

СОВРЕМЕННЫЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ О НАПРЯЖЕННОМ СОСТОЯНИИ ГОРНОГО МАССИВА

Излагаются представления о напряженном состоянии горного массива с учетом наличия активных ротационных и тектонических сил и неоднородности свойств горных пород.

До 70-х годов XX века существовало две точки зрения на напряженное состояние горного массива. Одна из них [1,2] предполагала гидростатическое, вернее геостатическое, распределение напряжений, обусловленное весом вышележащих пород $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3 = \gamma H$. Поле напряжений предполагалось однородным (без аномалий), все местные концентрации считались исчезнувшими в процессе релаксации в течение длительного существования осадочной толщи пород. Согласно другой точки зрения [3], распределение напряжений в горном массиве является негидростатическим. Вертикальная составляющая равна весу вышележащих пород (γH), а горизонтальные составляющие равны между собой, являются реактивными и формируются за счет бокового распора ($\lambda \gamma H$). Здесь $\lambda = \nu / (1 - \nu)$ – коэффициент бокового распора, ν – коэффициент поперечной деформации пород. В этом случае поле напряжений также считалось равновесным и однородным. Однако, большой комплекс измерений напряженного состояния горных пород нетронутого массива, проведенный в рамках научно-технического сотрудничества стран – членов СЭВ в 1960-1980г.г.[4-6], показал, что фактические напряжения в массиве не соответствуют указанным выше представлениям. Вертикальная компонента напряжений оказалась в 1,1...3,7 раза выше геостатической, а горизонтальная – в 3,1-19 раз. Причиной такого несоответствия считали действие тектонических напряжений [7], внутренние напряжения набухания в газонасыщенных породах [8], неоднородность физических свойств горных пород [9-11] и др. Дальнейшие исследования показали, что, действительно, в областях размером 100...2000 км действуют устойчивые региональные тектонические напряжения в горизонтальном направлении, величина которых для Донбасса не превышает 10-12 МПа [12-14]. В то же время замеренные напряжения подвержены значительным колебаниям на небольших участках и достигают 100 МПа и более [15,16]. Кроме того, однозначно установлено, что поле напряжений является неравнокомпонентным.

Отклонение напряженного состояния от геостатического свидетельствует о действии в земной коре касательных напряжений. Таким образом, большие величины напряжений и их изменчивость требуют объяснения и расчетов. В настоящее время считается, что тектонические напряжения рассчитать невозможно, поскольку о природе их мало что известно. Поэтому, прежде всего, требует объяснения наличие, как в вертикальном, так и в горизонтальном субширотном и субмеридиональном направлении активных сил и выяснения их природы.

Наша спиральная галактика Млечный Путь имеет вид левостороннего вихря (коловрата) с четырьмя рукавами. Солнце является восьмой звездой созвездия Малая Медведица, находится между двумя рукавами Галактики примерно в середине галактического диска, расстояние от Солнца до центра Галактики порядка 3×10^{20} м. Значение скорости орбитального движения Солнечной системы вокруг центра Галактики (как и других звездных систем нашей Галактики) около 250 км/с. Период нашего обращения вокруг центра Галактики (нормальный галактический год) - 215 млн. лет (5 полупериодов драконического цикла) или 172 млн. лет (аномалистический галактический год - 4 полупериода драконического цикла). Траектория движения солнечной системы осложняется периодическими колебаниями относительно экваториальной плоскости

Галактики. Драконический цикл 86 млн. лет – это полный период колебания солнечной системы относительно экваториальной плоскости Галактики. В геологической истории Земли все вышеуказанные циклы очень хорошо отражены. Обратив внимание на геохронологическую таблицу, обнаруживаем, что ордовик, силур, пермь, триас и палеоген имеют продолжительность 43 млн. лет (половина драконического периода), кембрий, венд – по 86 млн. лет (целый драконический цикл), девон плюс карбон, а также юра плюс мел содержат по три полуцикла. Правильнее раннюю и среднюю юру объединить в один период, позднюю юру и ранний мел – в другой, а поздний мел выделить в третий. Мезозойская эра, ранний и поздний палеозой имеют продолжительность по 172 млн. лет и т.д. С указанными временными интервалами связана активизация тектонических движений и магматизма, однако оценка влияния общегалактических процессов на напряженное состояние земной коры затруднена.

Земля вращается вокруг Солнца, а Луна вокруг Земли примерно по такой же траектории - то удаляясь, то приближаясь к центру масс. При приближении к Солнцу орбитальная скорость возрастает, при удалении уменьшается. Двойная система Земля-Луна движется вокруг Солнца со средней скоростью 29,8 км/с. Эксцентриситет орбиты меняется с периодом 10^5 лет, а плоскость орбиты поворачивается около некой средней плоскости, а эта средняя плоскость поворачивается с характерным временем 2×10^8 лет. Но Земля, кроме того, вращается еще и вокруг собственной оси.

Средний радиус Земли 6370 км, масса $5,98 \times 10^{24}$ кг, угловая скорость – $7,29 \times 10^{-5} \text{ с}^{-1}$. Ось вращения направлена к созвездию Малая Медведица в точку недалеко от Полярной звезды. Угол между осью вращения земли и направлением на полюс эклиптики составляет $23^{\circ}27'$. Под действием Луны, Солнца и планет солнечной системы момент вращения Земли поворачивается и медленно вращается вокруг полюса эклиптики, поэтому ось вращения прецессирует (описывает конус) с периодом 25780 лет и угловой скоростью $7,72 \times 10^{-12} \text{ с}^{-1}$.

Если учесть, что планета Земля вращается вокруг оси с угловой скоростью ω , то, как показано на рис.1, возникает центробежная сила инерции, радиальная составляющая которой приводит к уменьшению веса тела с уменьшением географической широты, а касательная составляющая, действующая от полюса к экватору, вызывает перемещения в меридиональном направлении. Эту силу называют полюсобежной силой Этвеша, которая уравнивается силой трения в породах. Активные касательные (горизонтальные) напряжения, обусловленные полюсобежной силой, направленной от полюса к экватору, равны:

$$\tau_{et} = \frac{1}{4} \rho \omega^2 H^2 \sin 2\beta,$$

где ρ – средняя плотность пород, кг/м^3 ; $\rho = 2500 \text{ кг/м}^3$;

ω – угловая скорость вращения Земли, $\omega = 7,29 \times 10^{-5} \text{ с}^{-1}$;

H – глубина ведения работ, м ;

β – широта местности, град., для Донбасса $\beta = 48^{\circ}$.

Оценки для глубины 1000 м показывают, что величина этих напряжений составляет всего 13-15 Па, что намного меньше вертикальной составляющей поля напряжений от веса вышележащих пород, поэтому ею обычно пренебрегают, однако, как будет показано ниже, делать этого не стоит.

Если структурные элементы горного массива под действием каких-либо сил движутся от полюса к экватору, то за счет вращения Земли действует также вторая сила инерции, направленная перпендикулярно скорости движения, которую называют силой Кориолиса. В северном полушарии она направлена вправо по ходу движения (в широтном направлении с востока на запад).

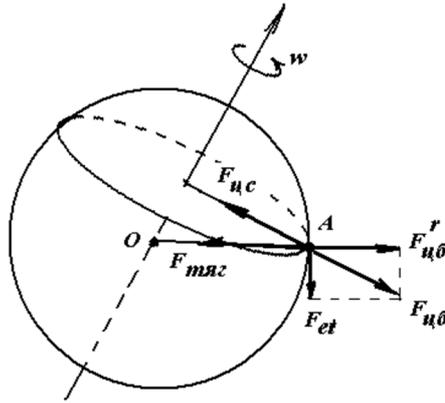


Рисунок 1 – Разложение центробежной силы инерции, направленной по радиусу перпендикулярно оси вращения Земли, на составляющие:

$F_{цб}^r$ - составляющая, действующая по радиусу от центра тяжести Земли и уменьшающая силу тяготения;

$F_{ет}$ - составляющая, действующая по касательной к поверхности Земли – полюсобежная сила Этвеша.

Активные касательные (горизонтальные) напряжения τ , обусловленные силой Кориолиса, направленной в широтном направлении, равны:

$$\tau_k = 2\rho\omega H v \sin \beta,$$

где v – скорость движения частиц породы, м/с.

При малых скоростях движения $v = 10^{-8} \dots 10^{-9}$ м/с, на глубине 1000 м напряжения имеют порядок $\tau_k = 10^{-5} \dots 10^{-6}$ Па, поэтому влияние силы Кориолиса заметно только при длительном воздействии. В процессе же геодинамических явлений типа внезапных выбросов, горных ударов, когда скорость смещений достигает скорости звука в среде, напряжения достигают нескольких мегапаскаль, и влияние сил Кориолиса становится весьма заметным, проявляясь в виде образования вихревых структур.

В качестве активных тектонических сил могут выступать также силы объемного расширения или сжатия при структурно-фазовых переходах в недрах Земли, силы Архимеда и Кориолиса, действующие на восходящие потоки вещества в мантии и приводящие к гравитационной конвекции при сколь угодно малом сверхадиабатическом перепаде плотности, ротационные силы из-за скачкообразного изменения скорости вращения Земли. Долготная нормальная составляющая поля тектонических напряжений в литосфере в этом случае определяется в виде:

$$\sigma_M = \frac{4\eta_a r_a^2}{H_a H_l r_e} \left[\int_0^v v_a dv - \frac{1}{\pi} \int_0^\pi \int_0^v v_a dv d\beta \right],$$

а широтная составляющая

$$\sigma_{ш} = \sigma_M \cos \beta,$$

где η_a – вязкость астеносферы, $\eta_a = 0,5 \times 10^{20}$ Пас;

r_a – радиус астеносферы, $r_a = 6000$ км;

r_l – радиус земной коры, $r_l = 6300$ км;

H_a – толщина астеносферы, $H_a = 280$ км;

H_l – толщина земной коры, $H_l = 70$ км;

v_a – скорость горизонтального течения астеносферы, $v_a = 0,4 \dots 0,7$ м/год.

Оценка показывает, что максимальная величина напряжений как в меридиональном, так и широтном направлении может достигать 50 МПа.

Наиболее заметным следствием близкого соседства Луны являются лунные приливы. Каждые 12 часов 26 минут уровень земной поверхности поднимается на 0,36 м. Приливные горбы движутся по поверхности Земли со скоростью 290 м/с, вызывая возникновение как вертикальных, так и горизонтальных приливных напряжений. Приливы на Земле вызываются также Солнцем. Высота солнечного прилива составляет

0,16 м. Когда приливные эффекты Солнца и Луны складываются (сизигийные приливы) частота газодинамических явлений на угольных шахтах возрастает в 10 раз и более [17]. В результате приливного трения Земля замедляет свое суточное вращение. 500-600 млн. лет назад год на Земле продолжался 420-425 суток, 180 млн. лет назад – 385 суток.

Деформационную приливную волну можно представить в виде:

$$\Delta r = B \cos 2\theta,$$

где B - амплитуда приливных колебаний, $B = 0,45\text{ м}$;

θ – задержка (отставание) деформационной волны от гравитационного возмущения Луной по долготе, $\theta = 2 \dots 7^\circ$.

Вертикальная составляющая приливной силы

$$F_z = 3G \frac{mr}{R^3} (\cos^2 z - 1/3);$$

Горизонтальная составляющая приливной силы

$$F_x = \frac{3}{2} G \frac{mr}{R^3} \sin 2z;$$

где G – гравитационная постоянная;

m – масса Луны, кг;

r – расстояния от центра Земли до точки определения силы, м;

R – расстояние от Земли до Луны, м;

Z – зенитное расстояние Луны, град.

Сдвиговые напряжения в приливной волне

$$\tau_{np} = 2\rho H_t \Delta g;$$

где Δg – изменение ускорения свободного падения, $\Delta g = 10^{-6} \text{ м/с}^2$.

Величина напряжений в земной коре, создаваемых приливной волной составляет примерно $3 \times 10^4 \text{ Па}$ [18]. Скорость перемещения блоков земной коры при этом может достигать $2 \times 10^{-4} \text{ м/с}$.

Кроме того, Земля как физический объект представляет собой автоколебательную систему. Собственные колебания Земли делятся на два класса: крутильные или тороидальные колебания, вектор смещения которых перпендикулярны радиусу Земли, и сфероидальные колебания, вектор смещения которых имеет составляющие и по радиусу, и по азимутальным направлениям. Собственные колебания являются стоячими волнами. При этом крутильные колебания являются результатом интерференции двух бегущих волн Лява равной амплитуды, а сфероидальные – волн Рэлея.

К основным следствиям колебаний в геосферах относятся вибромеханические, виброреологические и вибромеханохимические эффекты: преобразование сухого трения в вязком; направленный массоперенос; резонанс; автоколебания; тиксотропность; механохимическая активация физических и химических процессов и др.

Частота собственных колебаний (резонансная частота) Земли в целом, отдельных геосфер и слоев может быть определена из зависимости [19]:

$$f_0 = V_{sh} / h;$$

где V_{sh} - скорость поперечных волн, $V_{sh} = 2500 \text{ м/с}$;

h – характерный размер объекта, м.

Для Земли в целом расчетная собственная частота колебаний составляет $2 \times 10^{-4} \text{ Гц}$, а период 85 мин, для поверхностных слоев пород – $1,4 \times 10^{-4} \text{ Гц}$ ($T=2$ часа), собственная частота слоя мощностью 1 м – $2,5 \text{ кГц}$. Наблюдаемые резонансные частоты верхних слоев земной коры $0,716 \times 10^{-4}$ и $1,64 \times 10^{-4} \text{ Гц}$.

Каждый слой породы является монохроматором. Эффект монохроматора состоит в том, что в слое толщиной h укладывается целое число полуволн:

$$h = n\lambda/2 = nV_{mh}/2f_{mh};$$

где $n = 1, 2, 3 \dots$ - любое целое число;

λ – длина волны, м;

V_{mh} – скорость волн поперек слоя, м/с;

f_{mh} – частота монохроматора, Гц.

Эффект резонанса (АРП) – это момент совпадения собственной частоты колебательной системы с частотой внешнего воздействия. Эффект АРП и эффект монохроматора наблюдается в режиме стоячих волн, потому что скорость поперечных волн это фазовая скорость. Амплитуда колебаний планетарных пульсаций вследствие резонансных явлений может достигать $\Delta l_{\max} = 10$ см. Напряжения в горных породах при распространении колебаний составляют [20]:

$$\tau = \rho \omega V_{sh} \Delta l_{\max} \cos(\omega t + y_2);$$

где $\omega = 2\pi f_0$ – угловая частота колебаний;

При резонансных явлениях напряжения могут достигать десятков и сотен мегапаскаль.

Таким образом, вследствие воздействия гравитационных, приливных, ротационных и тектонических сил в горном массиве распространяются деформационные волны различных частот и амплитуд. При отражении волн от границ раздела слоев и структурных блоков, вследствие интерференции и резонансных явлений возникают значительные концентрации деформации и напряжений, приуроченных к этим границам.

В статической постановке, как показано в [21], коэффициент концентрации вертикальных напряжений на границе слоев составляет:

$$k_b = 1 + 2 \frac{m^2}{b^2} \left(1 - \frac{E}{E_*}\right);$$

Коэффициент концентрации горизонтальных напряжений:

$$k_r = 1 + \frac{m^2 + b^2}{b^2} \left(1 - \frac{E v_*}{E_* v}\right);$$

где m – мощность слоя, м;

b – размер структурного блока по простиранию или падению, $b = (3-4)m$;

E и E_* – модули упругости соответственно менее жесткого и более жесткого слоев, МПа;

v и v_* – коэффициенты поперечной деформации этих слоев.

Учитывая, что и в вертикальном, и в широтном, и в меридиональном направлении действуют активные силы и силы бокового распора, компоненты объемного поля напряжений в горном массиве можно записать в виде:

$$\begin{aligned} \sigma_b &= k_b \gamma H + \lambda k_r (\sigma_r + \sigma_{et}); \\ \sigma_{sh} &= k_r \sigma_r + \lambda (k_b \gamma H + k_r \sigma_{et}); \\ \sigma_m &= k_r \sigma_{et} + \lambda (k_b \gamma H + k_r \sigma_r); \end{aligned}$$

Здесь под тектоническими силами, действующими в широтном направлении, понимается совокупность собственно тектонических сил, ротационных сил (сил Кориолиса) и приливных сил. Их суммарная величина для Донбасса оценивается около 10 МПа. В меридиональном направлении основной активной силой является полюсобежная сила Этвеша, величина которой составляет 10^{-4} МПа.

Максимальный коэффициент концентрации вертикальных напряжений при отличии модулей упругости на порядок (граница раздела уголь-песчаник) составляет $k_b = 1,2$; горизонтальных напряжений - $k_r = 11$.

Подставляя принятые исходные данные, оцениваем величину расчетных напряжений и сравниваем их с замеряемыми на шахте им. А.А. Скочинского (табл.1).

Таблица 1-
Данные расчета и замера компонент поля напряжений

Глубина работ, м	Расчетные по гипотезе Динника	Расчетные по предлагаемой методике	Замеряемые напряжения
------------------	-------------------------------	------------------------------------	-----------------------

	σ_v , МПа	σ_r , МПа	σ_v , МПа	$\sigma_{ш}$, МПа	σ_m , МПа	σ_v , МПа	σ_r , МПа
905	22,6	4,9...5,7	55	117	34	28...78	31,5...97

Данные, приведенные в таблице, свидетельствуют о том, что средняя замерянная величина вертикальных напряжений практически совпадает с расчетной, замерянные минимальные горизонтальные напряжения хорошо согласуются с расчетной меридиональной составляющей, а максимальные – с широтной.

Выводы.

В горном массиве, помимо гравитационных сил, действует целый ряд активных сил преимущественно в широтном направлении, обусловленных силами Кориолиса, приливными силами, силами объемного расширения восходящих потоков и др., которые обуславливают субширотную тектоническую составляющую поля напряжений. В меридиональном направлении действуют в основном реактивные силы бокового распора и полюсобежная сила Этвеша.

Из-за концентрации напряжений за счет неоднородности свойств пород на границе слоев и вблизи нее возникают значительные концентрации горизонтальных напряжений. В результате этого в нетронутом массиве максимальной является субширотная компонента поля напряжений, промежуточной – вертикальная, а минимальной – меридиональная. Расчеты компонент поля напряжений с учетом действия тектонических сил и неоднородности свойств пород хорошо согласуются с данными замеров напряжений.

Литература:

1. Либерман Ю.М. Естественное напряженное состояние массива горных пород. // Вопр. прочности подземных сооружений: Тр. ВНИИСТ, 1962.- Вып.12.- С.15-18.
2. Талобр Ж. Механика горных пород. -М.: Госгортехиздат, 1960.- 430с.
3. Динник А.Н. О давлении горных пород и расчете крепи вертикальной шахты. //Инт. работник.- 1925.- №7.- С.15-18.
4. Измерение напряжений в массиве горных пород. -Новосибирск: Наука, 1970.- 243с.
5. Техника контроля напряжений и деформаций в горных породах. Л.: Наука, 1978.- 232с.
6. Напряженное состояние земной коры.- М.: Наука, 1973.- 186с.
7. Вередя В.С. Современные тектонические напряжения как одно из условий выбросоопасности угольных пластов. //Уголь, 1978.- №7.- С.17-19.
8. Большинский М.И., Маевский В.С. Исследование влияния газонасыщения на напряженно-деформированное состояние угля. //Вопр. вентиляции и борьбы с газом и внезапными выбросами в угольных шахтах: Научн.сообщ. ИГД им. А.А.Скочинского, 1977.-Вып.157.- С.79-83.
9. Иванов В.И., Турчанинов И.А. Концентрация напряжений на забое скважины в условиях объемного сжатия. -Новосибирск: ИГД СО АН СССР, 1970.- С.26-35.
10. Забигаило В.Е., Белый И.С. Геологические факторы разрушения керна при бурении напряженных пород Донбасса.- Киев: Наук. Думка, 1981.- 180с.
11. Гзовский М.В. Тектонофизическая оценка напряжений в земной коре. //Докл. Всес. конф. по механике горн. пород.- Апатиты: изд-во КФ АН СССР, 1970.- С.3-36.
12. Гзовский М.В. Тектонофизические представления о напряженном состоянии земной коры. //Соврем. проблемы механики горных пород.- Л.: Наука, 1972.-335 с.
13. Короновский Н.В. Напряженное состояние земной коры. Соросовский образовательный журнал, 1997, №1.- С.50-56.
14. Шерман С.И., Днепровский Ю.И. Поля напряжений земной коры и геолого-структурные методы их изучения. – Новосибирск: Наука, 1989.- 148с.
15. Исследование напряжений в выбросоопасных породах глубоких шахт Донбасса /А.И. Кульбачный, Н.Е. Волошин, И.В. Недашковский и др.- Шахтное строительство, 1967.- №8.- С.8-11.

16. Кропоткин П.Н. Тектонические напряжения в земной коре. //Геотектоника, 1996.- №2.- С.3-5.
17. Сурдин В.Г. Пятая сила.- М.: изд.МЦНМО, 2002.- 39с.
18. Володичев Н.Н., Нечаев О.Ю., Сигаева Е.А. и др. Измерения потока тепловых нейтронов вторичного космического излучения вблизи поверхности Земли при прохождении через данную местность приливной гравитационной волны или сейсмической волны. М.: МГУ, 2010.- С.144-154.
19. Гликман А.Г. Планета Земля как совокупность колебательных систем и техногенные и природные землетрясения как следствие их. Санкт-Петербург, НТФ «Геофизика», 2010.- 16с.
20. Рязанцев Н.А., Носач О.К. Физика горных пород и процессов в вопросах и ответах. Красноармейск, КФ ДонГТУ, 1999.- 174 с.
21. Шамонин В.А. Концентрации напряжений на границах рудных зерен и во вмещающей среде при взрывном нагружении. //Разработка и обогащение твердых полезных ископаемых.- М.: Недра, 1981.- С.108-113.