

ЗАКОНОМЕРНОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ЗЕМНОЙ КОРЫ УРАЛА ВО ВРЕМЕНИ

© 2010 г. А. В. Зубков*, О. В. Зотеев*, О. Ю. Смирнов*, Я. И. Липин*, С. В. Худяков*,
Р. В. Криницын*, К. В. Селин*, А. А. Ершов*, Л. Р. Валиуллов**

*Институт горного дела УрО РАН,
620219, г. Екатеринбург, ул. Мамина-Сибиряка, 58
direct@igd.uran.ru

**ОАО Институт УРАЛГИПРОРУДА
620219, г. Екатеринбург, ул. Мамина-Сибиряка, 85
Ruda@mail.utnet.ru

Поступила в редакцию 19.05.2009 г.

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. Выявлена пульсация тектонических напряжений с периодом 10–11 лет, соответствующим циклу солнечной активности, и средней амплитудой 10 МПа (составляющей 20–30% от уровня измеренных гравитационно-тектонических напряжений), которая должна приводить к изменению диаметра Земли на 2.4 км. Установлено нелинейное изменение тектонических напряжений с глубиной и в качестве одной из гипотез этого явления предлагается релаксация напряжений в пределах глубин от 0 до –500 м с учетом длительной прочности массива пород.

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

Напряженное состояние и геодинамическая активность верхней части Земной коры как среды обитания и техногенной деятельности человека были всегда в центре внимания. Периодически изменяющаяся интенсивность геодинамических явлений в виде землетрясений и горных ударов красноречиво свидетельствует об изменяющемся во времени уровне напряжений в недрах [8]. На рис. 1 представлены графики изменений солнечной активности и изменение количества землетрясений с магнитудой более 7 в период с 1960 по 2008 год.

Солнечная активность (СА) – это процесс изменения совокупных структурных образований в некоторой ограниченной области солнечной атмосферы, связанная с усилением в ней магнитного поля от значений 10–20 до нескольких (4–5) тысяч эрстед. В видимом свете наиболее заметным структурным образованием активной области являются темные, резко очерченные солнечные пятна, часто образующие целые группы. Общее число пятен и образованных ими групп медленно меняется в течение некоторого периода времени (цикла) от 8 до 15 лет (в среднем 10–11 лет). Важно, что наличие пятен на Солнце влияет на магнитное поле Земли, что в свою очередь изменяет напряженно-деформированное состояние в земной коре.

В годы минимума СА Земля максимально сжата, геодинамические явления имеют максимальную энергетику [8]. В годы нарастания СА напряженное состояние Земной коры уменьшается и на-

блюдается максимальное число геодинамических явлений, но меньшей энергетики. В годы максимума СА напряжения минимальны и наблюдается минимум геодинамических явлений. В годы спада СА напряжения растут, число геодинамических явлений со средней энергетикой увеличивается. Как отмечал Ю.Р. Ривин [7], знак полярности магнитного поля солнца меняется через 22 года, т.е. мы имеем дело с бициклами – четный и нечетный циклы. На графиках рис. 1 видно, что геодинамическая активность соответствует бициклическому изменению, и максимум событий соответствует середине бицикла, т.е. стыку четного и нечетного циклов. Именно в это время наблюдались минимумы СА (1975–77 гг., 1995–98 гг.)

В то же время в мировой практике нет данных об абсолютной величине пульсирующих тектонических напряжений $\Delta\sigma_m$ в земной коре в течение цикла СА. С учетом вышесказанного закономерности формирования природных напряжений в земной коре можно представить зависимостями:

$$\begin{aligned}\sigma_z^n &= \gamma H + \sigma_{zm} + \Delta\sigma_{zm}; \\ \sigma_3^n &= \gamma H + \sigma_{3m} + \Delta\sigma_{3m}; \\ \sigma_1^n &= \gamma H + \sigma_{1m} + \Delta\sigma_{1m};\end{aligned}\quad (1)$$

где σ_z^n – природное вертикальное напряжение, МПа; γ – удельный вес налегающих пород, МН/м³; H – глубина от земной поверхности, м; σ_{zm} – вертикальная статическая тектоническая сила, МПа; $\Delta\sigma_{zm}$ – изменяющийся во времени и пространстве вектор вертикальной тектонической силы, МПа; σ_3^n

и σ_{1n} – горизонтальные составляющие главных природных напряжений, МПа; σ_{3m} и σ_{1m} – главные статические составляющие тектонических сил, МПа; $\Delta\sigma_{3m}$ и $\Delta\sigma_{1m}$ – изменяющиеся во времени и пространстве вектора тектонических сил (пульсирующие напряжения), МПа.

Чтобы проследить изменение пульсирующих напряжений $\Delta\sigma_m$ во времени можно использовать следующие методы:

– метод натурных измерений, подразумевающий установку наблюдательных станций в подземном пространстве и на поверхности и фиксацию величины изменения напряжений в реальном времени, к примеру, с периодичностью 3–4 раза в год;

– метод, основанный на анализе накопленных результатов измерений на различных рудниках, полученных в разное время и в различных условиях (табл. 1) [4]. Все измерения напряжений производились деформационными методами: частичной разгрузки массива [1], полной разгрузки массива [1, 6], щелевой разгрузки [2, 4] и методом частичной разгрузки на большой базе [2].

Исследования непосредственно пульсирующих напряжений в земной коре Урала были начаты Институтом горного дела УрО РАН в 1998 г. Для этого на рудниках были оборудованы наблюдательные деформационные станции в городах Красноуральск, Нижний Тагил, Березовский и Гай, соответственно, на глубинах –600, –460, –712, –512 и –830 м, а также на поверхности в районе городов Среднеуральска и Верхней Пышмы. Измерения производились 3–4 раза в год.

Под землей наблюдательные станции включают 3–5 различно ориентированных реперных линий на базах 30–50 м.

При исследовании изменения тектонических напряжений нужно знать абсолютную величину расстояния между реперами и высокоточное изменение этого расстояния. Поэтому для измерений была применена технология гибких нитей, позволяющая оценить изменения базы 50 м с погрешностью не более 0.3 мм при следующих условиях (натяжение гибкой нити определяется автоматически):

– погрешность измерения превышения одного репера над другим $\Delta h < 2$ мм (измеряется с помощью нивелира);

– погрешность определения температуры $\Delta t < 0.2^\circ\text{C}$;

– погрешность принятой длины гибкой нити $\Delta S_0 = 1$ мм.

Методика исследования характера переменных напряжений заключалась в следующем.

1. Выбиралась база измерения длиной L_0 , относительно которой оценивали изменение длины реперной линии при последующих замерах.

2. На каждом пункте измерения по каждому направлению реперных линий изучалось геолого-

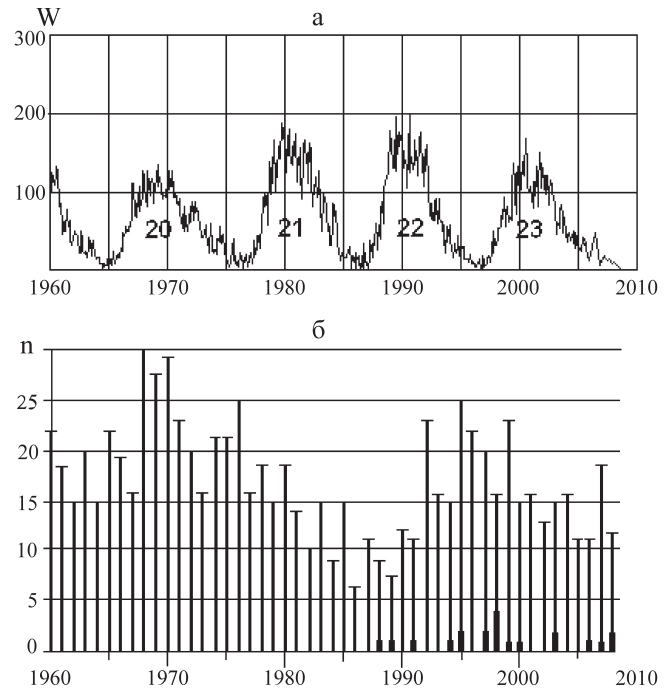


Рис. 1. Изменение солнечной активности (а) и сейсмичности (б).

W – число Вольфа – числовая характеристика солнечной активности. На графике сейсмичности приведено изменение количества землетрясений в мире с магнитудой более 7 и количества горных ударов на шахте Естюнская (выделено жирным).

тектоническое строение участков, и оценивались упругие параметры массива [4]:

$$E_m = 0.9^n E_o, \quad (2)$$

где E_m , E_o – модули упругости массива и образца, МПа; n – число рангов геоблоков на базе реперных линий.

3. Через 3–4 месяца проводились измерения длин реперных линий и вычислялось их изменение.

4. По полученным изменениям длины линий $\Delta L_j = (L_j - L_0)$ определяли относительную деформацию массива горных пород ϵ_j .

5. По комбинации измерений на трех наблюдательных линиях, азимуты которых, отличаются более чем на $25-30^\circ$ определялись изменения величины действующих горизонтальных напряжений и азимутов их действия:

$$\operatorname{tg} 2\alpha_{1-1} = \frac{(E_1\epsilon_1 - E_{II}\epsilon_{II}) \sin^2\alpha_{1-III} - (E_1\epsilon_1 - E_{II}\epsilon_{II} - E_{III}\epsilon_{III}) \sin^2\alpha_{1-II}}{(E_1\epsilon_1 - E_{III}\epsilon_{III}) \sin 2\alpha_{1-II} - (E_1\epsilon_1 - E_{II}\epsilon_{II}) \sin 2\alpha_{1-III}};$$

$$\Delta\sigma_{1,2} = \frac{A(1+\mu) \pm (E_1\epsilon_1 - E_{II}\epsilon_{II})(1-\mu)}{B(1-\mu)},$$

где $A = E_1\epsilon_1 \cos 2(\alpha_{1-I} + \alpha_{1-III}) - E_{III}\epsilon_{III} \cos 2\alpha_{1-I}$; $B = \cos 2(\alpha_{1-II} + \alpha_{1-III}) - \cos 2\alpha_{1-I}$; α_{1-III} – углы, отсчитываемые от первой реперной линии с максимальным азимутом ко второй и третьей против хода часовой стрелки, град.; α_{1-I} – азимут действия $\Delta\sigma_1$, отсчитываемый от направления $E_1\epsilon_1$ по часо-

Таблица 1. Результаты определения первоначальных напряжений на месторождениях полезных ископаемых Урала

№	Город, месторождение	Дата измере- ния, год	Глуби- на, м	Первоначальные напряжения, МПа							
				Измеренные			Скорректированные				
				Горизонтальные		Вертикальные	σ_3^n , МПа	σ_1^n , МПа	σ_{3m} , МПа	σ_{1m} , МПа	
				σ_x^n , МПа	σ_y^n , МПа	σ_z^n , МПа					
1	Североуральск, Североуральское	1997	-490	-54.0 ± 13.5	-33.0 ± 7.5	-25.0	-54	-33	-29	-8	
		1981	-800	-58.0	-38.0	-29.0	-63	-43	-34	-14	
2	Краснотурьинск, Северо-Песчанское	1968	-300	-10.3 ± 2.2	-7.9 ± 2.7	-9.0	-17	-10	-8	-1	
		1968	-380	-13.0 ± 2.4	-8.0 ± 4.4	-11.3	-18	-13	-7	-2	
8	Кушва, Валуевское	1982	-430	-16.3	-12.5	-15.5	-24	-15	-9	-0	
		1984	-500	-21.1 ± 2.1	-17.6 ± 8.3	-	-25	-16	-	-	
		1988	-540	-19.0 ± 1.5	-14.5 ± 0.8	-15 ± 0.6	-26	-16	-10	-1	
		1969	-125	-5.6 ± 2.4	-2.9 ± 4.4	-4.7 ± 2.2	-16	-13	-10	-7	
		1983	-380	-26.1 ± 4.0	-21.1 ± 8.6	-22.2 ± 3.2	-30	-25	-8	-3	
		1969	-170	17.7 ± 3.4	-14.0 ± 3.4	-5.0	-27	-18	-25	-13	
9	Кушва, Гороблагодатское	1980	-260	-25.1	-18.7	-9.0	-38	-22	-29	-13	
		1980	-600	-40.5	-21.3	-18.0	-51	-27	-33	-9	
		1988	-760	-51.0	-17.0	-22.0	-56	-22	-31	-8	
10	Нижний Тагил, Лебяжинское-I	1970	-300	-15.5	-7.9	-6.9	-16	-8	-	-	
		1983	-510	-22.3 ± 0.9	-19.3 ± 0.9	-21.1 ± 8.6	-22	-19	-	-	
11	Нижний Тагил, Высокогорское-I	1983	-510	-41.0 ± 13	-37.0 ± 7.0	-32.0 ± 5	-54	-50	-22	-18	
		1983	-590	-43.6 ± 13	-39.4 ± 7.3	-34.2 ± 5	-57	-52	-23	-18	
12	Нижний Тагил, Естюнинское-I	1977	-180	-25.4 ± 4.6	-24.2 ± 0.6	-20.9	-30	-28	-9	-8	
		1980	-220	-37.0 ± 7.0	-28.5 ± 7.0	-34.3 ± 4	-67	-58	-33	-24	
		1990	-340	-77.0 ± 8.9	-55 ± 3.4	-53.0 ± 2.1	-107	-85	-54	-32	
		1994	-400	-106.0	-84.0	-60.0	-120	-98	-60	-38	
		2005	-460	-115.0	-90.0	-68.0	-130	-105	-62	-37	
14	Березовский, Березовское-III	1988	-212	-9.4 ± 1.5	-8.3 ± 0.9	-5.9	-14	-10	-6	-2	
		1988	-314	-12.5 ± 1.5	-11.2 ± 1.6	-8.9	-15	-14	-8	-6	
		1988	-412	-15.3 ± 1.3	-13.8 ± 1.4	-11.5	-18	-16	-7	-6	
		1987	-512	-19.7 ± 3.4	-17.3 ± 2.5	-14.3	-21	-19	-8	-5	
		1990	-612	-21.9 ± 2.8	-19.8 ± 2.4	-17.1	-26	-25	-9	-8	
19	Узельга, Узельгинское-III Узельгинское-I	1994	-550	-38.5	-37.4	-26.5	-	-	-	-	
		1996	-550	36.7	25.7	-20.3	-37	-26	-17	-6	
		1999	-550	-36.4	-24.4	-20.6	-	-	-	-	
		1990	-640	-30.5 ± 1.5	-25.9 ± 1.1	-18.5 ± 1.5	-37	-32	-18	-14	
23	Гай, Гайское-VI Гайское-I	1998	-830	-39.9 ± 4.5	-18.7 ± 1.2	-21.8	-44	-23	-23	-2	
		2004	-910	-41.6	-19.8	-25.0	-46	-24	-21	+1	
		2008	-1070	-48.7	-32.0	-33.3	-49	-32	-7	+1	
26	Таштагол, Таштагол-I	1984	-540	-45.2 ± 8.0	-41.8 ± 10	-20.0 ± 4.5	-59	-54	-39	-36	
		1983	-750	-52.5 ± 7.5	-45.2 ± 3.6	-24.0 ± 3.3	-67	-60	-43	-36	

вой стрелке, град.; E_I , E_{II} , E_{III} – модули деформации массива по реперным линиям, рассчитываемые по формулам (2) с учетом тектоники массива, МПа; μ – коэффициент Пуассона массива; ϵ_I , ϵ_{II} , ϵ_{III} – относительная деформация массива на длине реперных линий.

6. После статистической обработки получали средние значения $\Delta\sigma_1$, $\Delta\sigma_2$, и азимут действия максимального сжимающего напряжения α_1^n .

7. За весь период наблюдений находили средний азимут действия $\Delta\sigma_1$ или $\Delta\sigma_2$, который принимается за ось абсцисс X , и находили $\Delta\sigma_x$, $\Delta\sigma_y$, $\sigma_{\Delta xy}$ так, чтобы средние значения $\sigma_{\Delta xy}$ были минимальными.

В г. Краснотурьинск наблюдениями с 04.1998 г. по 02.2000 г. была зафиксирована пульсация напряжений с частотой 12 месяцев и амплитудой 5–10 МПа. Затем станции были уничтожены шахтерами. Следующий цикл наблюдений начался на

глубине 620 м с 01.2003 г. К 07.2008 г. зафиксирован рост сжатия массива на 6–7 МПа.

В г. Нижний Тагил наблюдения на глубине -460 м ведутся с 09.1998 г. по 08.2008 г. С 1998 г. по 2001–2003 гг. сжатие массива уменьшилось на 25 МПа, а затем стало расти и это увеличение достигло 10 МПа.

В г. Берёзовский наблюдения были начаты 10.1998 г. на глубине -712 м, но к 07.2000 г. шахта была затоплена. Вновь наблюдения возобновились в 04.2003 г. на глубине -512 м. Зафиксирован рост сжатия на 6 МПа.

В г. Гай наблюдения на глубине -830 м ведутся с 11.1998 г. К 2001–2003 гг. было зафиксировано уменьшение сжатия массива на 15 МПа, а затем начался рост сжатия на 7–15 МПа.

В районе городов Верняя Пышма и Среднеуральск, на поверхности в период с 07.1998 г. по 2001–

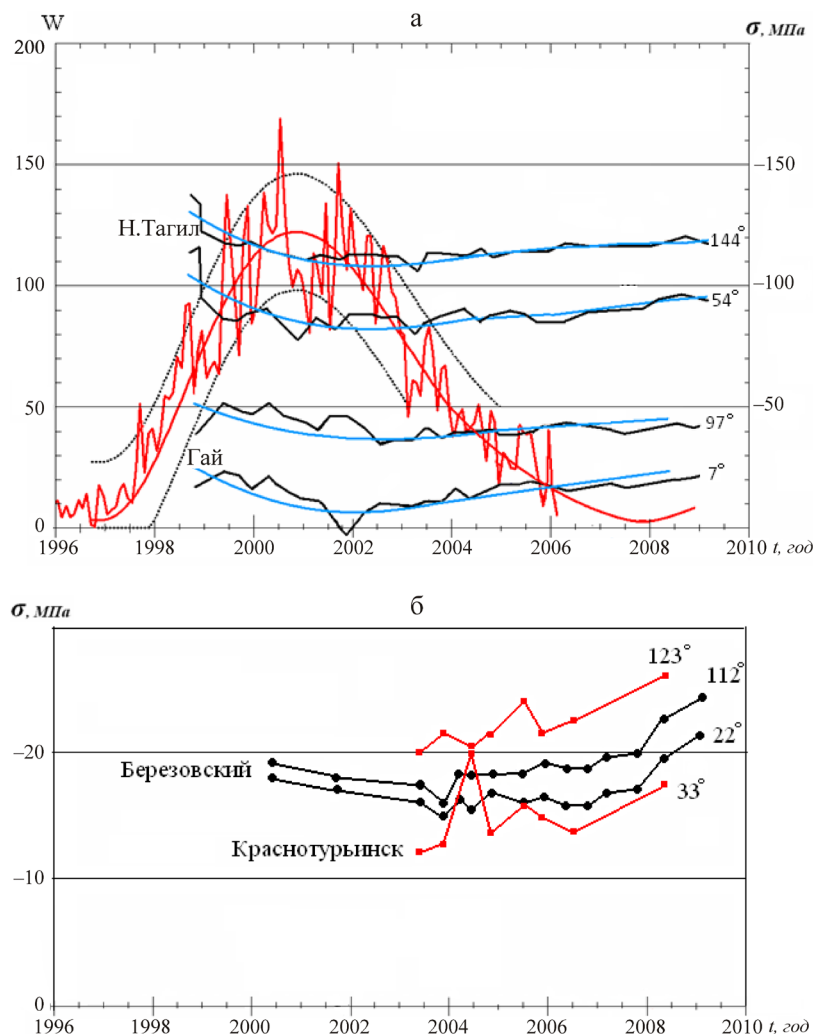


Рис. 2. Изменения горизонтальных напряжений σ_x и σ_y с азимутами их действия на фоне 23-го цикла СА (W) на шахтах Естюнинская (г. Нижний Тагил) и на Гайском руднике (г. Гай) (а), и горизонтальных напряжений на шахтах Северопесчанская (г. Краснотуры́нск) и Центральная (г. Березовский) (б).

2003 гг. сжатие массива уменьшилось на 1 МПа, а к 2008 г. возросло на 0.1 МПа. Если принять, что 23-й цикл солнечной активности имел минимум в 1995–1997 гг., а следующий – в 2008–2009 гг., то наблюдениями 1999–2008 гг. максимальное сжатие земной коры на Урале еще не зафиксировано. Поэтому наблюдения в 2009–2011 гг. чрезвычайно важны. 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 шахте и техногенных землетрясений – на прилегающей территории, по энергетике эквивалентных взрыву до 100 т ВВ. Сжатие земной коры с середины 1998 г. до середины 1999 г. уменьшилось на 25 МПа (это только часть возможной амплитуды пульсации). В результате, в 1999–2002 гг. было всего лишь четыре слабых горных удара. В марте 2003 г. произошел один толчок с энергией до 60 т ВВ, $M = 2.3$, который привёл к уменьшению сжатия массива на 8 МПа, а через 2

месяца сжатие увеличилось на 6 МПа. В 2006 г. горный удар соответствовал 30 т ВВ, в сентябре 2007 г. имел $M = 3.1$, в феврале 2008 г. – $M = 1.6$, а в октябре 2009 г. произошло 2 горных удара с $M = 2.4$.

Следует отметить, что самые крупные сейсмические события в районе шахты Естюнинская (г. Нижний Тагил) произошли не в шахте, а по Тимано-Кокчетавской тектонической зоне, которая расположена параллельно рудному телу на расстоянии 2–4 км от него.

На подземном руднике в г. Гай в ноябре 1998 г. (на глубине 830 м от дневной поверхности) и в январе 2004 г. (на глубине 910 м от дневной поверхности) были произведены измерения абсолютных величин напряжений. На шахте Естюнинская (г. Нижний Тагил) измерения были сделаны в марте 2005 г. В обоих случаях появилась возможность проследить изменение горизонтальных напряжений за весь период наблюдений, приняв за точку отсчета $\Delta\sigma_m$ время измерения напряжений и сложив полу-

Таблица 2. Деформации земной коры Урала в результате пульсации напряжений

	Участки, периоды измерений	По измеренным напряжениям		По измеренным деформациям		[$\sigma_{сж}$], МПа
		$\Delta\sigma_m$, МПа	$\varepsilon \times 10^4$	$\Delta\sigma_m$, МПа	$\varepsilon \times 10^4$	
1	Краснотурьинск, 1968–82–84–88 гг.	–(6–8)	–(1–3)	–(6–7)	–1	80–100
2	Нижний Тагил, 1998–2008 гг.			–(10–25)	–(1.5–3.8)	300–400
3	Кушва, 1969–80–88 гг.	–(9–10)	–2			100
4	Березовский, 1998–2008 гг.			–6	–1	105
5	Узельгинский рудник, 1990–96 гг.	–(6–12)	–(1.5–3)			100–120
6	Гай, 1998–2008 гг.	–(8–10)	–2	–13	–3	100–160
7	В. Пышма, 1998–2008 гг. Система GPS			–(0.3–0.6)	–(0.08–0.16 $\text{ср} \approx 0$)	

ченные их значения с измеренным приращением напряжений (рис. 2а).

Аналогично построены графики изменения горизонтальных напряжений на шахте Северопесчанская (г. Краснотурьинск) и шахте Центральная (г. Березовский) (рис. 2б).

Была проведена проверка возможности объяснения зарегистрированного переменного поля напряжений за счет случайных ошибок измерения. Она выполнялась методом математической статистики с помощью проверки гипотезы о законе распределения по критерию согласия Пирсона χ^2 . При этом все результаты измерения рассматривались как случайные величины. В том случае, если изменчивость напряжений определяется только случайной ошибкой измерений, распределение случайных величин должно быть близко к распределению по нормальному закону. Любые другие распределения свидетельствовали бы о том, что на изменчивость величин напряжений влияют и другие факторы.

Полученные результаты статистической обработки измерений позволяют с достаточной надежностью (с вероятностью 0.95) утверждать, что зарегистрированное изменение горизонтальных напряжений во времени обусловлено не ошибками измерения, а иными причинами, например, влиянием СА.

Второй метод определения $\Delta\sigma_m$, основанный на анализе накопленных результатов измерения напряжений на различных рудниках, полученных в разное время, базируется на следующем. На Урале измерение первоначальных напряжений проводилось в течении 40 лет, т.е. охвачено 4 цикла СА: 20-й (1965–76 гг.), 21-й (1976–86 гг.), 22-й (1986–1996 гг.) и 23-й (1996–2008 гг.).

На ряде рудников за этот период было сделано по несколько измерений на разных глубинах:

- на шахте Северопесчанская (г. Краснотурьинск) измерения были сделаны в 1968, 1982, 1984 и 1988 годах на глубинах от –300 до –540 м;
- на шахте Южная (ГБРУ) (г. Кушва) в 1969, 1980, и 1988 годах на глубинах от –170 до –760 м;
- на Узельгинском руднике в 1990 и 1996 годах на глубинах от –550 до –640 м.

На этих месторождениях горизонтальные напряжения изменялись с глубиной на величину в соответствии с изменением гравитационной состав-

ляющей. Поэтому появляется возможность привести результаты измерений к сопоставимым величинам, спроецировать их на любую выбранную глубину. К примеру, на шахте Северопесчанская измерения на глубине $H = -300$ м ($\sigma_x^n = -10.3$ МПа и $\sigma_y^n = -7.9$ МПа) можно спроецировать на глубину $H = -500$ м, добавив $\Delta\sigma = \gamma\Delta H = -0.03 \times 200 = -6$ МПа, т.е. в это время на глубине $H = -500$ м можно было ожидать $\sigma_x^n = -16.3$ МПа и $\sigma_y^n = -13.9$ МПа. Такую же операцию проделываем с результатами, измеренными на глубинах 380 м, 430 м и 540 м. Все результаты на шахте Южная проецируем на глубину –760 м, на Узельгинском руднике проецируем на глубину –550 м, на Гайском руднике на глубину –1070 м.

Полученные результаты были нанесены на график с совмещенными циклами СА (рис. 3), на которых четко просматривается изменение напряжений в течение совмещенного цикла СА. Величины максимальных пульсирующих напряжений $\Delta\sigma_m$, полученных двумя методами, приведены в табл. 2. С их учетом были скорректированы результаты табл. 1 с целью получения максимальных напряжений, обусловленных минимумами СА (последние 4 столбца).

На остальных месторождениях $\Delta\sigma_m$, ввиду подобия горно-геологических условий, приняты: на Валуевском – по аналогии с Гороблагодатским, на Высокогорском и Таштагольском – по аналогии с Узельгинским. Изменение природных максимальных напряжений по глубине приведены на рис. 4, 5 и 6.

На большинстве месторождений $\sigma_z^n = \gamma H$, а $\sigma_{zm} + \Delta\sigma_{zm} = 0$ при $\gamma = 0.027\text{--}0.033$ МН/м³ и угле падения рудных тел 0° или 90°. В то же время на ряде рудников $\sigma_{zm} + \Delta\sigma_{zm}$ изменяется с поверхности от нуля, достигает максимума на глубине $-(300\div 500)$ м и к отметкам $-(800\div 1000)$ м уменьшается до нуля.

Так, максимального значения $\sigma_{zm} + \Delta\sigma_{zm}$ достигает на месторождениях:

- Североуральском (1) на $H = -(400\text{--}500)$ м,
 $\sigma_{zm} + \Delta\sigma_{zm} = 0.9 \gamma H$;
- Гороблагодатском (9) на $H = -(300\text{--}400)$ м,
 $\sigma_{zm} + \Delta\sigma_{zm} = 0.5 \gamma H$;
- Высокогорском (11) на $H = -400$ м,
 $\sigma_{zm} + \Delta\sigma_{zm} = 1.0 \gamma H$;
- Естунинском (12) на $H = -400$ м,
 $\sigma_{zm} + \Delta\sigma_{zm} = 4.2 \gamma H$.

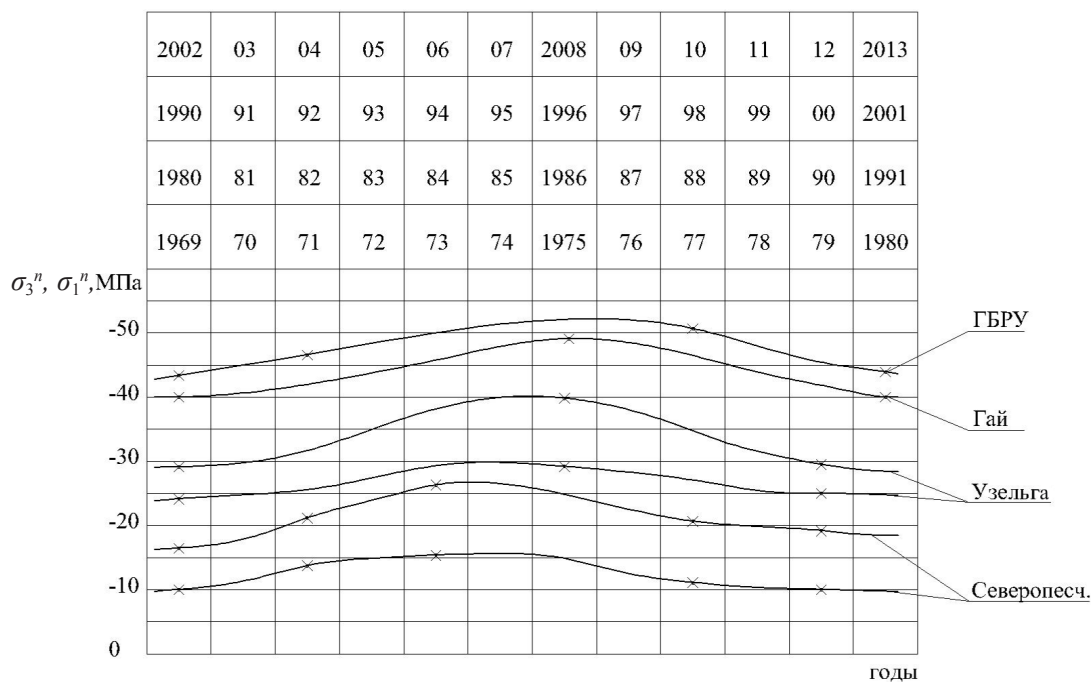


Рис. 3. Пульсации напряжений на месторождениях Урала по результатам измерения напряжений.

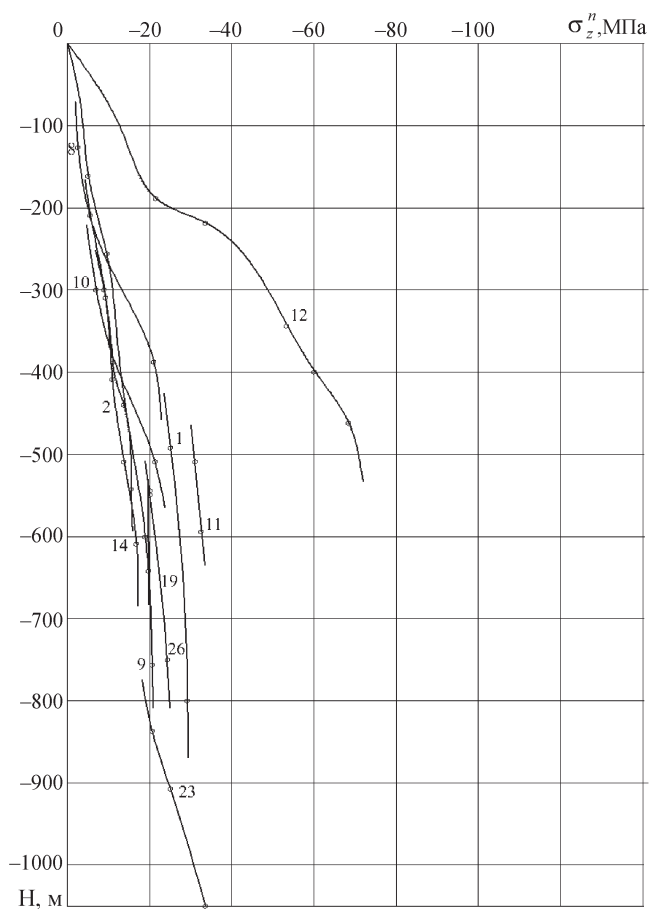


Рис. 4. Изменение природных вертикальных напряжений по глубине.

Здесь и далее, на рис. 5–7, числовые обозначения соответствуют табл. 1.

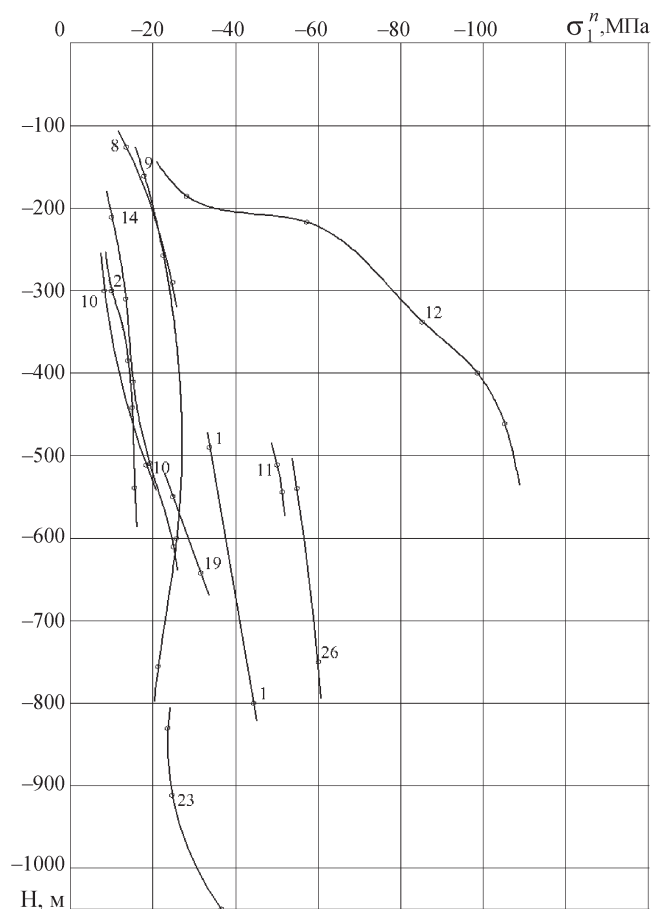


Рис. 5. Изменение минимальных горизонтальных напряжений по глубине.

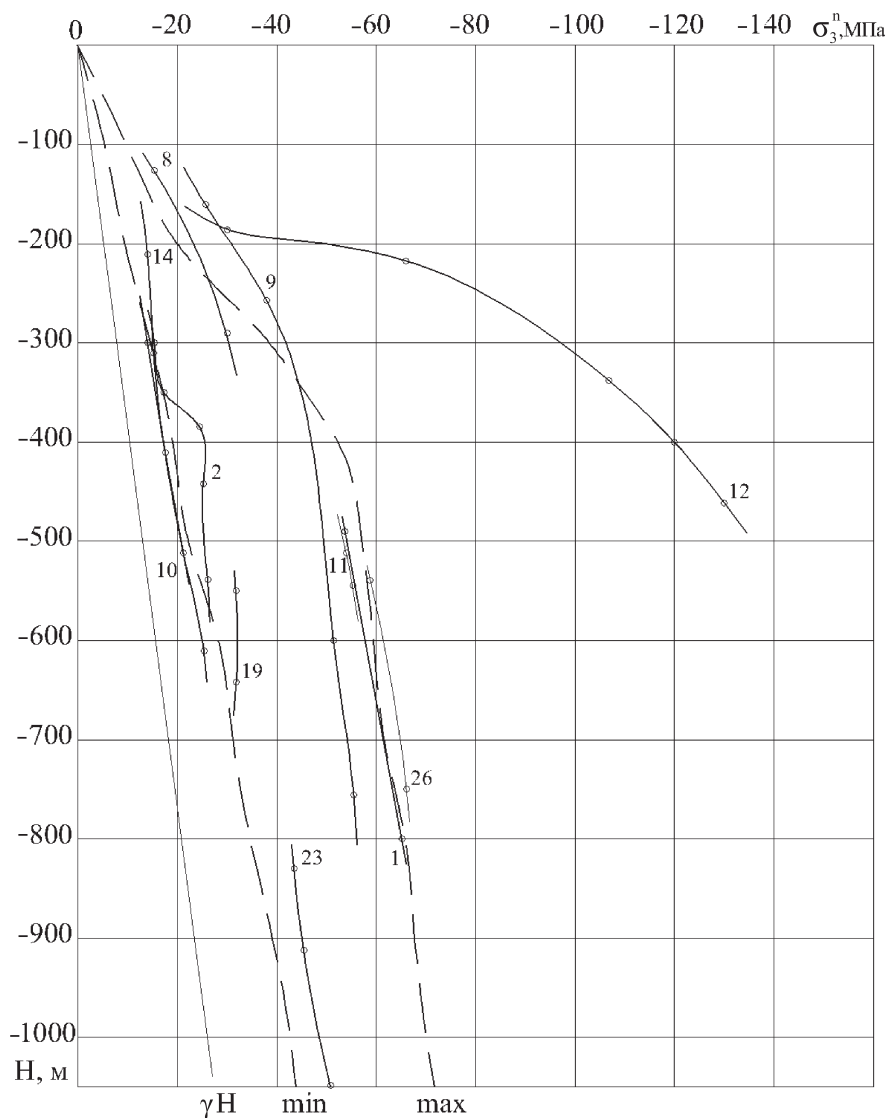


Рис. 6. Изменение максимальных горизонтальных напряжений по глубине

Такая ситуация наблюдается на месторождениях, где угол падения рудных тел составляет 30–40°. Причина такого явления пока не установлена.

Из графиков изменения с глубиной σ_1^n и σ_3^n видно, что у поверхности, в зоне выветривания они близки к нулю. С глубины –50 м начинается их резкий рост за счет нелинейного возрастания тектонической составляющей $\sigma_{1m} + \Delta\sigma_{1m}$ и $\sigma_{3m} + \Delta\sigma_{3m}$, которая на глубине –(400÷500) м достигает максимума, а глубже является постоянной, что отмечается другими авторами [5].

Объяснить эту закономерность можно следующей гипотезой. На начальной стадии формирования массива горных пород происходит его ранжация на структурные блоки по линиям Людерса, без относительной подвижки, когда из удерживающих сил присутствует только сцепление C . В дальнейшем при образовании магистральных трещин удерживающие силы зависят от сцепления C и уг-

ла внутреннего трения φ . Их параметры определяются длительностью действия в сотни и тысячи лет. Окончательное формирование гравитационно-тектонических напряжений определяется равновесием на магистральных нарушениях срезающих сил при действии вертикальных и горизонтальных напряжений и удерживающих сил, зависящих от соотношения вертикальных и горизонтальных напряжений и угла трения при нулевом сцеплении.

По теории прочности:

$$\frac{\sigma_3^n - \sigma_z^n}{2} \sin 2\alpha > C + \operatorname{tg} \varphi (\sigma_3^n \sin^2 \alpha + \sigma_z^n \cos^2 \alpha) \quad (3)$$

где левая часть неравенства – срезающие, а правая – удерживающие усилия, C – сцепление пород, МПа; φ – угол трения пород, град; α – угол между плоскостью нарушения и направлением действия σ_3^n , град; σ_3^n – максимальное сжимающее горизонтальное главное напряжение (учитывающее пульсацию), МПа; σ_z^n – максимальное верти-

кальное главное напряжение (учитывающее пульсацию), МПа.

На первичном этапе массив разделяется на блоки различных рангов, но никаких подвижек между блоками еще нет. Это происходит в соответствии с зависимостью:

$$\frac{\sigma_3^n - \sigma_z^n}{2} \sin 2\alpha > C; \quad (4)$$

После объединения мелких трещин в крупные, магистральные, срез отдельных участков завершен, начинается подвижка в соответствии с зависимостью:

$$\frac{\sigma_3^n - \sigma_z^n}{2} \sin 2\alpha > C + \operatorname{tg} \varphi (\sigma_3^n \sin^2 \alpha + \sigma_z^n \cos^2 \alpha); \quad (5)$$

Проанализировав графики изменения максимальных и минимальных тектонических горизонтальных напряжений по глубине, представленные на рис. 5 и 6, можно сделать выводы:

– σ_3^n и σ_1^n резко растут до глубины $-(400 \div 500)$ м, после чего выходят в параллель гравитационным напряжениям;

– σ_{3m} и σ_{1m} с глубины $-(400 \div 500)$ м становятся постоянными, а как следствие стабилизируются и σ_z^n .

Следует иметь в виду, что формирование напряженного состояния массива горных пород происходит в течении столетий или тысячелетий. Поэтому константы C и φ должны характеризовать длительную прочность пород за эти отрезки времени. Приравняв же правую часть уравнения (5) (удерживающие усилия) левой (срезающие усилия) можно найти φ на различных глубинах месторождений Урала. На рис. 7 можно проследить две крайние идеализированные закономерности изменения σ_3^n с глубиной – минимальные и максимальные (без Естюнинского месторождения) и в сравнении их с γH по зависимости (6) найти изменение φ с глубиной (табл. 3). Принимая $\sigma_3^n = \gamma H + \sigma_{3m} + \Delta\sigma_{3m}$ и $\sigma_z^n = \gamma H$ (для большинства рудников Урала) получим:

$$\frac{\sigma_{3m} + \Delta\sigma_{3m} + \gamma H - \gamma H}{2} \sin 2\alpha >$$

$$> \operatorname{tg} \varphi [(\sigma_{3m} + \Delta\sigma_{3m} + \gamma H) \sin^2 \alpha + \gamma H \cos^2 \alpha];$$

откуда

$$\frac{\sigma_{3m} + \Delta\sigma_{3m}}{2} \sin 2\alpha > \operatorname{tg} \varphi [(\sigma_{3m} + \Delta\sigma_{3m}) \sin^2 \alpha + \gamma H]; \quad (6)$$

Анализ зависимости (6) и табл. 3 показывает, что угол трения пород φ имеет смысл находить на глубине до -500 м, т.к. эта глубина является экстремумом. При расчете на глубинах ниже -500 м создается запас прочности в удерживающих усилиях. Этим и объясняется стабилизация тектонической составляющей на глубинах более -500 м.

В сравнении с горнодобывающими регионами мира средние горизонтальные напряжения занимают на Урале по величине второе место:

– Скандинавия (12 рудников) [9]

$$(\sigma_3^n - \sigma_1^n) \times 0.5 = -9.3 + 0.05H;$$

– Урал (25 рудников)

$$(\sigma_3^n - \sigma_1^n) \times 0.5 = -12.7 + 0.03H - \text{с учетом максимальных пульсирующих напряжений};$$

Таблица 3. Результаты определения φ на месторождениях Урала

H, м	γH , МПа	Минимальные		Максимальные	
		$\sigma_{3m} + \Delta\sigma_{3m}$, МПа	φ , град	$\sigma_{3m} + \Delta\sigma_{3m}$, МПа	φ , град
-100	-3.0	-8	26.0	-4	8.0
-200	-6.0	-20	30.0	-9	12.0
-300	-9.0	-38	34.0	-15	14.4
-400	-12.0	-48	33.5	-20	14.4
-500	-15.0	-55	32.0	-25	14.5
-600	-18.0	-60	30.7	-30	14.0
-700	-21.0	-63	28.6	-33	12.8
-1000	-30.0	-73	24.0	-43	10.2

$(\sigma_3^n - \sigma_1^n) \times 0.5 = -8.5 + 0.03H$ – средние значения;

– Канада (6 рудников) [9]

$$(\sigma_3^n - \sigma_1^n) \times 0.5 = -8.2 + 0.042H;$$

– США (16 рудников) [9]

$$(\sigma_3^n - \sigma_1^n) \times 0.5 = -4.9 + 0.02H;$$

– Австралии (18 рудников) [9]

$$(\sigma_3^n - \sigma_1^n) \times 0.5 = -7.26 + 0.022H;$$

– Южная Африка (14 рудников) [9]

$$(\sigma_3^n - \sigma_1^n) \times 0.5 = -7 + 0.01H;$$

– Япония (31 рудник [10])

$$(\sigma_3^n - \sigma_1^n) \times 0.5 = -0 + 0.03H.$$

Основные выводы:

1. Анализ полученных результатов показывает, что природные напряжения в земной коре формируются с учетом гравитационных напряжений (равных весу пород γH), статических тектонических напряжений σ_m и пульсирующих напряжений $\Delta\sigma_m$.

2. Статические тектонические напряжения увеличиваются в пределах глубин от 0 до $-(400 \div 500)$ м от нуля до постоянной величины, а ниже остаются неизменными.

3. Статические тектонические напряжения σ_m в конкретных геологических условиях зависят от величины угла внутреннего трения пород, характеризующего их длительную прочность, и составляющего $14-34^\circ$.

4. В массивах магматических и метаморфических пород Северного, Среднего и Южного Урала на протяжении 900 км в пределах глубин $-(300 \div 900)$ м $\Delta\sigma_m$ составляет $6-25$ МПа, т.е. $20-30\%$ от гравитационно-тектонических напряжений, и им соответствует относительная деформация массива равная $(1.0-3.8) \times 10^{-4}$. Изменение горизонтальных напряжений в ортогональных направлениях одинаково. Следовательно, деформация массива на Урале за счет $\Delta\sigma_m$ по всем азимутам одинакова, т.е. Урал с началом цикла СА равномерно расширяется, а с его середины равномерно сжимается в среднем на величину $\varepsilon = 1.9 \times 10^{-4}$.

5. На полигоне под г. Верхняя Пышма деформация массива близка к нулю, т.е. она подобна “неизменной” длине базовых линий, по которым корректируются орбиты спутников GPS, где параметры и форма геоида приняты постоянными.

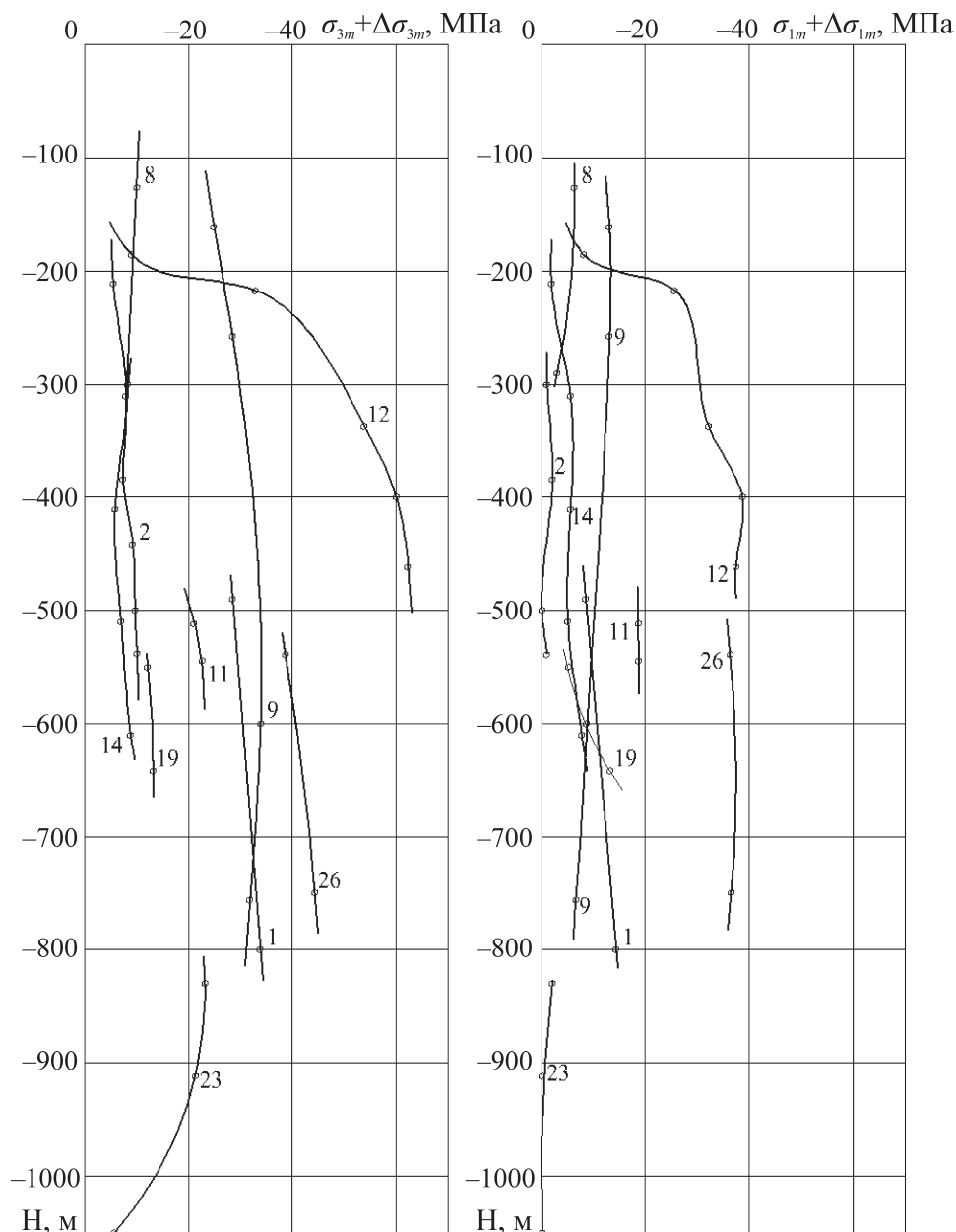


Рис. 7. Изменение гравитационно-тектонических составляющих главных горизонтальных напряжений по глубине.

Следовательно, можно предположить, что полигон на Урале под г. Верхняя Пышма и базовые линии GPS, располагающиеся в различных регионах Земли, считающиеся так же “неизменными” по длине, деформируются с относительной деформацией $\varepsilon = 1.9 \times 10^{-4}$. В этом случае за период цикла СА незамеченными остаются расширение и сжатие Земного шара по диаметру на 2.4 км.

Если в геодинамически малоактивном регионе, которым является Урал, средняя величина $\Delta\sigma_T = 10$ МПа, а в тектонически активных регионах они могут быть больше, то, по-видимому они являются главным спусковым механизмом катастрофических землетрясений и горных ударов, которые

приурочены к стыку бициклов. Очередной максимум геодинамической активности следует ожидать через 5–6 лет после наблюдаемого в 2009 г. минимума СА, т.е. к середине 24-го и 25-го циклов, в период с 2014 по 2021 гг.

Работа выполнена при финансовой поддержке Президиума РАН по программе № 16 часть 3.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Влох Н.П. Управление горным давлением на подземных рудниках. М.: Недра, 1994. 208 с.
2. Влох Н.П., Зубков А.В., Феклистов Ю.Г. Совершенствование метода шелевой разгрузки // Диагностика

- напряженного состояния породных массивов. Новосибирск: ИГД СО АН СССР, 1983. С. 30–35.
3. Влох Н.П., Зубков А.В., Феклистов Ю.Г. Метод частичной разгрузки на большой базе // Диагностика напряженного состояния породных массивов. Новосибирск: ИГД СО АН СССР, 1983. С. 37–42.
 4. Зубков А.В. Геомеханика и геотехнология. Екатеринбург: УрО РАН, 2001. 335 с.
 5. Тагильцев С.Н. Развитие представлений о структуре и генезисе зоны приповерхностной трещиноватости в скальных породах // Изв. УГГА. Сер. геол. и геофиз. 2001. № 13. С. 212–217.
 6. Турчанинов И.А., Макаров Г.А., Иванов В.И., Козырев А.А. Тектонические напряжения в земной коре и устойчивость горных выработок. Л.: Наука, 1978. 256 с.
 7. Ривин Ю.Р. Циклы Земли и Солнца. М.: Наука, 1989. 165 с.
 8. Яковлев Д.В., Тарасов Б.Г. О взаимосвязи геодинамических событий в шахтах и рудниках с циклами солнечной активности // Геодинамика и напряженное состояние недр Земли. Тр. междунар. конф. Новосибирск: ИГД СО РАН, 2001. С. 56–65.
 9. Brown E.T., Hoek E. Trends in relations between measured in situ stresses with depth // Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. 1978. V. 15, № 4. P. 211–215.
 10. Sugawara K. Measuring rock stress and rock engineering in Japan // Proceedings Int. symp. Rock stress, Kumamoto. Rotterdam: Balkema. 1997. P. 15–24.

Рецензенты: А.А. Барях и С.Н. Тагильцев

Regularities of formation stressed-deformed state of the Urals Earth's crust in time duration

A. V. Zubkov*, O. V. Zoteev*, O. Y. Smirnov*, Y. I. Lipin*, S. V. Hudyakov*,
R. V. Krinitsyn*, K. V. Selin*, A. A. Ershov*, L. R. Valiylov**

*Institute of Mining, Ural Branch of RAS

**Institute Uralgiproruda

Regularities of gravitation-tectonic stresses formation in the Urals Earth's crust which based on the results of their values measurements in 25 underground mines of the North, Central and South Urals are shown in the article. Tectonic stresses pulsation with the period of 10–11 years, corresponding to solar activity cycle and medium amplitude of 10 MPa, is revealed. The latter must carry to the Earth's diameter change by 2.4 km. Non-linear variation of tectonic stresses with depth is determined. Stresses relaxation within the depth limits from 0 to –500 meters with regard to strength duration of rock mass is one of the above-mentioned phenomenon's hypotheses being brought forward.

Key words: *tectonic stresses, deformation, Earth's crust, stresses pulsation.*