ГИАБ. Горный информационно-аналитический бюллетень /
MIAB. Mining Informational and Analytical Bulletin, 2021;(5—2):162—173
ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ / ORIGINAL PAPER

УДК 622.831 DOI: 10.25018/0236_1493_2021_52_0_162

ОСОБЕННОСТИ ПОЛЕЙ ПЕРВОНАЧАЛЬНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ ЖИЛЬНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ, РАСПОЛОЖЕННЫХ В КРИОЛИТОЗОНЕ

Е. Л. Сосновская[1], А. Н. Авдеев[1]

[1] Институт горного дела Уральского отделения Российской академии наук, Екатеринбург, Россия

Аннотация: Приведены основные результаты исследований за 2003—2020 гг. первоначального напряженно-деформированного состояния 8 жильных месторождений, расположенных в криолитозоне: в районе Чукотской складчатой области, Патамского нагорья, на юге Забайкальского края и в Восточных Саянах. Первоначальные напряжения были измерены при различном температурном режиме шахтного поля: в верхнем слое постоянно мерзлых пород, в полностью талых породах, расположенных под мерзлыми породами и в переходной зоне на границе мерзлых и талых пород. Все измерения проведены с участием авторов за период 2003—2020 гг. по методике ИГД УРО РАН щелевой разгрузкой в вариантах полукруглой и сегментированной щелей. Установлены общие закономерности распределения первоначальных напряжений в криолитозоне. В мерзлых породах действуют напряжения, близкие к гидростатической гипотезе их распределения; в переходной зоне и в талых породах — напряжения, соответствующие гипотезе гравитационно-тектонических напряжений. Получены средние значения коэффициентов бокового распора для разных температурных условий: 0,9—1,1 в мерзлых породах, 1,2—1,5 — в переходных зонах мерзлых пород в талые, 1,5—1,8 — в талых породах на нижних горизонтах рудников. Произведена оценка доли крио- и тектонических компонент в общей структуре поля первичных напряжений. Установлено, что максимальное влияние многолетней мерзлоты достигает 100 % от значений вертикальных напряжений, влияние тектоники — 150 %. Полученные результаты предложено использовать как граничные условия в инженерных расчетах и математическом моделировании устойчивых элементов геоконструкций при проектировании и эксплуатации расположенных в криолитозоне жильных месторождений с малоизученным естественным напряженно-деформированным состоянием.

Ключевые слова: золоторудные жилы, многолетняя мерзлота, температурный режим горных пород, натурные измерения, щелевая разгрузка, первичные напряжения горных пород, распределение напряжений, тектонические компоненты напряжений, криокомпоненты напряжений, боковой распор.

Благодарность: Статья подготовлена в рамках Госзадания №075—00581—19—00. Тема № 0405—2019—0007.

Для цитирования: *Сосновская Е. Л., Авдеев А. Н.* Особенности полей первоначальных напряжений жильных месторождений, расположенных в криолитозоне // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2021. — № 5—2. — С. 162—173. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_52_0_162.

Peculiarities of initial stress fields in lode deposits in the permafrost zone

E. L. Sosnovskaya[1], A. N. Avdeev[1]

[1] Institute of Mining of the Ural Division of Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg, Russia

© Е. Л. Сосновская, А. Н. Авдеев. 2021

Abstract: The article presents the main results of the research over the period from 2003 to 2020 into the initial stress–strain behavior of 8 lode deposits located in the permafrost zone: in the area of the Chukotka folded region, on the Patamian Plateau, in the south of the Trans-Baikal Territory and in the Eastern Sayan Mountains. The initial stresses were measured at different temperatures of the mine fields: in the upper layer of permafrost rocks, in completely thawed rocks underlying the permafrost strata and in the transition zone at the permafrost–thawed rock interface. All measurements were taken by the co-authors over the period from 2003 to 2020 using the procedure developed at the Institute of Mining, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, using semi-circular and segmented borehole slotting. The general patterns of the initial stresses in the permafrost are found. The stresses in frozen rocks are close to the hydrostatic stress distribution; in the transition zone and in thawed rocks, the stresses fit with the gravitational–tectonic stresses. The average values of the lateral earth pressure coefficient are obtained for different temperature conditions: 0.9–1.1 in frozen rocks, 1.2–1.5 in the transition zones and 1.5–1.8 in thawed rocks on the lower mine horizons. The percentage of the cryo-tectonic components in the total structure of the initial stress field is assessed. The influence of perennial permafrost is 100 % of the vertical stresses, and the influence of tectonics is 150 %. The results obtained are proposed to be used as the boundary conditions in engineering calculations and in mathematical modeling of stable mine structures design and operation of lode deposits in the permafrost zone with unexplored natural stresses and strains.

Key words: gold ore veins, permafrost, rock temperature regime, full-scale measurements, borehole slotting, initial stresses, stress distribution, tectonic stresses, cryogenic stresses, lateral earth pressure coefficient.

Acknowledgements: The study was carried out under State Contract No. 075-00581-19-00, Topic No. 0405-2019-0007.

For citation: Sosnovskaya E. L., Avdeev A. N. Peculiarities of initial stress fields in lode deposits in the permafrost zone. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2021;(5—2):162—173. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_52_0_162.

Введение

Большая часть месторождений Восточной Сибири и Северо-Востока России залегает в криолитозоне. Глубина массива мерзлых пород может достигать 400 — 500 м и более. Криолитозона неоднородна по мощности слоя многолетнемерзлых пород, их температуре, заполненности микро- и макротрещин льдом. Она существенно влияет на геомеханические условия рудников, в том числе на первоначальное напряженно-деформированное состояние массива горных пород [1 — 3]. Для обоснования конструктивных элементов систем разработки, параметров закладочных работ при очистной выемке, крепления выработок необходимо учитывать свойства криолитозоны. Требуется тщательное изучение геомеханических условий в многолетнемерзлых массивах горных пород и влияния мерзлоты на устойчивость горных выработок и целиков [4 — 7].

Авторами в процессе изучения геомеханических условий проводились многолетние (2003 — 2020 гг.) исследования первоначального напряженного деформированного состояния массивов горных пород 8 жильных золоторудных месторождений, расположенных в криолитозоне: Ирокиндинского, Кедровского, Майского, Ново-Широкинского, Коневинского, Каральвеемского. Месторождения расположены в разных регионах Восточной Сибири и Северо-Востока России: на Патамском нагорье, в Чукотской складчатой области, Восточных Саянах и Забайкалье (табл. 1). Рудниками отрабатываются крутопадающие и наклонные золоторудные жилы малой и средней мощности. Толщина слоя многолетнемерзлых пород варьируется в широких пределах от 150 до 500 м.

Таблица 1
Краткие сведения об изучаемых месторождениях
Brief information on the fields under study

Географическое расположение	Месторождение	Глубина закладки наблюдательных станций горного давления, м	Глубина криолитозоны, м	Угол падения жил, град
Чукотская складчатая область	Майское	120 – 500	190 – 320	55 – 90
	Каральвеем	510	350 – 365	15 – 35
Патомское нагорье Южно-Муйская глыба	Ирокиндинское	140 – 410	200 – 350	30 – 50
	Кедровское	300 – 400	160 – 300	30 – 50
Юг Забайкальского края	Ново-Широкинское	220	200 – 250	30 – 90
Восточные Саяны	Коневинское	180 – 350	250 – 300	55 – 90
	Барун-Холбинское	120 – 420	450	60 – 85
	Зун-Холбинское	380	380	55 – 90

В процессе исследований проводилось температурное районирование массива горных пород и последующие измерения естественного напряженно-деформированного состояния при разном криорежиме шахтного поля. По результатам проведенных исследований установлены общие закономерности распределения поля первоначальных напряжений в многолетнемерзлых массивах горных пород жильных золоторудных месторождений криолитозоны.

Методы исследований

В процессе исследований использован комплексный подход, включающий анализ и обобщение накопленного опыта, измерения температуры шахтного воздуха и приконтурного массива горных пород [2]; лабораторные испытания прочностных и упругих свойств горных пород [8], оценку первоначальных напряжений массива горных пород натурными измерениями щелевой разгрузкой по методике института горного дела УрО РАН [9, 10] в вариантах полукруглой и сегментированной щелей. Коэффициенты концентрации напряжений в расчетах полукруглой щели приняты по результатам моделирования на эквивалентных материалах Влоха Н. П. [9], Зубкова А. В. [10]. Коэффициенты концентрации напряжений для сегментированных щелей рассчитаны на основе конечноэлементного моделирования [11, 12].

Переход от деформаций щелей, измеренных на стенках выработок, к объемному тензору напряжений, действующему в массиве горных пород осуществлялся по классической методике щелевой разгрузки Влоха Н. П. [9]. Физико-механические характеристики горных пород, необходимые для расчетов напряжений (модуль упругости, коэффициент Пуассона и плотность) определялись на основании лабораторных испытаний образцов горных пород, отобранных в местах заложения наблюдательных стаций горного давления. Определение физико-механических показателей производилось в соответствии с требованиями стандартов Российской Федерации.

По результатам натурных измерений проведен анализ структуры распределения первоначальных напряжений массива в криолитозоне, в частности, определены средние коэффициенты бокового распора (соотношения горизонтальных и вертикальных напряжений), проведена количественная оценка влияния тектоники и криолитозоны на первичные напряжения.

Коэффициенты бокового распора рассчитывались в двух направлениях: по простиранию рудных тел продольный коэффициент $K_{пр}$, вкрест простирания рудных тел — поперечный коэффициент $K_п$.

Выделение тектонических компонент из измеренных напряжений произведено на основе известных инженерных зависимостей [8, 13, 14 и др.]:

$$\sigma_в = \sigma_в^Г + \sigma_в^Т = -\gamma H + \sigma_в^Т;$$

$$\sigma_{пр} = \sigma_{пр}^Г + \sigma_{пр}^Т = -\frac{\mu}{1-\mu}\gamma H + \sigma_{пр}^Т, \quad (1)$$

$$\sigma_п = \sigma_п^Г + \sigma_п^Т = -\frac{\mu}{1-\mu}\gamma H + \sigma_п^Т,$$

где $\sigma_в$, $\sigma_{пр}$, $\sigma_п$ — измеренные вертикальные, горизонтальные продольные (ориентированные по простиранию рудных тел) и поперечные (ориентированные вкрест простирания рудных тел) напряжения массива горных пород, МПа; $\sigma_в^Г$, $\sigma_{пр}^Г$, $\sigma_п^Г$ — расчетные гравитационные вертикальные, продольные и поперечные напряжения, МПа; $\sigma_в^Т$, $\sigma_{пр}^Т$, $\sigma_п^Т$ — расчетные тектонические вертикальные, продольные и поперечные напряжения, МПа; γ — объемный вес пород, МН/м^3; H — глубина наблюдений, отсчитываемая от уровня земной поверхности , м; μ — коэффициент Пуассона.

В процессе исследований в общей структуре первоначальных напряжений были выделены криологические компоненты. Они были получены как разница между расчетными, на основе формулы (1), тектоническими компонентами напряжений в талых и мерзлых массивах горных пород:

$$\sigma^{кр} = \sigma^Т_{тал} - \sigma^Т_{мерз}, \quad (2)$$

где $\sigma^Т_{тал}$ — расчетная тектоническая составляющая напряжений в талых породах, МПа; $\sigma^Т_{мерз}$ — расчетная тектоническая составляющая напряжений в мерзлых породах, МПа.

Результаты исследований

Зонирование рудничного поля по температурному режиму. В процессе исследований геомеханических условий на рудниках с участием авторов проводились измерения температур воздуха и приконтурного массива горных пород в зимний и летний периоды [2, 3]. Анализ результатов измерений позволил установить, что многолетнемерзлые породы неоднородны по температурному режиму. В процессе эксплуатации месторождения, расположенного в криолитозоне, выделяются несколько областей (зон) массива горных пород, имеющих существенные различия по температурному режиму и напряженно-деформированному состоянию.

Наиболее значимы три области, возникающих по естественно-природным причинам. Это, собственно, зона постоянно мерзлых пород, простирающаяся в глубину от земной поверхности до изотермы –1°С. Здесь максимально возможная устойчивость обнажений горных пород для конкретных горнотехнических условий. Ниже первой зоны расположена формирующаяся на границе мерзлых и талых пород природно-переходная зона мерзлых пород в талые (изотермы –1 — +0,5°С). Здесь под комплексным повышением температуры и горного давления происходит фазовый переход льда, заполняющего

трещины в горных породах, в воду. Породы начинают терять устойчивость и разрушаться. Процессы разрушения интенсифицируются в форме вывалов при наличии льдистых прослоев и сланцеватости. Размер этой зоны в шахтном поле довольно значителен относительно масштаба горных работ, и составляет около 150—200 м. Глубже природно-переходной зоны расположена глубинная зона постоянно талых пород, верхняя граница которой проходит по изотерме +0,5°С.

Следует отметить, что кроме природных факторов на температурный режим рудника, естественно, влияет производственно-технологическая деятельность. По антропогенным причинам в шахтном поле возникают дополнительные, довольно протяженные (до 200 м), участки растепления мерзлого массива. Они связаны, как правило, с вентиляционными процессами (поступление теплого воздух в шахту летом), стационарным электрическим оборудованием или мобильным самоходным транспортом (с двигателями внутреннего сгорания). При растеплении горных выработок от технологических причин ранее устойчивые горные выработки и целики теряют устойчивое состояние и разрушаются. Такие процессы наблюдались, в частности, на Ирокиндинском руднике при введении в эксплуатацию самоходного оборудования вместо электротранспорта [13, 14]. Толщина слоя техногенного растепления стенок и кровли выработок составляет 0,1—2 м, что сопоставимо с размерами разгрузочных щелей наблюдательных станций горного давления [3]. Таким образом, деформации, а, следовательно, и расчетные напряжения, полученные методом щелевой разгрузки, в местах техногенного растепления будут ближе к талым породам, чем к мерзлым. Этот момент необходимо учитывать как при выборе мест закладки наблюдательных станций, так и при анализе результатов измерений напряжений.

Первоначальное напряженное состояние массива горных пород. В процессе отработки изучаемых месторождений параллельно с их криозонированием проводились натурные измерения первичных напряжений при различном температурном режиме горных пород: на верхних горизонтах, в зоне постоянной мерзлоты, при дальнейшем понижении горных работ — в природно-переходных зонах мерзлых пород в талые, в талых породах и техногенно-растепленном массиве (табл. 2).

Анализ результатов измерений позволяет отметить следующее.

Минимально действующими напряжениями, в основном, являются вертикальные напряжения ($\sigma_в$). Горизонтальные обычно выше или незначительно ниже вертикальных при любом температурном режиме шахты.

Отношение горизонтальных напряжений к вертикальным в мерзлых породах практически не зависит от ориентировки рудного тела, и находится в диапазоне 1,1±0,3 в направлении простирания рудных жил и в диапазоне 0,9±0,2 — вкрест простирания рудных тел. Можно заключить, что напряженное состояние в массиве многолетнемерзлых пород носит гидростатический характер, что соответствует гипотезе горного давления А. Гейма [9, 11, 14].

В природно-переходной зоне мерзлых пород в талые, горизонтальные напряжения относительно вышележащего мерзлого слоя возрастают. Наибольший их рост отмечается вкрест простирания рудного тела. Здесь коэффициент бокового распора достигает 1,5±0,2. По простиранию рудного тела прироста горизонтальных напряжений

Таблица 2

Первоначальные напряжения массивов горных пород месторождений, расположенных в криолитозоне, по результатам натурных измерений (2003–2020 гг.)

Initial stresses measurements in the rock masses of gold deposits located in the cryolithic zone with full-scale measurements (2003–2020)

Месторождение	Глубина горных работ, м	Результаты измерений				
		Напряжения, МПа			Коэффициенты бокового распора	
		вертикальные	Горизонтальные		продольный	поперечный
			продольные	поперечные		
Многолетнемерзлые породы						
Майское	120	–4,3±0,3	–3,7±0,4	–4,3±0,5	0,9	1
Барун-Холба	120	–2,6±0,7	–3,3±0,7	–2,4±0,4	1,3	0,9
Коневинское	200	–5,4±0,6	–6,6±1,9	–4,3±0,5	1,2	0,8
Ирокиндинское	200	–7,4±0,9	–9,3±1,4	–8,6±1,8	1,3	1,2
Ново-Широкинское	220	–6,7±0,3	–4,4±0,4	–5,4±0,6	0,7	0,8
Кедровское	300	–8,3±2,1	–11,6±3,8	–4,9±1,0	1,4	0,6
Барун-Холба	420	–11,6±1,5	–14,2±5,2	–13,4±1,2	1,2	1,2
Средние значения коэффициентов бокового распора					1,1±0,3	0,9±0,2
Переходная зона от мерзлых пород к талым						
Ирокинда	250	–6,6±0,5	–5,9±0,4	–10,8±1,2	0,9	1,7
Коневинское	300	–8,4±1,2	–10,9±1,7	–12,5±1,4	1,3	1,5
Зун-Холба	380	–11,0±2,1	–16,6±1,8	–14,6±5,0	1,5	1,3
Средние значения коэффициентов бокового распора					1,2±0,3	1,5±0,2
Талые породы						
Ирокинда	250	–6,7±2,3	–9,4±3,0	–13,5±3,0	1,4	2
Кедровское	400	–10,3±1,1	–15,3±0,9	–19,9±4,3	1,5	2,4
Ирокинда	410	–11,6±3,7	–17,5±5,1	–27,3±8,8	1,5	1,9
Майское	440	–12,7±1,0	–17,5±1,6	–24,2±2,0	1,4	1,9
Каральвеем	510	–15,2±1,6	–27,7±4,4	–22,5±4,3	1,8	1,5
Зун-Холба	530	–14,2±3,7	–30,7±6,5	–18,9±4,0	2,2	1,3
Зун-Холба	940	–25,3±2,1	–26,0±3,0	–42,7±3,5	1	1,7
Средние значения коэффициентов бокового распора					1,5±0,4	1,8±0,4

практически не происходит, здесь коэффициент бокового распора составляет в среднем 1,2±0,3.

При дальнейшем растеплении массива горных пород рост боковых напряжений относительно вертикальных продолжается. Отношение продольных напряжений к вертикальным в талых породах под криолитозоной в среднем достигает 1,5, поперечных

— 1,8. На глубинах 300 — 600 м в талых породах измеренные горизонтальные напряжения как вкрест, так и по простиранию рудных тел, значительно выше вертикальных. Поперечные напряжения, в среднем, на 30 % выше продольных.

Рост горизонтальных напряжений при растеплении массива объясняется, по всей видимости, тем фактом, что в процессе растаивания льда, заполняющего тектонические трещины, они раскрываются, и совместное влияние этих процессов усиливает боковое горное давление [2, 3, 6, 14].

Однако при растеплении массива пород до положительных температур на напряженное состояние может начать оказывать усиленное влияние рельеф земной поверхности. Так, при измерениях в талых породах, лежащих выше подошвы основного хребта (520 — 530 м) на месторождении Зун-Холба, фиксируется максимальный продольный распор 2,2. Продольные напряжения в 1,7 раза превышают поперечные. При углублении горных работ на 400 м под подошву основной горы (т. е. до глубины 860 — 940 м) максимальные напряжения меняют направление и начинают действовать вкрест простирания рудных тел.

Известно, что в массивах пород золоторудных месторождений, не расположенных в криолитозоне, по многолетним исследованиям институтов Иргиредмет, ИГД УрО РАН, ИРНИТУ (ИрГТУ) и др. установлены средние значения коэффициентов бокового распора: 1,0 — продольных и 1,6 — поперечных [15 — 17]. То есть продольные и вертикальные напряжения практически равны, поперечные напряжения выше продольных в 1,6 раза.

Такие напряжения измерены на Зун-Холбинском месторождении на глубине 860 — 1000 м: $K_{пр}$ = 1,0; $K_{п}$ = 1,7. По-видимому, на такой глубине влияние криорежима верхних горизонтов и рельефа земной поверхности минимально, и распределение напряжений становится ближе к среднему по месторождениям, залегающим в положительных температурных зонах.

В постоянно мерзлых породах, даже вблизи земной поверхности, однозначной связи с рельефом не наблюдается. Так, на месторождении Барун-Холба, приуроченном к той же Холбинской зоне разломов, что и месторождение Зун-Холба, в мерзлых породах выше уровня основного хребта как на сравнительно небольшой глубине 120 м, так и практически на уровне подошвы основной горы, на глубине 420 м, фиксируются близкие к гидростатическим напряжения, характерные для мерзлых пород в целом.

На основании вышеизложенного анализа измеренных напряжений и расчетных коэффициентов бокового распора предлагаются следующие прогнозные, дифференцированные по криорежиму, формулы первоначальных напряжений:

- в массиве многолетнемерзлых пород

$$\sigma_в = -\gamma H;\ \sigma_{пр} = -1{,}1\gamma H;\ \sigma_п = -\gamma H;$$

- в переходной зоне мерзлых пород в талые

$$\sigma_в = -\gamma H;\ \sigma_{пр} = -1{,}2\gamma H;\ \sigma_п = -1{,}5\gamma H; \quad (3)$$

- в талых породах

$$\sigma_в = -\gamma H;\ \sigma_{пр} = -1{,}5\gamma H;\ \sigma_п = -1{,}8\gamma H.$$

Тектонические и криологические компоненты поля первоначальных напряжений. Анализ расчетных тектонических компонент первоначальных напряжений (рис.), которые определяются по формулам (1), позволяет отметить следующее.

Вертикальные напряжения характеризуются действиями в основном гра-

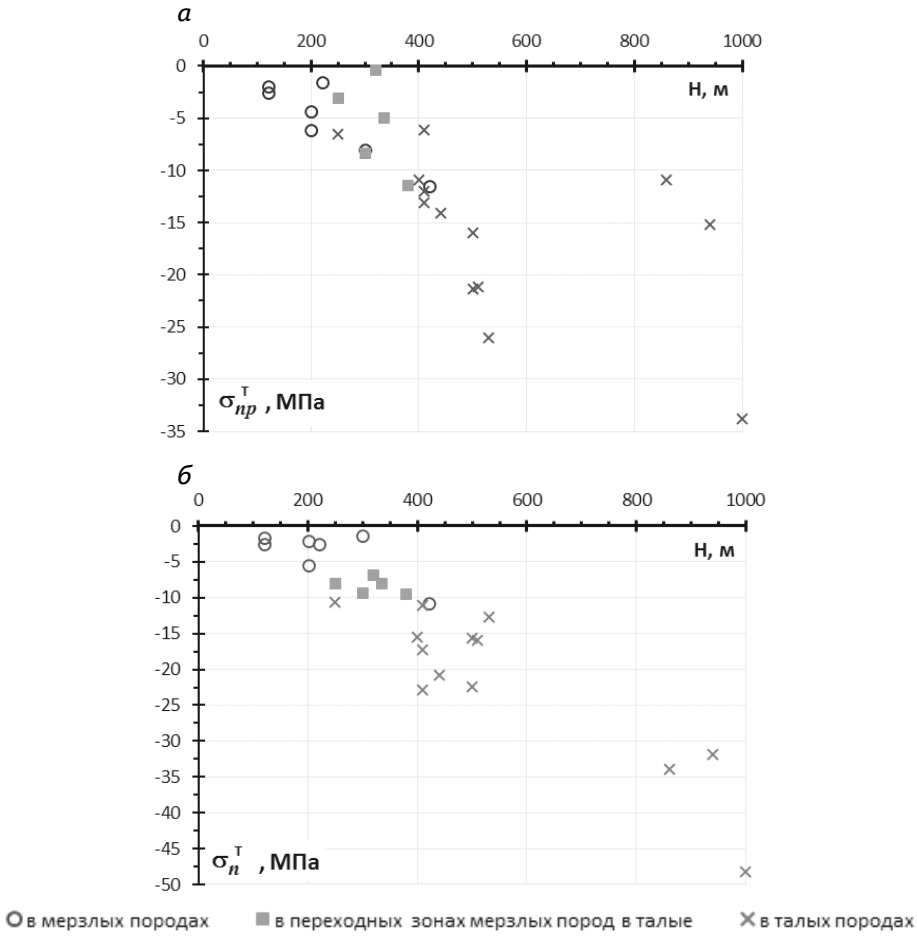

Рис. Распределение тектонических компонент горизонтальных напряжений:
а — продольных; б — поперечных в массивах горных пород жильных месторождений криолитозоны
Fig. Distribution of tectonic components of horizontal stresses: а — longitudinal; б — transversal at vein deposits of the cryolithic zone

витационных сил. Их тектоническая составляющая мала, составляет в среднем –0,1±0,7 МПа, что существенно ниже погрешности измерений методом щелевой разгрузки.

В горизонтальных напряжениях можно выделить и гравитационные, и тектонические компоненты. Следует отметить, что тектонические составляющие горизонтальных напряжений с глубиной увеличиваются (см. рис.). Прирост тектонических напряжений зависит от криорежима шахты. Так, средние расчетные тектонические компоненты горизонтальных напряжений в мерзлом массиве равны: $\sigma^{т}_{пр}$ = = –0,7γH, $\sigma^{т}_{п}$ = –0,5γH, в переходных зонах мерзлых пород в талые — $\sigma^{т}_{пр}$ = = –0,8γH, $\sigma^{т}_{п}$ = –1,0γH, в талых породах $\sigma^{т}_{пр}$ = –1,1γH, $\sigma^{т}_{п}$ = –1,5γH. Наибольшие тектонические составляющие первичного поля напряжений фиксируются в талом массиве вкрест простирания рудных тел.

Можно заключить, что влияние тектонической нарушенности на естественное напряженно-деформированное состояние массива при его растеплении возрастает, достигая максимума в полностью талом массиве, а влияние многолетней мерзлоты снижается до нуля.

Максимальное приращение тектонических компонент напряжений при полном растеплении массива составляет 0,4 γH для продольных напряжений и 1,0 γH для поперечных. То есть, влияние криолитозоны на первоначальное поле напряжений в полностью мерзлых массивах составляет 40—100 % от минимально действующих напряжений (вертикальных).

Очевидно, величины $\sigma^{Т}_{пр}$ = –1,1γH, $\sigma^{Т}_{п}$ = –1,5γH, полученные из уравнения (1) для талых пород, являются действительными тектоническими компонентами горизонтальных напряжений массивов горных пород месторождений криолитозоны. Разницу между этими значениями и расчетными по формуле (1) тектоническими компонентами в мерзлых массивах, таким образом, можно назвать криологической компонентой горизонтальных напряжений в мерзлых породах (2).

Приращения тектонической компоненты при переходе от мерзлых пород к талым для вертикальных напряжений зафиксировать не удалось. Очевидно, вертикальная криологическая составляющая имеет небольшое значение, которое невозможно получить при принятой методике измерений.

На основании совместного решения известных соотношений (1) и установленных зависимостей (2), (3), учитывая криологическую и тектоническую составляющие поля напряжений, предлагаются следующие расчетные аппроксимирующие формулы, дифференцированные по криорежиму массивов горных пород:

$$\sigma_{в} = \sigma^{Г}_{в} + \sigma^{Т}_{в} + \sigma^{кр}_{пр} \approx -\gamma H \qquad (4)$$

$$\sigma_{пр} = \sigma^{Г}_{пр} + \sigma^{Т}_{пр} + \sigma^{кр}_{пр} \approx -\frac{\mu}{1-\mu}\gamma H - 1{,}1\gamma H + \sigma^{кр}_{пр}$$

$$\sigma_{п} = \sigma^{Г}_{п} + \sigma^{Т}_{п} + \sigma^{кр}_{п} \approx -\frac{\mu}{1-\mu}\gamma H - 1{,}5\gamma H + \sigma^{кр}_{п}$$

где $\sigma^{кр}_{в}$, $\sigma^{кр}_{пр}$, $\sigma^{кр}_{п}$ — соответственно вертикальная, продольная и поперечная криологические компоненты поля напряжений, МПа.

Средние расчетные криологические компоненты составляют:

- в массиве мерзлых пород $\sigma^{кр}_{в}$ = 0; $\sigma^{кр}_{пр}$ = 0,4γH; $\sigma^{кр}_{п}$ = 1,0γH;
- в переходных зонах мерзлых пород в талые $\sigma^{кр}_{в}$ = 0; $\sigma^{кр}_{пр}$ = 0,3γH; $\sigma^{кр}_{п}$ = 0,5γH;
- в талых породах $\sigma^{кр}_{в} = \sigma^{кр}_{пр} = \sigma^{кр}_{п} = 0$.

Знак «+» у криологических компонент в формуле (4) означает, что, в отличие от остальных составляющих поля напряжений (гравитационных и тектонических), криологические напряжения носят растягивающий характер.

Выводы

При оценке первоначального напряженного-деформированного состояния месторождений, расположенных в криолитозоне, имеет большое значение температурное районирование массива горных пород.

На верхних горизонтах, в массиве постоянно мерзлых пород за счет влияния криологической компоненты действуют близкие к гидростатическим первоначальные напряжения. Криологическая составляющая поля напряжений уменьшает горизонтальные напряжения на 40—100 % от значений вертикальных напряжений.

В переходных зонах мерзлых пород в талые и в талых породах действуют повышенные гравитационно-тектонические напряжения. Минимальные тектонические напряжения действуют

по вертикали. Максимальные тектонические напряжения действуют в талых породах вкрест простирания рудных тел и достигают 150 % от вертикальных напряжений. В целом, тектоническая составляющая напряжений с глубиной возрастает.

Установленные прогнозные зависимости распределения первоначальных напряжений в разных криоусловиях (3), (4) предлагается использовать в качестве граничных условий при расчетах оптимальных конструктивных элементов систем разработки для условий разработки жильных золоторудных месторождений, расположенных в криолитозоне, с неизученными или малоизученными геомеханическими процессами, т. е. на стадии их проектирования и начальной эксплуатации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Control over the geotechnical processes at the goldfields of Eastern Siberia (in english) / E.L Sosnovskaia., A. N. Avdeev // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. № 5. С. 21—29. (2019).
2. Исследования криолитозоны и ее влияния на геомеханическое состояние массива горных пород при подземной разработки золоторудных месторождений Бурятии / А. М. Павлов // Известия СО секции наук о Земле РАЕН. Геология, поиски и разведка рудных месторождений. №1 (40). — С 53—60. (2012)
3. Geomechanical conditions of veingold deposits in permafrost zone / A. Avdeev, E. Sosnovskaya. — DOI: https: // doi.org/10.1051/e3sconf/202019201026 // E3S Web of Conferences : VIII International Scientific Conference “Problems of Complex Development of Georesourcef” (PCDG 2020), Khabarovsk, Russia Federation, September 8—10, 2020 г. — 2020. — Vol. 192. — p. 01026. (2020)
4. Совершенствование технологии подземной разработки жильных месторождений золота / А. М. Павлов. — Иркутск: Изд-во ИрГТУ 128 с. (2013).
5. *Разумов Е. А.*, *Еременко В. А.*, *Заятдинов Д. Ф.*, *Матвеев А. С.*, *Гречишкин П. В.*, *Позолотин А. С.* Методика расчета параметров анкерной крепи подземных горных выработок в условиях вечной мерзлоты // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2013. № 9. С. 39—47. (2013)
6. Определение параметров устойчивых целиков и обнажений камер при разработке наклонных жил в криогенных зонах в условиях Ирокиндинского золоторудного месторождения / А. М. Павлов, Ю. М. Семенов, Л. И. Сосновский // Горный информационно-аналитический бюллетень — М.: «Горная книга». — 2014. — № 10. — С. 21—27. (2014)
7. Обоснование параметров эффективной подземной разработки Майского месторождения / *Федоляк А. А.*, *Павлов А. М.* // В сборнике: Материалы шестнадцатой всероссийской научно-практической конференции «Проблемы развития экономики и предпринимательства». 2018. С. 98—104. (2018)
8. The ISRM Suggested Methods for Rock Characterization, Testing and Monitoring: 2007—2014. Under the editorship of R. Ulusay, Springer International Publishing Switzerland, Cham. 293 p. (2015)
9. Влох, Н. П. Управление горным давлением на подземных рудниках / Н. П. Влох. — М.: Недра, 1994. 208 с. (1994)
10. *Зубков А. В.* Геомеханика и геотехнология. Екатеринбург: УрО РАН, 2001. 335 с.
11. Wilhelm Rust. Non-Linear Finite Element Analysis in Structural Mechanics/ Switzerland: Springer International Publishing. 2015. 363 p.
12. M Moatamedi, *Hassan A.* Khawaja. Finite Element Analysis. Boca Raton: CRC Press. 2018. 154 p.

13. Pavlov *Alexander M.* Controllable roof rocks selfcollapse of used purification space (Irokindinsk deposit being considered as an example)/ *Alexander M.* Pavlov // The 8th International Forum for Strategic Technology 2013.Proceedings IFOST 2013.Ulaanbaatar, Mongolia: Mongolian University of Science and Technology, 2013. — P. 574—575.

14. Оценка первоначального напряженного состояния массива горных пород в криолитозоне (на примере Ирокиндинского месторождения) / Е.Л Сосновская., А. Н. Авдеев // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). № 3—1. С. 208—215. (2020)

15. Технология разработки золоторудных месторождений / под ред. В. П. Неганова. М.: Недра, 1995. 336 с.

16. Определение параметров устойчивых целиков и кровли камер при разработке крутопадающих золоторудных жил на больших глубинах / Л. И. Сосновский // Вестник ИрГТУ. — 2007. — № 1, Том 2 — С.63—66.

17. Прогноз и предотвращение горных ударов на рудниках: коллективная монография / под общей ред. И. М. Петухова, А. Н. Ильина, К. Н. Трубецкого. — М.: Изд-во АГН. 1997. — С. 351—367. ГИАБ

REFERENCES

1. Sosnovskaia E. L., Avdeev A. N. Control over the geotechnical processes at the goldfields of Eastern Siberia (in english). Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = News of the Higher Institutions. *Mining Journal.* pp. 21—29 [In Eng.]. DOI: 10.21440/0536—1028—2019—5-21—29 (2019)

2. Pavlov, A. M. Study of the cryolithic zone and its influence on the geomechanical state of the rock mass at underground mining of gold deposits in Buryatia. *Proceedings of the Siberian Branch of the Earth Sciences Section of the Russian Academy of Natural Sciences. Geology, prospecting and exploration of ore deposits.* 2012. no. 1(40). pp. 53—61 [In Russ]

3. Avdeev A., Sosnovskaya E. Geomechanical conditions of veingold deposits in permafrost zone. DOI: https:. doi.org/10.1051/e3sconf/202019201026. E3S Web of Conferences : VIII International Scientific Conference "Problems of Complex Development of Georesourcef" (PCDG 2020), Khabarovsk, Russia Federation, September 8—10, 2020 г. 2020. Vol. 192. p. 01026.

4. Pavlov A. M. *Sovershenstvovanie tekhnologii podzemnoj razrabotki zhil'nyh mestorozhdenij zolota* [Upgrading the technology of gold deposits underground mining]. Irkutsk: Irkutsk State Technical University 128 p. (2013) [In Russ]

5. Razumov E. A., Eremenko V. A., Zayatdinov D. F., Matveev A. C., Grechishkin P. V., Pozolotin A. C. Calculation of rock bolting parameters for mine roadways in permafrost rocks. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.*, 2013, no. 9, pp. 39—47. [In Russ]

6. Pavlov A. M., Semenov Iu. M., Sosnovskii L. I. Evaluation of parameters of stable pillars and room roofs in underlay lode mining in cryogenic zones in terms of the Irokindinsly gold deposit. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2014; 10: 21—27. [In Russ]

7. Fedolyak A. A., Pavlov A. M. *Obosnovanie parametrov effektivnoj podzemnoj razrabotki Majskogo mestorozhdeniya* [Justification of the Mayskye deposit effective underground mining parameters / Proceedings of the sixteenth all-Russian scientific-practical conference "Problems of economy and business development". 2018. pp. 98—104. [In Russ]

8. The ISRM Suggested Methods for Rock Characterization, Testing and Monitoring: 2007—2014. Under the editorship of R. Ulusay, Springer International Publishing Switzerland, Cham. 2015, 293 p.

9. Vlokh N. P. *Upravlenie gornym davleniem na podzemnyh rudnikah* [Rock pressure control at underground mines]. Moscow: Nedra Publishing; 1994. 208 p.[In Russ]

10. Zubkov A. V. *Geomekhanika i geotekhnologiya* [Geomechanics and Geotechnology]. Ekaterinburg: Uro RAS, 2001. 335 p. [In Russ]

11. Wilhelm Rust. Non-Linear Finite Element Analysis in Structural Mechanics/ Switzerland: Springer International Publishing. 2015. 363 p.

12. Moatamedi M., Hassan A. Khawaja. Finite Element Analysis. Boca Raton: CRC Press. 2018. 154 p.

13. Pavlov A. M. *Controllable roof rocks selfcollapse of used purification space (Irokindinsk deposit being considered as an example)* [Controllable roof rocks selfcollapse of used purification space (Irokindinsk deposit being considered as an example)]. The 8th International Forum for Strategic Technology 2013.Proceedings IFOST 2013.Ulaanbaatar, Mongolia: Mongolian University of Science and Technology, 2013. pp. 574—575. [In Eng.]

14. Sosnovskaia E. L., Avdeev A. N. Evaluation of the initial stressed state of rocks in the cryolitzone (on the example of Irokindinsky mining). *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2020, 3—1. pp. 208—215. [In Russ]

15. Neganov, V. P., Kovalenko V. I., Zaitsev, B. M., Sosnowski, L. I. *Tekhnologiya razrabotki zolotorudnyh mestorozhdenij* [Technology of the gold fields mining]. Under the editorship of V. P. Neganov. Moscow: Nedra Publishing, 1995. 336 p. [In Russ]

16. Sosnovsky L. I. Estimation of parameters of the steady pillars and chamber roof at development of the steep-falling gold ore veins at great depths. *Vestnik ISTU*, 2007. no. 1, Vol. 2. pp. 63—66 [In Russ]

17. Forecast and prediction of rockburst at the mines: a collective monograph / under the general editorship of I. M. Petukhov, A. N. Ilyin, K. N. Trubetsky. Moscow: AGN Publishing House. 1997. pp. 351—367 [In Russ]

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Сосновская Елена Леонидовна[1] — канд. геол.-минерал. наук, старший научный сотрудник;
Авдеев Аркадий Николаевич[1] — канд. техн. наук, старший научный сотрудник, e-mail: avdeev0706@mail.ru;
[1] Институт горного дела Уральского отделения Российской Академии Наук (ИГД УрО РАН), Екатеринбург, Россия.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Sosnovskaya E. L.[1], Cand. Sci. (Geol. Mineral.), Senior Research Worker;
Avdeev A. N.[1], Cand. Sci. (Eng.), Senior Research Worker, e-mail: avdeev0706@mail.ru;
[1] Institute of Mining of the Ural Division of Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg, Russia.

Получена редакцией 15.12.2020; получена после рецензии 15.02.2021; принята к печати 10.04.2021.
Received by the editors 15.12.2020; received after the review 15.02.2021; accepted for printing 10.04.2021.