 11]

Видно, что вертикальные напряжения закономерно возрастают с глубиной, но вдоль горизонтальных сечений они различны, поскольку в этом направлении велика неоднородность исследуемого массива по деформационным свойствам. В наиболее напряженном состоянии находится расположенная в центральной части разреза вертикально залегающая верхняя железорудная подсвита (линия 2 на рис. 3б). В этой толще в нижней части разреза напряжения достигают –14 МПа. Высокие вертикальные напряжения наблюдаются также и в породах верхней железорудной подсвиты — крайняя левая часть разреза.

В основании разреза напряжения составляют –12 МПа. В образованиях нижней железорудной подсвиты, расположенной левее разломной зоны (линия 1 на рис. 3б), вертикальные напряжения в нижней части разреза равны –10 МПа. Высокие вертикальные напряжения в верхней и нижней железорудных подсвитах обусловлены не только большим объемным весом этих пород, но и высокими значениями модуля упругости. В двуслюдяных сланцах коробковской свиты (линия 3 на рис. 3б) вертикальные напряжения значительно меньше, чем в желези-

стых кварцитах, что связано с меньшими значениями объемного веса пород и с меньшими модулями деформации. Показанные на рис. 3б значками данные натурных измерений практически совпадают с расчетными значениями, полученными для пород верхней железорудной подсвиты, что объясняется тем, что измерения на Коробковском месторождении проводились в пределах этой же толщи пород.

В исследуемой зоне тектонических нарушений отмечаются наименьшие вертикальные напряжения. На участке левой на разрезе полосы сильнотрещиноватых пород мощностью ~ 20 м, пронизывающей отложения промежуточной сланцевой подсвиты, вертикальные напряжения не превышают 1–2 МПа от поверхности разреза до всей глубины ее распространения. Разница в вертикальных напряжениях на контакте полосы сильнотрещиноватых и неразрушенных пород составляет от 1 МПа в верхней части разреза до 10 МПа в его нижней части. Зона динамического влияния такой полосы дробленых пород, в которой наблюдается резкое изменение вертикальных напряжений, равна примерно половине ее мощности. На участке другой полосы дробленых пород мощностью 15–20 м в верхней части разреза и выклинивающейся с глубиной до мощности 5 м в нижней части напряжения в целом выше. Понижение вертикальных напряжений в ней по сравнению с окружающими породами нижней части разреза составляет примерно 4–5 МПа.

Заметное влияние на НДС массива оказывают также маломощные диоритовые дайки, вертикальные напряжения в их пределах понижаются на 1–2 МПа. Если проследить изменение вертикальных напряжений на одном и том же горизонтальном уровне поперек всего изучаемого разреза (рис. 4), то можно убедиться в значительной вариации их уровня. В верхней железорудной подсвите величина вертикальных напряжений максимальна и на уровне абсолютной отметки –180 м составляет около 10 МПа.

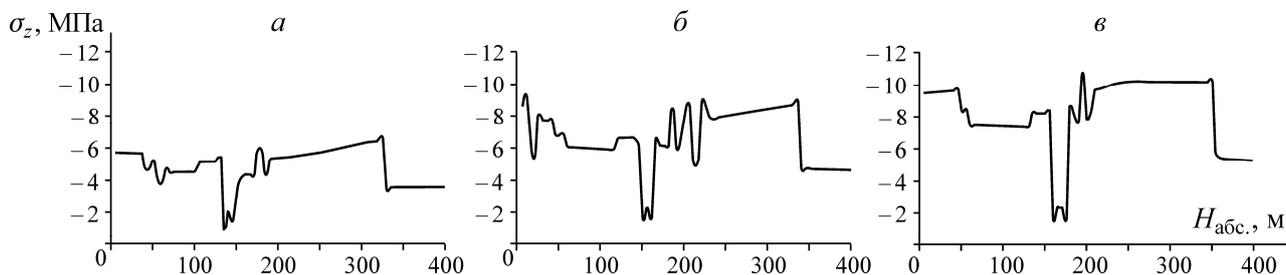


Рис. 4. Распределение вертикальных напряжений по горизонтали на абсолютных отметках, м: а — 70; б — 125; в — 180

Далее в пределах нижней железорудной подсвиты σ_z падает до 7.5 МПа. На границе нижней железорудной подсвиты и промежуточной сланцевой подсвиты вертикальные напряжения незначительно возрастают и достигают 8.5 МПа. В зоне сильнотрещиноватых пород (в левой полосе) они падают до 2 МПа. В промежуточной сланцевой подсвите между двумя полосами сильнотрещиноватых пород σ_z возрастают до 7.5 МПа. После падения в маломощной (правой) полосе вертикальные напряжения растут и в пределах верхней железорудной подсвиты вновь достигают максимального значения 10 МПа. В сланцах коробковской свиты вертикальные напряжения уменьшаются до 5.5 МПа. Таким образом, изменения строения массива и деформационных свойств пород в горизонтальном направлении приводят к изменению напряжения в породах, находящихся на одной глубине.

Кардинальные различия наблюдаются между результатами расчета горизонтальных напряжений и данными натурных измерений [10]. Как можно видеть на рис. 5, значения σ_x , полученные методом разгрузки, многократно превышают расчетные.

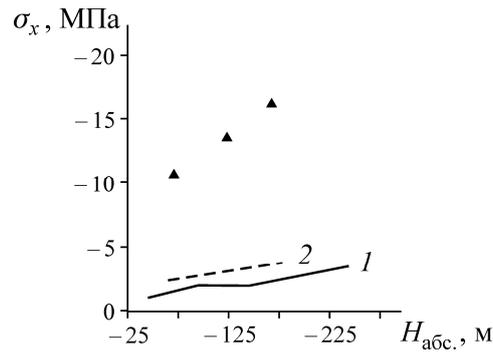


Рис. 5. Изменение горизонтальных напряжений с глубиной: 1 — численный расчет вдоль профиля 2 (см. рис. 3а); 2 — расчет литостатических напряжений для верхней железорудной подсвиты по соотношению Динника; значки — результаты натурных измерений в верхней железорудной подсвите [10, 11]

В породах верхней железорудной подсвиты $PR_1 k_3$, состоящей из магнетитовых, амфиболо-магнетитовых, железно-сланцево-магнетитовых кварцитов с прослоями малорудных кварцитов и межрудных сланцев, максимальное значение объемного веса в 1.5 раза выше минимального, а минимальное и максимальное значения модуля Юнга различаются более чем в 2 раза. При суб-вертикальном залегании продуктивных толщ наибольшие изменения их свойств будут наблюдаться в горизонтальном направлении, хотя нельзя исключать, что горизонтальные напряжения, существенно превышающие вертикальные, могут быть обусловлены неоднородностями строения среды на участке измерений. Более вероятным представляется активное тектоническое сжатие массива горных пород.

ВЫВОДЫ

Проведены численные расчеты поля литостатических напряжений для одного из разрезов Коробковского железорудного месторождения с учетом структуры массива и физико-механических характеристик пород. Полученные результаты сопоставлены с данными натурных наблюдений.

Вертикальные напряжения закономерно возрастают с глубиной, но вдоль горизонтальных сечений они сильно различаются из-за сложной структуры массива. Если в породах верхней железорудной подсвиты значения напряжений соответствуют литостатическим, то в сланцах они заметно ниже ожидаемых.

Наиболее разгруженной частью массива является исследуемая зона тектонических нарушений, где отмечаются наименьшие вертикальные напряжения. Зона динамического влияния полосы дробленых пород, в которой наблюдается резкое изменение вертикальных напряжений, составляет примерно половину ее мощности. Заметное влияние на НДС массива оказывают также маломощные диоритовые дайки.

Наибольшие различия выявлены между результатами расчета горизонтальных напряжений и данными натурных измерений. Значения, полученные методом разгрузки, многократно превышают расчетные. Возможно, это обусловлено неоднородностями строения массива на участке измерений, более вероятным представляется активное тектоническое сжатие массива горных пород. Чтобы прояснить этот важный вопрос, необходимо выполнить повторные измерения напряжений на нескольких участках массива.

Авторы благодарят В. Н. Анисимова за помощь в сборе материалов по геологическому строению Коробковского месторождения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Адушкин В. В., Опарин В. Н. Физика и геомеханика формирования и развития очаговых зон разрушения горных пород в природных и горнотехнических системах: современное состояние, перспективные направления фундаментальных исследований и прикладных разработок // ГИАБ. — 2015. — № 56. — С. 24–44.
2. Liao Q. L., Hou Z. S., He X. D., Dong W. L., and Xiao Q. B. Monitoring and analysis on the deformation of tunnel surrounding rock affected by fault, *Hydrogeol. Eng. Geol.*, 2005, No. 32. — P. 102–107.
3. Hao Y. H. and Azzam R. The plastic zones and displacements around underground openings in rock masses containing a fault, *Tunn. Undergr. Space Technol.*, 2005, No. 20. — P. 49–61.
4. Schubert W. and Riedmüller G. Influence of faults on tunneling, *Felsbau*, 1997, No. 15. — P. 483–488.
5. Назарова Л. А., Назаров Л. А. Эволюция напряжений и проницаемости трещиновато-пористого породного массива в окрестности добычной скважины // ФТПРПИ. — 2016. — № 3. — С. 11–19.
6. Курленя М. В., Миренков В. Е., Савченко А. В. Расчет деформирования массива вокруг заглубленных выработок с учетом собственного веса пород // ФТПРПИ. — 2017. — № 3. — С. 3–11.
7. Курленя М. В., Миренков В. Е., Шутов В. А. Особенности деформирования пород в окрестности выработки на больших глубинах // ФТПРПИ. — 2014. — № 6. — С. 4–10.
8. Лавриков С. В., Ревуженко А. Ф. Численное моделирование процесса накопления и высвобождения упругой энергии в структурно-неоднородных геоматериалах // ФТПРПИ. — 2016. — № 4. — С. 22–28.
9. Ловчиков А. В., Горбацевич Ф. Ф. О распределении тектонических напряжений в приповерхностных слоях земной коры по вертикали // ГИАБ. — 2015. — № 56. — С. 157–163.
10. Адушкин В. В., Кишкина С. Б., Куликов В. И., Павлов Д. В., Анисимов В. Н., Салтыков Н. В., Сергеев С. В., Спунгин В. Г. Построение системы мониторинга потенциально опасных участков Коробковского месторождения Курской магнитной аномалии // ФТПРПИ. — 2017. — № 4. — С. 3–13.
11. Казикаев Д. М. Геомеханика подземной разработки руд. — М.: Из-во МГГУ, 2009. — 542 с.
12. Григорьев А. М. Геомеханическое обоснование подземной разработки железорудных месторождений КМА под обводненной толщей пород: дис. ... канд. техн. наук. — Белгород, 2008. — 148 с.
13. Калинин Э. В., Панасьян Л. Л., Широков В. Н., Артамонова Н. Б., Фоменко И. К. Моделирование полей напряжений в инженерно-геологических массивах. — М.: Изд-во МГУ, 2003. — 262 с.
14. Калинин Э. В., Панасьян Л. Л. Опыт применения геомodelей для изучения напряженно-деформированного состояния массивов горных пород методами математического моделирования // *Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология.* — 2015. — № 6. — С. 483–498.
15. Калинин Э. В., Панасьян Л. Л. Методические аспекты создания геомodelей при разработке месторождений полезных ископаемых // *Геотехника.* — 2015. — № 2. — С. 51–57.
16. Фоменко И. К., Калинин Э. В., Панасьян Л. Л. Оценка поля напряжений в окрестности Кольской сверхглубокой скважины // *Результаты изучения глубинного вещества и физических процессов в разрезе Кольской сверхглубокой скважины до глубины 12261 м: сб. под ред. Ф. П. Митрофанова и Ф. Ф. Горбацевича (проект МПГК-408).* — Апатиты, 2000. — С. 165–167.
17. Победря Б. Е. Численные методы в теории упругости и пластичности: 2-е изд. — М.: Изд-во МГУ, 1995. — 336 с.

Поступила в редакцию 21/XII 2017