

## НАПРЯЖЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ЗЕМНОЙ КОРЫ УРАЛА

А.В. Зубков

*Институт горного дела Уральского отделения РАН,  
620219, Екатеринбург, ул. Мамина-Сибиряка, 58*

*E-mail: zoubkov@igd.uran.ru*

*Поступила в редакцию 24.04.02*

Показаны закономерности формирования гравитационно-тектонических напряжений в земной коре Урала, основанные на результатах измерения их величин на 25 подземных рудниках Северного, Среднего и Южного Урала. Установлено преобладающее сжатие Урала в направлении СЗ – ЮВ. Выявлена пульсация тектонических напряжений с периодом 1,5-3,5 года и амплитудой до 20-40 % от уровня измеренных гравитационно-тектонических напряжений. Установлено нелинейное изменение тектонических напряжений с глубиной и одной из гипотез этого явления предлагается релаксация напряжений в пределах глубин 100 – 600 м с учетом длительной прочности массива пород.

Ключевые слова: *тектонические напряжения, деформация, земная кора, пульсация напряжений.*

## STRESSED STATE OF URAL EARTH'S CRUST

A.V. Zoubkov

*The Institute of Mining of Ural Division of Russian Academy of Sciences*

Regularities of gravitation tectonic stresses formations in Ural Earth's crust, based of the results of their values measurements in 25 underground ore mines of North, Central and South Ural are shown in the article. Prevailing compression of Ural in direction North-West, South-East is determined. Tectonic stresses pulsation with periods of 1.5-3.5 years and amplitude up to 20-40 % from the level of measured gravitation – tectonic stresses is revealed. Nonlinear variation of tectonic stresses with depth is determined and relaxation of stresses in depth limits of 100-600 meters with regard to strength durations of rock mass is one of this phenomena hypothesis, that is suggested.

Key word: *tektonic of stresses, corth crust, deformation, oscillations stresses.*

Современные знания о закономерностях формирования напряженного состояния земной коры на обширных территориях являются одной из важнейших и необходимых фундаментальных составляющих для прогнозирования тектонических процессов в земной коре в будущем и объяснения этих процессов в прошлом. В то же время первоначальное (природное) напряженное состояние является одним из главных характеристик массива горных пород на месторождениях полезных ископаемых для решения прикладных задач, связанных с расче-

том напряженно-деформированного состояния горных конструкций для определения их параметров и разработки мероприятий по обеспечению их устойчивости в условиях возрастающего с глубиной горного давления.

Об относительной величине и направлении действия главных нормальных напряжений в отдельных точках земной коры можно судить по первым вступлениям продольных и поперечных волн землетрясений. Особую ценность представляют результаты непосредственного измерения напряженного состояния массива

горных пород в подземных выработках. Однако следует учитывать, что величины первоначальных напряжений и направление их действия в массиве горных пород существенно зависят от условий его образования, геологического строения и тектонической нарушенности. Поэтому надежное представление о напряженном состоянии земной коры того или иного региона можно получить лишь при комплексном использовании данных о его современном тектоническом развитии и достаточно большого числа результатов непосредственного измерения напряжений массива горных пород в различных участках этого региона. Этим условиям в достаточной степени отвечает Уральский регион, где за 30-летний период семью институтами были проведены измерения напряжений на 25 месторождениях Северного, Среднего и Южного Урала. Для измерений были использованы методы: полной (П), частичной (Ч) и шелевой (Щ) разгрузки, частичной разгрузки на большой базе (ЧБ) и экспериментально-аналитический метод (ЭА) (табл. 1) [Зубков, 2001]. Измерения производили институты: I – Институт горного дела УрО РАН, II – Институт геофизики УрО РАН, III – Институт УНИПРОМЕДЬ, IV – Институт УралВНИИМИ, V – Пермский политехнический институт, VI – Магнитогорский горно-металлургический институт, VII – Иркутский ИРГИРЕДМЕТ. Полученные данные являются первоначальными напряжениями нетронутого массива горных пород, т.е. в них исключено влияние горных выработок и выработанных пространств путем введения соответствующих поправочных коэффициентов, найденных в результате решения объемных геомеханических задач. Оценка точности измерений сделана с доверительной вероятностью 0,95.

При анализе результатов определения напряжений необходимо иметь в виду следующие обстоятельства: из 54 результатов, полученных на различных глубинах на 25 месторождениях, лишь в 18 определены направления действия и величины главных нормальных напряжений в горизонтальной плоскости. Эти результаты получены при производстве измерений методами полной разгрузки и экспериментально-аналитическим, а также при использовании других методов, когда измерения производились в выработках, пройденных в различных направлениях. В остальных случаях направления горизонтальных напряжений соответствовали

ориентировке двух основных типов выработок на рудниках, пройденных по простиранию или вкрест простирания месторождения. Каждый из 54 результатов, характеризующих напряженное состояние массива на глубине  $H$  м, за редким исключением, является следствием статистической обработки десятков измерений, сделанных на площади нескольких сотен тысяч квадратных метров. Полученные результаты являются суммой гравитационных и тектонических напряжений.

В идеальном случае гравитационные силы должны сформировать в массиве следующие напряжения:

$$\sigma_z^n = \gamma H ; \tag{1}$$

$$\gamma H \geq \sigma_r^n \geq \frac{\mu_m}{1 - \mu_m} \gamma H$$

где  $\gamma$  – удельный вес, МН/м<sup>3</sup>;  $\mu_m$  – коэффициент Пуассона массива.

Тектонические напряжения в вертикальном направлении должны быть равны нулю, а в горизонтальном иметь максимальное и минимальное значения и азимут их действия  $\alpha$ . Поэтому в идеальном случае сумма гравитационно-тектонических напряжений равна

$$\sigma_z^n = \gamma H ;$$

$$\sigma_{1r}^n = \sigma_{1r} + \left( \frac{\mu_m}{1 - \mu_m} + 1 \right) \gamma H ; \tag{2}$$

$$\sigma_{2r}^n = \sigma_r + \left( \frac{\mu_m}{1 - \mu_m} + 1 \right) \gamma H ;$$

$$\alpha_{1r} = \alpha_{1r} ; \alpha_{2r} = \alpha_{2r}$$

Следует также отметить, что в подавляющем большинстве случаев невозможно разделить гравитационные и тектонические составляющие и тем самым ответить на вопрос, горизонтальные гравитационные напряжения формируются по Г. Гейму ( $\sigma_r^n = \gamma H$ ) или по А.Н. Диннику ( $\sigma_r^n = \frac{\mu_m}{1 - \mu_m} \gamma H$ ).

Каждый исследователь волен выбирать.

Анализ результатов измерения напряжений показал, что в приповерхностном слое зем-

Таблица 1

Результаты определения первоначальных напряжений на месторождениях полезных ископаемых Урала

№ п.л.	Город, месторождение	Дата измерения, год	H, м	Метод измерений	Азимут, град.		Действия $\sigma_x^0$	Первоначальные напряжения, МПа							
					Простирание рудного тела	Простирание		горизонтальные $\sigma_x^0$	$\sigma_y^0$	вертикальные $\sigma_z^0$					
1	Североуральск, Североуральское, I Североуральское, III	1997	490	Щ	180	90***	-54±13,5	-33,0±7,5	-31,8±6,6						
										Щ	0	-58,0	-38,0	-29,0	
										ЭА	6**	-9,6	-1,5	-	
2	Красногурьянск, Северо-Песчанское, I	1968	300*	Ч	180	90	-10,3±2,2	-7,9±2,7	-7,0						
										Ч	90	-16,3	-12,5	-15,5	
										П	123±9**	-13,0±2,4	-8,0±4,4	-11,3	
										Щ	90	-21,1±2,1	-17,6±8,3	-	
										П	146**	-14,0±2,5	-6,4±2,7	-	
3	Красногурьянск, Новопесчанское, I	1975	370	П	36	137**	-52,0	-30,0	-24,0						
4	Красногурьянск, I		800	Щ	0	135	-24,1	-12,9	-17,9						
										П	0	-20,6	-13,2	-17,2	
										П	75	-14,5	-9,2	-11,2	
5	Березники, V, БКРУ-2 БКРУ-3		400	П	0	135	-24,1	-12,9	-17,9						
										П	0	-20,6	-13,2	-17,2	
										П	75	-14,5	-9,2	-11,2	
6	Соликамск, V, СКРУ - I		300	П	0	75	-14,5	-9,2	-11,2						
										П	0	-20,6	-13,2	-17,2	
										П	75	-14,5	-9,2	-11,2	
7	Сараны, Сарановское, I	1998	300	Щ	158	68**	-16,6±1,5	-9,6±1,2	-7,8						
										Ч	40	130	-5,6±2,4	-2,9±4,4	-4,7±2,2
										ЩР	145	145	-26,1±4,0	-21,1±8,6	-22,2±3,2
8	Кушва, Валуевское, I	1968	П	ЭА	188	34**	-17,9	-5,3	-						
										Ч	188	188	-17,7±3,4	-14,0±3,4	-
										Щ	188	188	-25,1	-18,7	-11,6
										Щ	155**	155**	-40,5	-21,3	-21,1
										Ч	164	164	-15,5	-7,9	-6,9
9	Нижний Тагил, Лебяжинское, I	1970	*	Щ	164	166**	-22,3±0,9	-19,3±0,9	-21,1±8,6						
10	Нижний Тагил, Лебяжинское, I	1983	510	Щ	144	156**	-12,3	-6,7	-						
										Щ	155	-41,0±13,0	-37,0±7,0	32,0±5,5	
										Щ	155	-43,6±13,3	-39,4±7,3	-34,2±5,3	
11	Нижний Тагил, Высокогорское, I	1983	П	ЭА	144	156**	-12,3	-6,7	-						
										Щ	155	-41,0±13,0	-37,0±7,0	32,0±5,5	
										Щ	155	-43,6±13,3	-39,4±7,3	-34,2±5,3	

Продолжение таблицы 1

№ п.п.	Город, месторождение	Дата измерения, год	H, м	Метод измерений	Азимут, град.		Первоначальные напряжения, МПа				
					Простирание рудного тела	Действия $\sigma_x^n$	$\sigma_x^n$	$\sigma_y^n$	$\sigma_z^n$		
12	Нижний Тагил, Естюнинское, I	1977	180	Ч	120		130	-25,4±4,6	-24,2±0,6	-20,9	
		1980	240	Щ			120	-37,0±7,0	-28,5±7,0	-34,3±4,1	
		1990	360	Щ			124**	-72,0±8,9	-41,0±3,4	-47,0±2,1	
		1994	420	Щ			120**	-140,0	-80,0	-53,0	
13	Кизел, Кизеловское			II			-0,035H	-0,022H	-0,26H		
14	Березовский, Березовское, VII	1976	212	Ч	180		90	-13,6	-10,4	-8,5	
		1980	262	Ч			90	(-17,0)	(-11,0)	-10,5	
		1980	312	Ч,Щ			90	-17,9	-10,5	(-13,0)	
		1980	462	Ч,Щ			90	(-22,0)	(-17,0)	(-19,0)	
		1980	512	Ч,Щ			90	(-33,0)	(-27,0)	-15,7(-21,0)	
	Березовское, I	1997	712	Щ	112**		-25,3	-18,9	-20,0		
							(-37,0)	(-29,0)			
							-22,0	-18,0			
15	Вишневогорск, Вишневогорское, III		320	Щ	40		-20,0	-13,0	-9,0		
16	Сатка, Саткинское, I		130	Щ	65-80			-22,3±2,39	-19,8±3,8	-14,2±1,54	
			150	Щ,Ч				-(10+0,29H)	-(10+0,29H)		
			240	Щ,Ч				-(10+0,29H)	-(10+0,29H)	-0,029H	
17	Бакал, Ново-Бакальское, I	1982	150	Щ	45		-14,0	-11,0	-4,0		
18	Бакал, Северо-Шиханское, I	1982	180	Щ	45		-15,0	-12,0	-4,4		
19	Учалы, Узельгинское, IV	1990	640*	Щ	0		-24,0	-18,0	-18,0		
		1997	640	Щ	96**		-30,5±1,5	-25,9±1,1	-18,5±1,5		
20	Пласт, Качканарское Шх.№16, I, II Шх.Центр, I, II Шх.Фрунзе, V Шх.15 лет Октября	1968	П	ЭА	260			-34,0	-8,0	-	
		1968	192	Ч	260			-13,7	-6,0	-3,7	
			295	Ч	275				-31,3	-25,2	-9,5
			500	Ч	250				-47,0	-22,0	-15,0
			200+	Ч	250				-0,058H	-0,033H	-0,03H
		600									

Окончание таблицы 1

№ п. п.	Город, месторождение	Дата измерения, год	H, м	Метод измерений	Азимут, град	Действия	Первоначальные напряжения, МПа								
							Горизонтальные	Вертикальные	Горизонтальные						
					Простирание рудного тела	$\sigma_x^n$	$\sigma_y^n$	$\sigma_z^n$	$\sigma_x^n$	$\sigma_y^n$	$\sigma_z^n$				
21	Миндяк, Миндякское, I и II	1968	250*	Ч	220	125	-6,4	-6,2	-6,0						
22	Рудный, Соколовское, I	1986	250	Ч	180	90	-10,0	-4,0	-7,0						
23	Гай, Гайское, VI		170	П	180	-	-(7,0±10,0)	-	-6,0						
												270	-	-12,0	-11,5
												320	-	-16,5	-14,0
												460	-	-(18,5±22,0)	-18,0
	Гайское, I	1998	830	Щ	180	91±6**	-39,9±4,5	-18,7±1,2	-21,8						
24	Хромтау, Молодежное, I	1980	530	ЧБ, Щ	50	140	-18,6	-18,0	-13,3						
25	Хромтау, Алмаз-Жемчужина	1979	500	ЧБ	0	50**	-20,9	-13,2	-13,2						

Примечание. \* Результаты обработаны ИГД УрО РАН заново по современной методике на базе исходных данных. \*\* Определены направления и величины главных напряжений, действующих в горизонтальной плоскости. П – то же, но в приповерхностном массиве по деформации пород вокруг провала. Березовский – результаты в сбосках получены в гранитоидах.

ной коры до глубин 100-200 м наблюдается разгрузка тектонических напряжений на зоны выветривания слабых слоев пород. Поэтому напряжения, измеренные на этих глубинах, близки к гравитационным, имеют максимальные значения в направлении параллельно выветрелому слою, а минимальные – перпендикулярно ему. Чтобы судить о величине и направлении действия максимальных и минимальных горизонтальных тектонических напряжений, необходимо из результатов, измеренных на глубинах более 300-400 м, вычесть гравитационную горизонтальную составляющую, равную для Урала  $0,43 \text{ гН}$ . Полученные максимальные и минимальные тектонические напряжения с учетом азимутов их действия показаны на карте Урала (рис.1).

Интересно провести анализ напряженного состояния массива горных пород в различных районах Урала на фоне его прошлого и современного тектонического развития. Анализируя относительные линейные скорости перемещения литосферных плит, исследователи считают, что Евразийская плита в районе Урала перемещается с северо-запада на юго-восток по азимуту  $120-130^\circ$  [Ушаков, 1984]. Подтверждением этого являются азимуты перемещения пунктов наблюдений в Европе и Азии, фиксируемые с помощью системы GPS. Так, измерениями 1997.8... установлено, что в районе нулевого меридиана (Испания, Франция, Англия и т.п.) пункты смещаются на северо-восток по азимутам  $45-60^\circ$ . Пункты в юго-восточной Азии (Китай и Корея) на меридианах  $110-130^\circ$  перемещаются на юго-восток по азимутам  $140-150^\circ$ . Если земной шар расщечь плоскостями, проходящими через Западную Европу и юго-восточную Азию так, чтобы они пересекли нулевой меридиан по азимутам  $45-60^\circ$ , а меридиан  $120^\circ$  по азимутам  $140-150^\circ$ , то на Урале они пройдут по азимутам  $110-130^\circ$ . Учитывая это обстоятельство на Урале следует ожидать, что максимальные сжимающие напряжения в литосфере действуют по азимуту  $110-130^\circ$ . На рис.1 приведена схема тектонического районирования Урала, составленная Всесоюзным научно-исследовательским геологическим институтом в 1972 г. Показанные на схеме новейшие северо-западные секущие структуры (тектонические зоны) проходят под углом  $20-30^\circ$  к направлению предполагаемого максимального сжатия литосферы, что идеально соответствует плоскостям скола, проходящим к направ-

лению наибольшего сжатия под углом  $20-40^\circ$ .

Наряду с изображенными на рис.1, севернее проходят еще две безымянные тектонические зоны, а южнее наблюдается Мангышлакско-Гиссарская и Кавказско-Копетдагская структуры северо-западной ориентации [Алейников, 1993]. Кроме этого прослеживаются тектонические зоны северо-восточного простирания. Самая крупная из них приурочена к Полярному Уралу, проявляясь в структурах Таймыра. Далее она проходит по средней Волге, Кавказу и уходит на остров Кипр. К ним же можно отнести сейсмически активную зону Пермь – Кизел – Североуральск, проявляющуюся в особенностях строения фундамента и чехла Русской платформы в виде валообразных поднятий. Вполне возможно, что указанные тектонические зоны являются обновленными более древними тектоническими разломами, так как в Тимано-Кокчетавской зоне фиксируются байкальские и даже карельские нарушения, в Каратаусско-Таласской – герцинские, в то время как в Кавказско-Копетдагской – альпийские. В этом случае возможно отклонение ориентировки тектонических зон (плоскостей скола) от направления наибольшего сжатия на  $5-10^\circ$ .

Наиболее надежные результаты определения величин и направлений действия главных горизонтальных напряжений получены в Тагило-Кушвинском и Краснотурьинском районах, т.е. на участке северо-восточнее Тимано-Кокчетавской зоны. Здесь наибольшие горизонтальные сжимающие напряжения действуют по азимуту  $112-155^\circ$ , т.е. согласно направлению подвижки Евразийского континента. Горизонтальные напряжения в перпендикулярном направлении в 1,5-2 раза ниже и близки к нагрузкам от веса пород, когда действует только гравитационная составляющая напряжений. Измерения в Североуральске показывают, что наибольшее сжатие действует в широтном направлении, а наименьшее – в меридиональном. На Сарановском месторождении максимальное главное сжатие действует перпендикулярно тектонической зоне, по-видимому, на этом участке происходит расклинивание бортов зоны в результате подвижки и дилатационного эффекта.

В зоне между Тимано-Кокчетавской и Башкиро-Улутавской структурами на шахтах городов Сатки, Бакала и Миндяка измеренные нормальные напряжения по двум направлениям отличаются между собой на  $0-15\%$ , что находится в пределах точности измерений. Поэто-

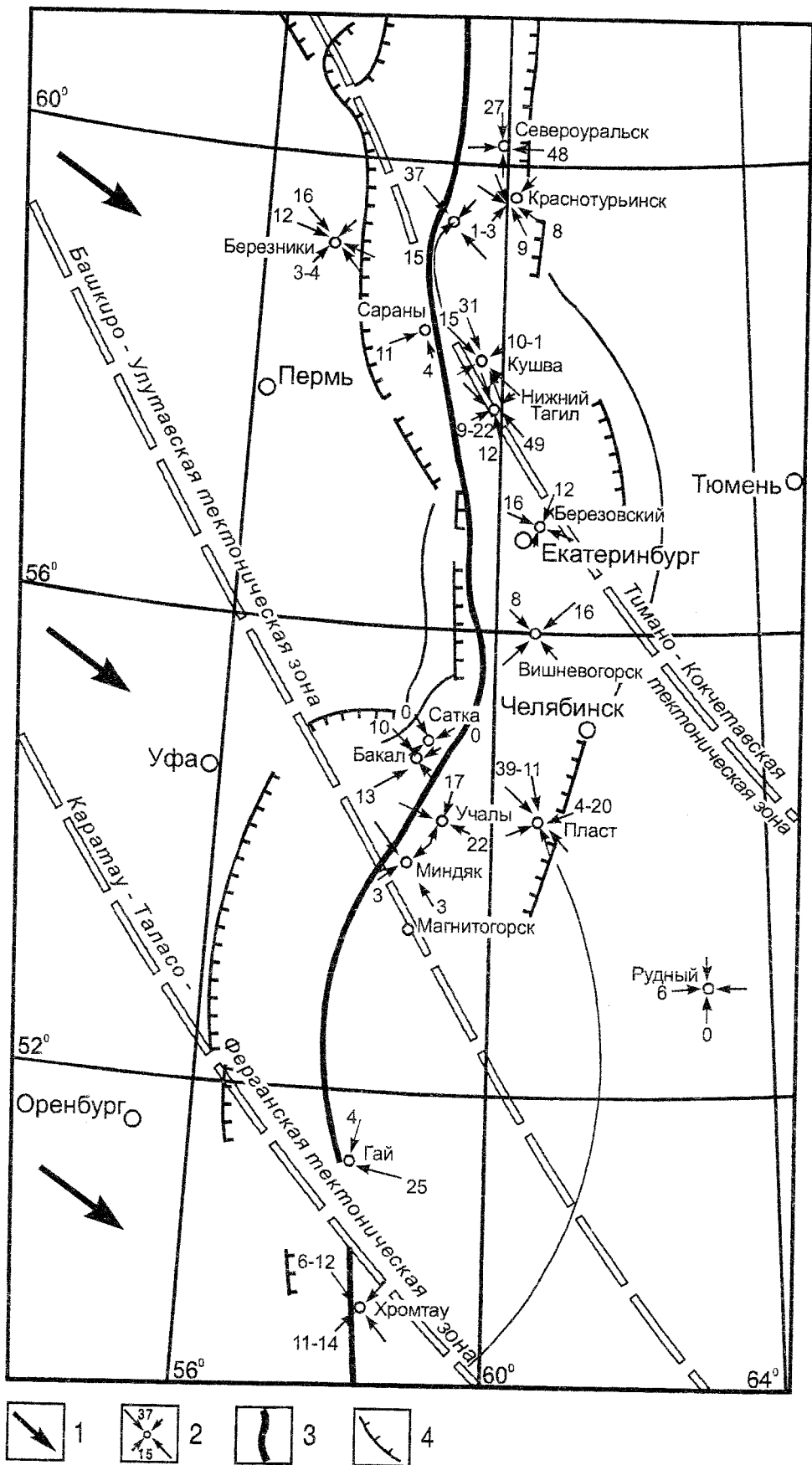


Рис.1. Карта Урала с измеренными горизонтальными тектоническими напряжениями в МПа: 1 – направление движения Евразийской плиты на Урале; 2 – тектонические напряжения; 3 – осевая линия Урала; 4 – тектонические нарушения, окаймляющие Урал.

му говорить о направлении главного максимального сжимающего горизонтального напряжения здесь нет возможности. Однако близкие значения горизонтальных напряжений в этом районе могут быть обусловлены наличием очень пологих надвигов с большим горизонтальным перемещением надвинутых крыльев в зоне Уфимского выступа, разгружающих сжатие в юго-восточном направлении. В Учалах максимальное главное сжатие совпало со сжатием Евразийской плиты.

В зоне Каратау-Таласо-Ферганской структуры в городе Гай наблюдается широтное сжатие (по азимуту 91°). В городе Хромтау на месторождении Алмаз-Жемчужина максимальное главное сжатие действует по нормали к тектонической зоне, аналогично Сарановскому мес-

торожению.

Многолетнее изучение напряженного состояния массива горных пород позволило на ряде месторождений получить его значение на трех-четырех горизонтах. Было установлено, что в большинстве случаев вертикальные напряжения  $\sigma_z \cong \gamma H$ , а горизонтальные напряжения  $y_{max}$  и  $y_{min}$  на отдельных месторождениях отличаются большим многообразием. В то же время наблюдается общая закономерность. В приповерхностном массиве до глубины 100-200 м тектонические напряжения близки к нулю. В пределах глубин 100-400 м начитается их резкий рост, а стабилизация наступает на глубинах 500-600 м (рис.2). Установлено, что в приповерхностном массиве уменьшение тектонических напряжений происходит в результате их

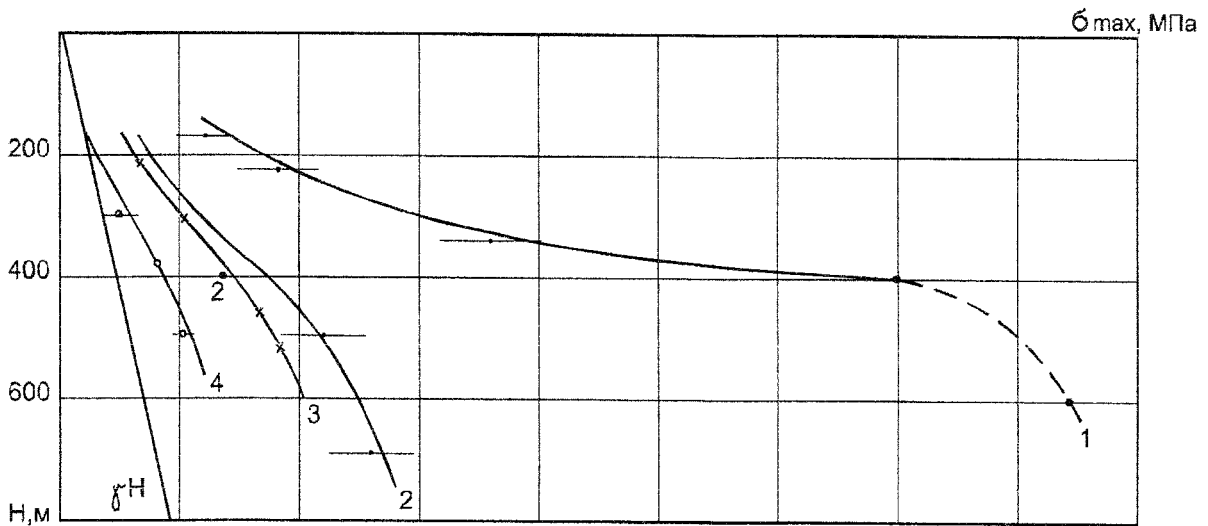
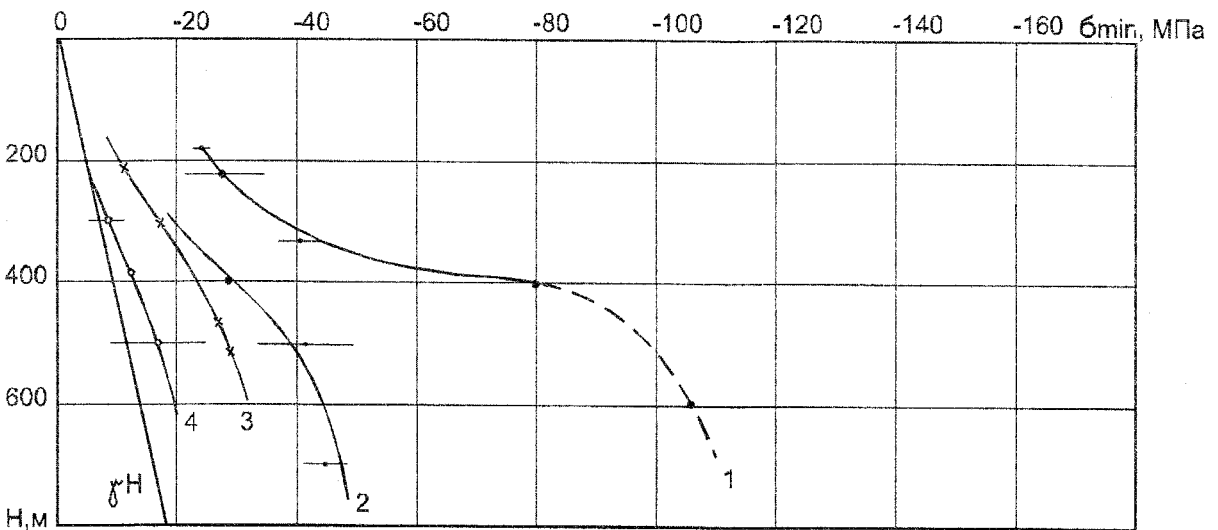


Рис.2. Графики изменения первоначальных гравитационно-тектонических напряжений с глубиной. Номер эпюры соответствует номеру месторождения в табл. 2.



разгрузки на зоны выветривания по слоям слабых пород или пород, склонных и интенсивно выветриванию (Зубков, 2001). В то же время нелинейное изменение тектонических напряжений в пределах глубин 200-600 м невозможно было объяснить изменением прочностных и деформационных характеристик массива – эти характеристики на глубинах более 200 м оставались постоянными.

Была проверена гипотеза о медленных сдвиговых деформациях разгрузки за очень длительный интервал времени (сотни и тысячи лет) в результате превышения сдвигающих усилий над препятствующими сдвигу силами

$$(\sigma_3 - \sigma_1) \sin 2\alpha \geq 2[C + \operatorname{tg}\varphi(\sigma_1 \cos^2 \alpha + \sigma_3 \sin^2 \alpha)] \quad (3),$$

где  $\alpha$  – угол между площадками скольжения и направлением действия  $\sigma_3$ ,  $C$  – сцепление массива,  $\varphi$  – угол трения массива.

Для проверки гипотезы на Естюнинском, Таштагольском, Березовском и Северопесчанском месторождениях были подобраны значения  $\alpha$ ,  $C$  и  $\varphi$  так, чтобы на конкретном месторождении они не сильно отличались от горизонта к горизонту в пределах глубин 200-700 м при выполнении условия прекращения сдвиговых деформаций для измеренных напряжений. Напряжением  $\sigma_1$  считались вертикальные напряжения  $\sigma_z$ , которые на трех последних месторождениях близки к весу пород. Исключение составляет лишь уникальное Естюнинское месторождение. Результаты расчетов приведены в табл. 2.

При исследовании условий прекращения скола было установлено следующее:

1. Для зафиксированных измерениями в шахтах  $\sigma_3$  и  $\sigma_1$  максимальные значения  $C$  и  $\varphi$  получены при  $\alpha = 38-42^\circ$ .

2. При уменьшении прочностных характеристик массива ( $C$  и  $\varphi$ ) сектор возможных углов скола увеличивается в результате отклонения  $\alpha$  от среднего в большую и меньшую стороны на  $5^\circ$ ,  $10^\circ$ ,  $20^\circ$ , т.е. угол скола может, к примеру, принимать значения в пределах  $20-60^\circ$ .

3. Если принять  $\alpha = 20^\circ$  и максимальные значения  $C$  и  $\varphi$ , то  $\sigma_3$  должно быть в 1,15-1,18 раза выше измеренных значений, т.е.  $\alpha$ , большие или меньшие оптимальных ( $38-42^\circ$ ), неприемлемы.

4. При заданных  $\sigma_3$ ,  $\sigma_1$  и  $\alpha$  скол произойдет, если  $C$  и  $\varphi$  будут иметь определенное соотношение. Если уменьшить  $C$ , то во столько же раз надо увеличить  $\varphi$ , и наоборот. В настоящее

время вопрос о соотношении  $C$  и  $\varphi$  остается открытым, хотя для «мгновенной» прочности они связаны соотношением

$$C = \frac{[\sigma_{\text{сж}}](\sin \varphi - 1)}{2 \cos \varphi} \quad (4),$$

где  $[\sigma_{\text{сж}}]$  – прочность при одноосном сжатии.

На всех месторождениях угол скола  $\alpha$  от горизонта к горизонту изменяется на  $1-4^\circ$ , составляя в среднем  $39,5^\circ$  при интервале изменения от  $36$  до  $42^\circ$ . Также на всех месторождениях на глубинах менее  $400$  м с приближением к поверхности происходит уменьшение  $C$  и  $\varphi$ , а на глубинах  $\geq 400$  м эти значения стабильные. Принимая во внимание эту закономерность, на Естюнинском месторождении спрогнозировали изменение напряжений до глубины  $600$  м, где они достигли следующих значений:  $\sigma_{\text{max}} = -169$  МПа,  $\sigma_{\text{min}} = -106$  МПа.

Величины  $C$  и  $\varphi$  на отдельных месторождениях прямо пропорциональны прочности породы, полученной при испытании образцов на сжатие:

Северопесчанское  $[\sigma_{\text{сж}}] = 80+100$  МПа,  $C = -1,3$  МПа,  $\varphi = 10^\circ$ ;

Березовское  $[\sigma_{\text{сж}}] = 105+145$  МПа,  $C = -2,6$  МПа,  $\varphi = 10^\circ$ ;

Таштагольское  $[\sigma_{\text{сж}}] = 140+225$  МПа,  $C = -5,7$  МПа,  $\varphi = 14^\circ$ ;

Естюнинское  $[\sigma_{\text{сж}}] = 300+400$  МПа,  $C = -20,0$  МПа,  $\varphi = 17^\circ$ .

По результатам измерения напряжений и по полученным значениям  $\alpha$ ,  $C$  и  $\varphi$  просматривается такая закономерность: тектонические напряжения достигают максимума на глубинах  $500-600$  м, а глубже или растут очень медленно или становятся постоянными, а дальнейшее увеличение горизонтальных напряжений с глубиной происходит только за счет роста гравитационной составляющей. Подтверждением этого вывода являются результаты измерения напряжений в различных регионах мира на глубине до  $2800$  м. Анализ  $130$  данных [Сашурин, 1999] показывает, что полусумма максимальных и минимальных тектонических напряжений равна  $15,4 \pm 2,3$  МПа, и она, с отклонениями отдельных результатов от  $10$  до  $26$  МПа, является постоянной для глубин  $200-2800$  м. Это говорит о том, что в среднем  $\sigma_{\text{max}}$  находится в пределах от  $-15$  до  $-31$  МПа, а  $\sigma_{\text{min}}$  от  $0$  до  $-15$  МПа. В то же время  $\sigma_{\text{max}}$  может дос-

Таблица 2  
Характеристика напряженного состояния и длительная прочность массива пород

Н, м	Измеренные $\sigma$ , МПа		$\sigma_z$	Приемы при расчетах, МПа		С, МПа	$\phi$ , град	$\omega$ , град
	$\sigma_{г\max}$	$\sigma_{г\min}$		$\sigma_{г\max}$	$\sigma_{г\min}$			
1. Естюнинское месторождение								
220	-37±7	-28±7	-34±4	-42	-22	-4,5	10	40
340	-72±9	-41±3	47±2	-80	-40	-7,7	12	39
400	-140	-80	-53	-140		-19,6	16	37
600				-169		-20,0 (-25,7)	18 (12)	36
400		-80	-53		-80	-6,0	8	41
600					-106	-6,0	12	39
2. Гапгагольское месторождение								
200			-6	-15		-3,1	8	41
300			-10	-24		-4,1	10	40
400			-14	-34		-5,1	12	39
500	-28	-28	-20±4	-44		-5,7	14	38
700	-45±8	-42±8	-24±3	-54		-5,7 (-8,4)	14 (10)	38
	-53±7	-45±4						
3. Березовское месторождение								
200	-14		-8,4	-14		-1,6	6	42
300	-21		-12	-21		-2,2	8	41
400	-29,5		-16,5	-29,5		-2,5	10	40
500	-36		-20,5	-36		-2,6	10	40
600	-40		-24	-40		-2,5	10	40
4. Северогречанское месторождение								
300	-10±2		-8±3	-12		-0,6	8	41
380	-16,3		-12,5	-17		-1,2	10	40
500	-21±2		-18±8	-23		-1,3	10	40

тигать –50 МПа и более. Для рассматриваемых месторождений эти значения при горизонтальной гравитационной составляющей 0,43 γН на глубине 500 м составляет:

Северопесчанское  $\sigma_{\text{тmax}} = -16,5$  МПа,  $\sigma_{\text{тmin}} = -7,5$  МПа;

Березовское  $\sigma_{\text{тmax}} = -29,5$  МПа,  $\sigma_{\text{тmin}} = -14,0$  МПа;

Таштагольское  $\sigma_{\text{тmax}} = -37,5$  МПа,  $\sigma_{\text{тmin}} = -11,5$  МПа;

Естюнинское  $\sigma_{\text{тmax}} = -155,0$  МПа,  $\sigma_{\text{тmin}} = -93,0$  МПа.

Если на первых трех месторождениях в среднем значения  $(\sigma_{\text{тmax}} + \sigma_{\text{тmin}}) / 2 = 19,4$  МПа, то на Естюнинском месторождении эта полусумма резко выделяется из общей закономерности, что можно объяснить лишь чрезвычайной прочностью массива горных пород (при высокой прочности в образце и слабой трещиноватости), способного накапливать высокий уровень напряжений.

В дальнейшем при нахождении корреляционной связи между  $[\sigma_{\text{ск}}]$  и интенсивностью трещиноватости массива, с одной стороны, и  $C$  и  $\varphi$  – с другой, можно будет для большинства месторождений, где  $\sigma_z \approx \gamma H$ , прогнозировать изменение  $u_{\text{тmax}}$  с глубиной. Этот прогноз можно будет сделать для месторождений, где напряжение не измеряли (открытые горные работы), и тем более для месторождений, где измерения сделаны на одном или двух горизонтах.

В литературе большое внимание уделяется временным вариациям астро- и геофизических полей, содержащих периоды  $T$  от долей секунды до многих миллионов лет:

1. Не совпадают чередование фаз рифтогенеза и складчатости [Милановский, 1984].

2. Изменяется скорость вращения Земли [Парийский, 1984].

3. Изменяется напряженность магнитного поля Земли [Ривин, 1989].

4. Изменяется сила тяжести [Буланже, 1984].

5. Периодически изменяется сейсмичность и активизация горных ударов на рудниках [Яковлев, Тарасов, 1999; Базавлук, Юдахин, 1993; Юдахин, Французова, 2001].

Вариации с  $1 < T \leq 100$  лет связаны с взаиморасположением планет Солнечной системы, влияющих на солнечную активность (СА), у которой наблюдается 11-и, 22-х и 80-90 летние циклы. В работе [Яковлева, Тарасова, 1999] показано, что минимуму СА соответствует максимум сжатия земной коры, в результате чего резко возрастает сейсмичность, горные удары и напряженное состояние Земной коры. К примеру, в 19-м цикле в год минимума СА напряженное состояние Земли в 17,14 раза превысило напряжения в год максимума СА. В то же время, об инструментально зафиксированных амплитудах изменения тектонических напряжений в МПа, направлениях главных напряжений пульсации и периодах в литературе не известно.

При поддержке Российского фонда фундаментальных исследований со второй половины 1998 г. в ИГД УрО РАН началось изучение периода, амплитуды и азимутов пульсации тектонических напряжений в земной коре Урала. Для этого были оборудованы наблюдательные станции (табл.3) в различных районах Урала: подземные – вне зоны влияния горных работ в районе городов Краснотауринск, Нижний Тагил, Березовский и Гай; на поверхности – в районе гг.Верхняя Пышма и Среднеуральск. В подземных условиях в выработках различной ориентации закладывали реперные линии на базах 25-50 м. Расстояние между реперами измеряли проволоками по технологии гибких нитей [Зубков, 1982]. На поверхности реперы устанавливали на базах 1,5-6 км, расстояние между которыми измеряли с помощью спутниковой навигационной системы GPS. Исходная инфор-

Таблица 3

Характеристика районов проведения наблюдений

Город (район)	H, м	$\sigma_z^n$ , МПа	$\sigma_1^n$ , МПа	$\sigma_2^n$ , МПа	$\alpha_1^n$ , град.
Краснотауринск	800	-24	-30	-52	47
Нижний Тагил *	480	-56	-100	-160	30
Березовский	712	-20	-54	-66	22
В.Пышма – Среднеуральск	0	–	–	–	–
Гай	830	-20	-20	-40	6

Примечание. \* – Прогнозируемые напряжения.

мация о длине измеряемых баз в различное время приведены в табл.4.

Обработка результатов заключалась в следующем:

– была выбрана база  $L_0$  измеренная, к примеру, в декабре 1998 г., относительно которой оценивали изменение длины в другое время;

– по полученным изменениям длины линий  $\Delta(L_i - L_0)$  определяем относительную деформацию линий  $\epsilon_i$ ;

– на каждом объекте подбирали комбинации из трех линий и находили  $\sigma_1, \sigma_2$  (МПа)  $\alpha_{1-1}$  (град) по формулам (5);

– после статистической обработки получили средние значения  $\sigma_1, \sigma_2, \alpha_1$  – азимут действия  $\sigma_1$ ;

– за весь период наблюдений находили средний азимут действия  $\sigma_1$  или  $\sigma_2$ , принимали его за ось абсцисс  $X$  и находили  $\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}$  (МПа), которые более наглядно характеризовали изменение напряжений во времени (табл.5).

$$\operatorname{tg} 2\alpha_{1-1} = 2 \frac{(E_I \epsilon_I - E_{II} \epsilon_{II}) \sin^2 \alpha_{I-III} - (E_I \epsilon_I - E_{III} \epsilon_{III}) \sin^2 \alpha_{I-II}}{(E_I \epsilon_I - E_{III} \epsilon_{III}) \sin 2\alpha_{I-II} - (E_I \epsilon_I - E_{II} \epsilon_{II}) \sin 2\alpha_{I-III}};$$

$$\sigma_{1,2} = \frac{A(1 + \mu_n) \mp (E_I \epsilon_I - E_{III} \epsilon_{III})(1 - \mu_n)}{B(1 - \mu_n^2)}; \quad (5)$$

где  $A = E_I \epsilon_I \cos 2(\alpha_{I-1} + \alpha_{I-III}) - E_{III} \epsilon_{III} \cos 2\alpha_{I-1}$ ;  
 $B = \cos 2(\alpha_{I-1} + \alpha_{I-III}) - \cos 2\alpha_{I-1}$ ;

$\alpha_{I-II}, \alpha_{I-III}$  – углы, отсчитываемые от направления  $E_I \epsilon_I$ , соответственно до  $E_{II} \epsilon_{II}$  и  $E_{III} \epsilon_{III}$  против хода часовой стрелки, град;

$\alpha_{1-1}$  – азимут действия  $\sigma_1$ , отсчитываемый от направления  $E_I \epsilon_I$  по часовой стрелке, град.

По полученным результатам построены графики изменения нормальных напряжений во времени (рис.3). Анализ графиков изменения напряжений на Урале показывает следующее:

1. На всех участках наблюдается изменение тектонических напряжений во времени с амплитудой: Краснотурьинск – 14-20 МПа, или 35-45 % от измеренных гравитационно-тектонических напряжений; в городе Нижний Тагил – 22-40 МПа, или 10-20 %; в городе Березовский – 10-20 МПа, или 20-25 %; в городе Гай – 15-26 МПа, или 30-50 %; в городах В.Пышма – Среднеуральск – 0,4-0,9 МПа.

2. Азимуты колебания одного из главных напряжений, соответственно, составляют  $137 \pm 2^\circ, 78 \pm 6^\circ, 105 \pm 5^\circ, 127 \pm 5^\circ$  и  $132 \pm 8^\circ$ , что близко к направлению подвижки Евразийской плиты в районе Урала.

3. Если принять, что 23-й цикл солнечной активности имел минимум в 1994-1997 гг., а следующий будет в 2005-2008 гг., то на графиках пульсации этот период не просматривается. На всех графиках пока просматриваются периоды с частотой 10-12 месяцев и амплитудой меньшей в 4-5 раз, что соответствует периоду обращения Земли вокруг Солнца.

4. Прямым подтверждением активизации геодинамических явлений в период минимума солнечной активности является то, что в г. Нижний Тагил в 1994-1998 гг. произошло 30 горных ударов в шахтах и техногенных землетрясений по энергетике соответствующих взрыву до 100 т ВВ, а сжатие земной коры с середины 1998 г. до середины 1999 г. уменьшилось на 40 МПа (это только часть возможной амплитуды пульсации). В 1999-2002 гг. было отмечено всего лишь 4 незначительных горных удара.

Следовательно, в любой рассматриваемый отрезок времени в массиве горных пород горизонтальные напряжения будут равны

$$\sigma_r = \lambda \gamma H + \sigma_{тф} + \sigma_{тп} \quad (6),$$

где  $\sigma_{тф}$  – тектонические фоновые напряжения;  $\sigma_{тп}$  – тектонические пульсирующие напряжения.

Можно предположить 2 варианта участия всех этих напряжений в медленных сдвиговых деформациях массива и релаксации  $\sigma_r$ : 1. На релаксацию  $\sigma_r$  влияют лишь  $\lambda \gamma H$  и  $\sigma_{тф}$  как постоянно действующие напряжения. Напряжение  $\sigma_{тп}$  на релаксацию не влияет из-за кратковременности его действия. 2. На релаксацию  $\sigma_r$  влияют все составляющие. Так как величина напряжений изменяется с высокой частотой на фоне сотен и тысяч лет, то и скорость релаксации меняется с такой же частотой и, по-видимому, изменяется  $C$  и  $\phi$ . В конечном итоге мы получаем их усредненные значения.

За счет воздействия пиковых напряжений уровень  $\sigma_{тф}$  в зоне релаксации уменьшается, т.е. чем меньше  $\sigma_{тп}$ , тем меньше  $\sigma_{тф}$  по сравнению с массивом, где  $\sigma_{тп}$  было бы близко к нулю. Следует заметить, что на Естюнинском месторождении все измерения напряжений были сделаны, когда  $\sigma_{тп}$  были близки к нулю. На Гайском месторождении исследование пульсации были начаты в момент измерения напряжений.

Таблица 4

Азимуты  $\alpha_n$  (град) и длина баз  $L$ , м

г. Нижний Тагил					
$\alpha_n$ , град	0	26	126	126	156
$E_M \cdot 10^{-5}$ , МПа	0,55	0,65	0,65		0,65
Дата	$L$ , м				
27.08.98	50,00915	39,55724	50,04849	-	50,01295
24.10.98	50,01170	-	50,04930	-	50,01525
23.12.98	50,01287	39,56002	50,05962	50,04186	50,01684
26.04.99	50,01730	39,56220	-	50,04480	50,01844
20.07.99	50,01540	39,56351	-	50,04475	50,01980
16.11.99	50,01587	39,56261	-	50,04454	50,01642
15.03.00	50,01718	39,56446	-	50,04479	50,02578
15.08.00	50,01663	39,56440	-	50,04793	50,02116
29.11.00	50,01989	39,56485	-	50,04987	50,02120
12.04.01	50,01981	39,56465	-	50,04746	50,02290
25.07.01	50,01931	39,56405	-	50,04905	50,02250
29.11.01	50,01946	39,56413	-	50,04663	50,02300
06.03.02	-	39,56385	-	50,04616	50,02229

г. Краснотурьинск						
$\alpha_n$ , град	0	15	58	90	90	148
$E_M \cdot 10^{-5}$ , МПа	0,66	0,88	0,79	0,98	0,66	0,72
Дата	$L$ , м					
06.04.98	47,09970	23,02153	29,09109	44,42031	46,94835	44,06655
30.06.98	47,09749	23,02076	29,08899	44,42045	46,94653	44,06625
30.08.98	47,09868	23,02147	29,09367	44,42007	46,94869	44,05760
18.06.99	47,10005	23,02039	29,09002	-	46,94963	44,06690
03.09.99	47,10165	32,02054	29,09179	44,41995	46,95056	44,06766
15.10.99	47,10129	23,02009	29,09265	44,42241	46,94904	-
20.02.00	47,10010	23,02050	29,09716	-	46,94600	44,06960
23.10.00	47,10070	23,02139	-	-	-	-
22.12.00	47,10281	23,04001	-	-	46,99036	-

г. Березовский				
$\alpha_n$ , град	32	75	90	162
$E_M \cdot 10^{-5}$ , МПа	0,60	0,60	0,60	0,60
Дата	$L$ , м			
16.10.98	50,10271	39,74496	49,97478	39,58370
17.12.98	50,10405	39,74676	49,97832	39,58497
25.03.99	50,10542	39,74326	49,97151	39,58627
14.07.99	50,10979	39,74626	49,97042	39,58771
02.11.99	50,10788	39,75823	49,96846	39,58703
$\alpha_n$ , град	20	80	160	
23.03.00	49,89438	49,93987	39,54791	
06.07.00	49,88334	49,93932	39,54805	
15.11.00	-	49,94288	-	

г. Гай			
$\alpha_n$ , град	15	70	153
$E_M \cdot 10^{-5}$ , МПа	0,43	0,43	0,51
Дата	$L$ , м		
03.11.98	49,89916	49,84838	39,55349
06.05.99	49,88594	49,84442	39,55170
01.09.99	49,89027	49,84387	39,55270
08.12.99	49,89313	49,84433	39,55762
06.04.00	49,88846	49,84123	-
24.08.00	49,89470	49,84375	39,55450
10.01.01	49,89564	49,84813	39,55702
18.04.01	49,89821	49,84915	39,55671
18.07.01	49,89927	49,85055	39,54091
14.11.01	49,90156	49,85145	39,56931
20.03.02	49,89841	49,84936	39,56200

гг. Верхняя Пышма – Среднеуральск						
$\beta_L$ , град	6	30	74	104	128	160
$E_M \cdot 10^{-5}$ , МПа	0,44	0,43	0,44	0,36	0,41	0,36
Дата	$L$ , м					
24.07.98	2208,656	3018,759	1360,919	2800,135	1792,330	3504,562
12.10.98	2208,646	3018,749	1360,920	2800,143	1792,335	3504,557
24.12.98	2208,649	3018,756	1360,920	2800,145	1792,336	3504,552
24.03.99	2208,655	3018,758	1360,924	2800,161	1792,341	3504,559
14.07.99	2208,654	3018,756	1360,916	2800,154	1792,345	3504,562
27.10.99	2208,654	3018,757	1360,920	2800,165	1792,349	3504,563
10.02.00	2208,660	3018,763	1360,924	2800,169	1792,351	3504,573
19.09.00	2208,651	3018,749	1360,906	2800,145	1792,344	3504,555
27.12.00	2208,659	3018,744	1360,901	2800,152	1792,354	3504,576
05.04.01	2208,654	3018,739	1360,905	2800,158	1792,351	3504,566
17.07.01	2208,651	3018,733	1360,895	2800,143	1792,347	3504,561
15.11.01	2208,662	3018,746	1360,902	2800,151	1792,348	3504,571
15.04.02	2208,660	3018,743	1360,910	2800,166	1792,354	3504,577
	2208,662	3018,746	1360,902	2800,151	1792,348	3504,571

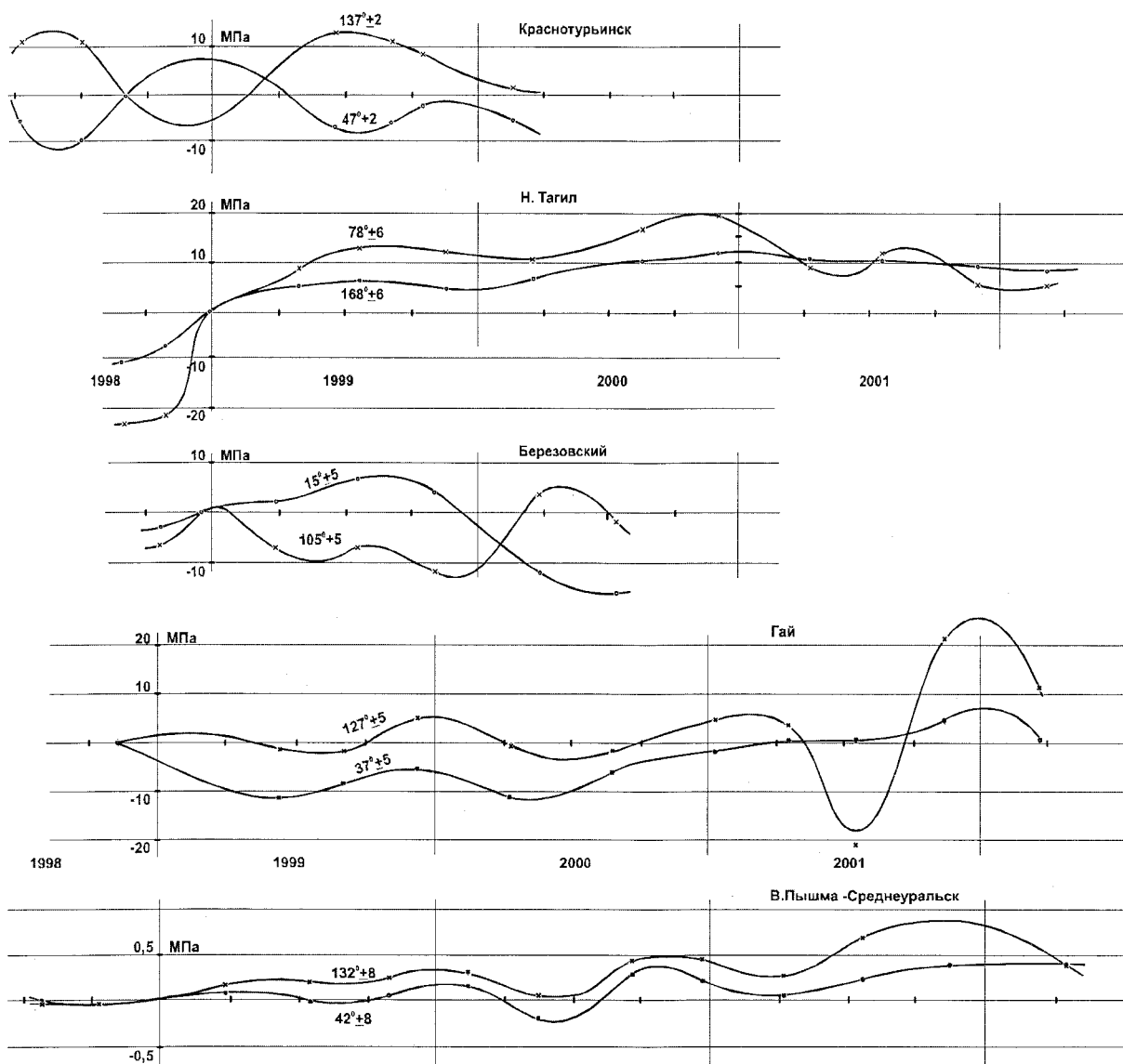


Рис. 3. Эпюры пульсации тектонических напряжений.

Изменение  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$ ,  $\tau_{xy}$  (МПа) во времени

Дата замера	$\sigma_1$	$\sigma_2$	$\alpha_1$	$\alpha_x$	$\sigma_x$	$\sigma_y$	$\tau_{xy}$
г. Краснотурьинск							
30.08.98–							
–06.04.98	10,2	-4,1	139	137	10,2	-4,1	0
–30.06.98	10,7	-10,1	139	137	10,7	-10,1	0
–30.08.98	0	0	–	–	0	0	0
–18.06.99	12,2	-6,9	138	137	12,2	-6,9	0
–03.09.99	10,7	-4,6	138	137	10,7	-4,9	0
–15.10.99	7,8	-2,9	132	137	7,7	-2,8	-0,9
–20.02.00	3,4	-8,	162	137	1,3	-6,1	-4,4
г. Нижний Тагил							
27.08.98–							
–23.12.98	-10,0	-24,2	1	76	-23,8	-10,4	2,4
–24.10.98	-5,9	-20,7	3	76	-20,2	-6,4	2,8
–23.12.98	0	0	–	–	0	0	0
–28.04.99	8,7	5,2	67	76	8,5	5,4	-0,8
–20.07.99	13,2	6,3	75	76	13,1	6,4	-0,6
–16.11.99	12,8	4,1	69	76	12,6	4,3	1,1
–15.03.00	11,3	6,0	60	76	10,7	6,6	1,7
–15.08.00	16,3	9,9	72	76	16,3	9,9	0,4
–29.11.00	19,5	12,3	76	76	19,5	12,3	0
–12.04.01	10,0	8,9	176	76	8,9	10,0	0,2
–25.07.01	12,5	10,5	99	76	12,2	10,8	-0,7
–29.11.01	9,1	5,4	163	76	5,4	9,1	-0,2
–06.03.02	8,9	5,4	171	76	5,4	8,9	-0,1
г. Березовский							
16.10.98–							
–17.12.98	-2,6	-5,3	17	102	-5,3	-2,6	0,2
–17.12.98	0	0	–	–	0	0	0
–25.03.99	2,6	-7,5	9	102	-7,5	2,6	-0,5
–14.07.99	6,6	-7,6	12	102	-7,6	6,6	0,2
–02.11.99	4,1	-11,2	10	102	-11,2	4,1	-0,5
–23.03.00	5,9	-12,5	121	102	3,9	-10,5	-5,7
–06.07.00	-1,1	-15,5	102	102	-1,1	-15,5	-5,7
г. Гай							
–03.11.98	0	0	–	–	0	0	2,2
03.11.98–							
–06.05.99	-0,9	-11,80	111	127	-1,4	-11,3	0,4
–01.09.99	-1,9	-8,6	116	127	-2,0	-8,5	-1,6
–08.12.99	5,6	-5,9	128	127	5,5	-5,8	-1,4
–06.04.00	-0,6	-10,7	128	127	-0,7	-10,6	-0,8
–24.08.00	-1,1	-5,2	138	127	-1,4	-4,9	-1,0
–10.01.01	4,5	-2,0	122	127	4,5	-2,0	0,6
–18.04.01	3,7	0,2	124	127	3,7	0,2	0,1
–18.07.01	1,0	-18,0	44	127	-17,7	0,7	-2,3
–14.11.01	21,2	4,2	132	127	21,0	4,3	-1,5
–20.03.02	11,0	0,7	129	127	11,0	0,7	0,1
гг. Верхняя Пышма – Среднеуральск							
24.07.98–							
–24.12.98	0,05	-0,10	84	132	-0,04	-0,01	0,07
–12.10.98	-0,04	-0,04	46	132	-0,04	-0,04	0
–24.12.98	0	0	–	132	0	0	0
–24.03.99	0,16	0,08	146	132	0,16	0,08	-0,02
–14.07.99	0,18	0,02	134	132	0,18	-0,02	0
–27.10.99	0,24	0,04	136	132	0,24	0,05	0
–10.02.00	0,32	0,16	133	132	0,32	0,16	0
–10.05.00	0,04	-0,20	127	132	0,04	-0,20	0,02
–19.09.00	0,43	-0,31	135	132	0,43	-0,31	-0,01
–27.12.00	0,44	-0,20	134	132	0,44	-0,20	-0,01
–05.04.01	-0,26	-0,07	129	132	0,26	-0,07	0,01
–17.07.01	0,72	0,22	121	132	0,70	0,23	0,10
–15.11.01	0,88	0,37	130	132	0,88	0,37	0,02
–15.04.02	0,38	0,35	37	132	0,35	0,38	0

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ экспериментальных результатов позволил выявить ряд общих закономерностей в формировании напряжений в земной коре Урала.

1. Район Урала к северу от выступа Русской платформы (к северу от г. Екатеринбург), приуроченный к Тимано-Кокчетавской тектонической зоне, характеризуется преобладающим сжатием по азимутам (123-155°), где тектонические напряжения достигают 10-50 и более МПа, которые в 2-3 раза выше напряжений, действующих в перпендикулярном направлении.

2. В районе Урала к югу от выступа Русской плиты (Уфимский выступ Западно-Сибирской плиты) на участке Челябинск – Уфа – Магнитогорск уровень напряжений ниже, и здесь нет ярко выраженного направления максимального сжатия земной коры. Различие минимальных и максимальных напряжений не превышает 3-5 МПа и ориентировка максимального сжатия различна.

3. На Южном Урале в районе Каратау-Таласо-Ферганской тектонической зоны измерения в городах Гай и Хромтау показали различные результаты как по соотношению напряжений, так и по азимуту их действия.

4. На современном этапе, по данным движения геоблоков, деформации земной коры и ее напряженного состояния, Урал не является линейной структурой, а состоит из отдельных сегментов, которые характеризуются различными параметрами напряженно-деформированного состояния земной коры. В то же время на большинстве рудников (60 %) просматривается преобладающее сжатие земной коры по азимутам 120-150°, соответствующим направлению сжатия Евразийского континента в районе Урала 120-130°.

5. Поле напряжений в горизонтальной плоскости анизотропно. На каждом месторождении отмечаются направления максимального и минимального сжатия. Следовательно, даже с учетом длительности действия горизонтальных напряжений, коэффициент Пуассона в массиве не равен 0,5 или идет постоянная «подпитка» тектонических напряжений.

6. Установлена пульсация тектонических напряжений с периодом 10 –12-18 месяцев и амплитудой 10-40 МПа. Одно из главных направлений колебаний является юго-восточным с азимутами 110-150°, что соответствует направ-

лению движения Евразийского континента и направлению максимального сжатия Урала. Прогнозируется период 6-11 лет с амплитудой до сотни МПа.

7. О величине тектонических напряжений можно судить по результатам измерений на глубинах более 400-600 м. Выше тектонические напряжения подвержены релаксации.

## Список литературы

*Алейников А.Л., Беллавин О.В.* Урал в системе планетарных лениантов // Сб. науч. трудов. Екатеринбург: УИФ-Наука, 1993. С. 3-9.

*А.с. 979840 СССР, МКЛ G01B 3/10.* Способ измерения приведенного к горизонту расстояния между опорными точками / Зубков А.В., Феклистов Ю.Г. (СССР). №2856127/25-28. Заявлена 14.12.79. Оpubл. 07.12.82. Бюл. № 45.

*Базавлук Т.А., Юдахин Ф.Н.* Деформационные волны в земной коре Тянь-Шаня по сейсмическим данным. // Доклады РАН. 1993. Т. 329. № 5. С. 565-570.

*Буланже Ю.Д.* Некоторые результаты изучения приливных изменений силы тяжести // Проблемы расширения и пульсации Земли. М.: Наука, 1984. С. 73-84.

*Зубков А.В.* Геомеханика и геотехнология. Екатеринбург: УрО РАН, 2001. 333 с.

*Сашурин А.Д.* Сдвигение горных пород на рудниках черной металлургии. Екатеринбург: УрО РАН, 1999. 268 с.

*Ушаков С.А., Ясаманов Н.А.* Дрейф материков и климаты Земли. М.: Мысль, 1984. 206 с.

*Милановский Е.Е.* Развитие и современное состояние проблемы расширения и пульсации Земли // Проблемы расширения и пульсации Земли. М.: Наука, 1984. С. 8-24.

*Парийский Н.Н.* О нерегулярных изменениях скорости вращения Земли и возможной связи их с деформациями Земли и изменениями силы тяжести // Проблемы расширения и пульсации Земли. М.: Наука, 1984. С. 84-93.

*Ривин Ю.Р.* Циклы Земли и Солнца. М.: Наука, 1989. 165 с.

*Яковлев Д.В., Тарасов Б.Г.* О генезисе геодинамической активности // Горная геомеханика и маркшейдерское дело. СПб.: ВНИМИ, 1999. С. 6-15.

*Юдахин Ф.Н., Французова В.И.* Особенности проявления геодинамических процессов и внутреплитной сейсмичности на Северо-западе Восточно-Европейской плиты // Современная геодинамика, глубинное строение и сейсмичность платформенных территорий и сопредельных регионов. Воронеж: Воронежский государственный университет, 2001. С. 223-225.

*Рецензент Юдахин Ф.Н.*