



УДК 551.24.03

ИЗБЫТОЧНЫЕ ГОРИЗОНТАЛЬНЫЕ НАПРЯЖЕНИЯ СЖАТИЯ В ВЕРХНЕЙ КОРЕ КОНТИНЕНТОВ: КЛИМАТИЧЕСКАЯ ПРИЧИНА ВОЗНИКНОВЕНИЯ

С.Я. Сергин, С.В. Сергеев

*Белгородский государственный
национальный исследовательский
университет, Россия, 308015,
г. Белгород, ул. Победы 85*

*E-mail: sergin@bsu.edu.ru;
sergeev@bsu.edu.ru*

Переход от последней ледниковой эпохи к современному межледниковью привёл к повышению температуры горных пород верхней коры материков и тепловому их расширению. При этом возникли горизонтальные термомеханические напряжения сжатия. Согласно нашему анализу, они являются главной составляющей современных тектонических стрессов в приповерхностных толщах пород континентальной коры.

Ключевые слова: верхняя кора, термомеханические напряжения, тектонические стрессы, послеледниковое потепление климата, климат и тектоника.

В горной геомеханике и геотектонике давно известен факт, который представляет научный и практический интерес, но не получил приемлемого объяснения: верхние горизонты земной коры континентов подвержены избыточным горизонтальным напряжениям сжатия. Эти напряжения характерны для массивов горных пород с отчётливо выраженными упругими свойствами. Они избыточны в сравнении с напряжениями бокового распора от вертикального давления горных пород. Тем самым их происхождение связано не с гравитационными, а с тектоническими силами. Однако, вопрос о природе тектонических сил остаётся открытым.

В качестве источников этих сил различные авторы рассматривают тяготение Солнца и планет, вращение Земли, уменьшение её объёма, перемещение литосферных плит, рельеф земной поверхности, внутреннюю трансформацию пород в верхней коре. Среди имеющихся предположений некоторым предпочтением пользуются идеи тектоники литосферных плит, но и они подвергаются критике. В данной статье, не вступая в дискуссию по имеющимся мнениям, мы рассмотрим роль глобального фактора, который до сих пор не принимался во внимание: повышение температуры горных пород и термическое их расширение вследствие потепления климата Земли в послеледниковую эпоху. Задача заключается в следующем: 1) теоретически оценить климатически обусловленные термические напряжения сжатия в верхней коре континентов и 2) сопоставить рассчитанные значения с экспериментальными данными об избыточных напряжениях.

По палеогеографическим данным, в интервале 20–10 тыс. лет до настоящего времени произошёл переход от ледниковой эпохи к межледниковой (послеледниковой) эпохе. Средняя глобальная температура земной поверхности при этом повысилась, по разным оценкам, на 5–10°C [1]. Потепление климата сильнее проявилось в северном полушарии, где растаяли наиболее крупные ледниковые покровы. На обоих полушариях потепление было значительней в высоких и средних широтах, чем в низких, и на материках больше, чем на океанах. В средних широтах северного полушария температура на материках повысилась на 10–15°C. Примерно в тех же пределах она повысилась в Антарктиде [2].

Климатические события последних 20 тыс. лет были частью колебаний климата и оледенения Земли в ходе четвертичного периода [1, 3]. На его протяжении имели место гляцио-климатические циклы продолжительностью около 100 тыс. лет и 20–40 тыс. лет. Интересующий нас последний цикл характеризовался прерывистым понижением глобальной температуры в эпоху примерно от 100 до 20 тыс. лет назад; быстрым её повышением в интервале 20–10 тыс. лет; небольшими её колебаниями в последующую (историческую) эпоху. Исторические колебания климата (в последние 10 тыс. лет) имели периоды около 2 тыс. лет, 100–400 лет, 20–60 лет, 2–5 лет. Характерная их амплитуда не превышала 1°C [4].

Колебания температуры, происходящие на земной поверхности, проникают в толщу горных пород. Расчёт изменений глубинных температур сводится к решению уравнения теплопроводности Фурье в полупространстве, ограниченном поверхностью земли, при граничном условии в виде колебаний температуры на этой поверхности [5]. В простейшем случае, когда на поверхности имеют место гармонические колебания температуры с некоторой частотой, реше-



нием являются установившиеся колебания глубинных температур той же частоты с амплитудой

$$A(Z) = A(0) \cdot e^{-Z \cdot \sqrt{\frac{\omega}{2\alpha}}}, \quad (1)$$

где $A(Z)$ и $A(0)$ – амплитуда колебаний температуры на глубине Z и на земной поверхности; $\omega = 2\pi/\tau$ – круговая частота (τ – продолжительность периода колебаний); α – коэффициент теплопроводности пород.

С помощью (1) можно определять глубину проникновения температурных волн в земную кору:

$$Z = \frac{-\ln\left(\frac{A(Z)}{A(0)}\right)}{\sqrt{\frac{\pi}{\alpha\tau}}} \quad (2)$$

Отношение $A(Z)/A(0)$ представляет собой относительную амплитуду колебаний температуры. Ниже представлены результаты расчета глубины Z для двух фиксированных значений $A(Z)/A(0)$ при различных значениях τ и α (табл. 1). На глубинах, где $A(Z)/A(0) = 0,5$, имеет место сильное проявление поверхностных колебаний температуры, а там, где $A(Z)/A(0) = 0,1$, их проявление можно назвать заметным.

Таблица 1

Глубина распространения (в метрах) колебаний температуры с заданной относительной амплитудой $A(Z)/A(0)$ в зависимости от периода колебаний (τ) и теплопроводности пород (α)

$A(Z)/A(0)$	$\alpha, 10^{-6}$ м ² /с	τ , тыс. лет						
		0.003	0.03	0.2	2	20	40	100
0.5	0.5	2.7	8.6	22	70	224	309	492
	1.0	3.8	12	31	98	310	439	694
	2.0	5.4	17	44	139	439	621	982
0.1	0.5	9.0	28	74	232	742	1027	1631
	1.0	13	40	103	325	1031	1457	2304
	2.0	18	57	146	461	1457	2061	3258

Значения Z возрастают с увеличением τ . Климатические колебания температуры с периодами 20–40 и 100 тыс. лет. проникают на глубины 200–1000 м при $A(Z)/A(0) = 0,5$ и на глубины 700–3300 м при $A(Z)/A(0) = 0,1$.

Значения α в этих расчётах, 0,5 и 1 (10^{-6} м²/с), типичны для пород верхней коры континентов, находящихся в сухом состоянии и обладающих только молекулярной теплопроводностью [6]. Значение $\alpha = 2$ (10^{-6} м²/с) имитирует появление конвективной теплопроводности в массивах горных пород, сквозь которые в той или иной мере фильтруется влага атмосферных осадков и межпластовая вода. Фильтрация воды, как показано в работе Н.М. Фролова [7], существенно увеличивает скорость и глубину проникновения температурных волн.

Температурные колебания на глубинах происходят со сдвигом по фазе. Время запаздывания (δ) максимумов и минимумов температуры от соответствующих экстремумов на земной поверхности описывается известным выражением, вытекающим из решения уравнения теплопроводности [5]. Если взять отношение δ/τ , то оно характеризует относительное запаздывание – в сравнении с периодом колебаний. Значения этой величины, рассчитанные при $\alpha = 10^{-6}$ м²/с, представлены в таблице 2.

Таблица 2

Относительное запаздывание изменений температуры в зависимости от глубины (Z) и периода колебаний (τ)

Z , м	τ , тыс. лет						
	0.003	0.03	0.2	2	20	40	100
10	0.291						
100		0.092	0.0356	0.0112	0.0036	0.0025	0.0016
500			0.356	0.112	0.0356	0.0252	0.0159
1000				0.562	0.1778	0.1258	0.0795
2000					0.356	0.252	0.159
3000						0.503	0.318
							0.477

Относительное запаздывание колебаний температуры уменьшается с увеличением их периодов. Оно возрастает от поверхностных к более глубоким горизонтам земной коры. При



колебаниях с периодами 20–100 тыс. лет на глубинах до 1000 м значения δ/t таковы, что абсолютное время запаздывания (δ) не превышает (или почти не превышает) 10 тыс. лет.

Интересующее нас послеледниковое потепление климата завершилось 10 тыс. лет назад. С учётом времени запаздывания, климатическое повышение температуры горных пород на глубинах до 1000 м состоялось в полной мере. Для расчёта термического расширения этих пород выделим элемент их объема в форме куба с длиной ребра l . В случае физической изотропии пород линейная термическая деформация Δl описывается, по всем осям, выражением:

$$\Delta l = \beta l \Delta T, \tag{3}$$

где β – коэффициент линейного термического расширения горных пород, ΔT – повышение их температуры (по модулю равное величине $A(Z)$).

Расширение пород вдоль вертикально ориентированных граней куба влечёт за собой некоторое поднятие земной поверхности при сохранении прежнего давления пород в массиве. Расширение пород в горизонтальном направлении встречает сопротивление окружающих пород. Если породы обладают упругими свойствами, то возникают термически обусловленные (термомеханические) напряжения сжатия (σ_{ht}). Их можно оценить с помощью формулы Гука:

$$\sigma_{ht} = E \cdot \Delta l / l = E \beta \Delta T, \tag{4}$$

где E – модуль упругости (модуль Юнга).

Произведение $E\beta$ можно назвать комплексным коэффициентом термомеханического сжатия. Значения E у хрупко-упругих пород верхней коры (гранитов, гнейсов, слитных песчаников, мраморизованных известняков, кварцитов, роговиков) составляют $(5-10)10^{10}$ Н/м². У кварцитов они достигают $1,5 \cdot 10^{11}$ Н/м². Преобладающие значения β у этих пород находятся в диапазоне $(6-10)10^{-6}$ (1/К), а у кварцитов могут превышать 10^{-5} (1/К) [8,9]. Для весьма прочных пород можно принять $E = 10^{11}$ Н/м² и $\beta = 10^{-5}$ (1/К). Тогда $E\beta = 10^6$ Н/м²К. Но у самых прочных пород $E\beta > 10^6$ Н/м²К.

На поверхности континентов характерные значения послеледниковое повышения температуры были близки к 10К. Поэтому в наших оценочных расчётах примем $\Delta T(0) = A(0) = 10$ К. Соответствующие значения $A(Z)$ вычислим с помощью (1), используя $\tau = 40$ тыс. лет и два варианта значений α ($1 \cdot 10^{-6}$ и $2 \cdot 10^{-6}$ м²/с). Получаем значения $A(Z)$ и σ_{ht} , представленные в таблице 3. Напряжения σ_{ht} – это интересующие нас климатически обусловленные избыточные горизонтальные напряжения сжатия. Они являются внешне индуцированными внутренними тектоническими напряжениями (стрессами). Они охватывают, с убывающей интенсивностью, сотни и даже первые тысячи метров верхней части земной коры материков. В океанической коре они не возникают, поскольку в ходе четвертичного периода температура придонных вод океана почти не изменяется. (В межледниковые эпохи эти воды подпитываются притоком холодных вод со стороны Антарктики и Арктики).

Таблица 3
Повышение температуры горных пород $A(Z)$ и горизонтальные напряжения сжатия в них (σ_{ht}) при завершении последнего гляциоклиматического цикла (варианты 1 и 2)

Варианты		Z, м						
		10	100	200	400	600	800	1000
1	A(Z), К	9.9	8.5	7.3	5.3	3.9	2.8	2.1
	σ_{ht} , МПа*	9.9	8.5	7.3	5.3	3.9	2.8	2.1
2	A(Z), К	9.9	8.9	8.0	6.4	5.1	4.1	3.3
	σ_{ht} , МПа	9.9	8.9	8.0	6.4	5.1	4.1	3.3

Примечание: * $\sigma_{ht} = 1$ МПа = 10^6 Н/м².

Рассматриваемые термотектонические напряжения накладываются на горизонтальные напряжения сжатия, связанные с давлением горных пород. Следуя [10,11], в массиве идеально упругих пород гравитационные напряжения сжатия (σ_{hg}) можно оценить с помощью выражения:

$$\sigma_{hg} = \varepsilon \cdot \sigma_v = \left(\frac{\mu}{1 - \mu} \right) \cdot \rho g H \tag{5}$$

Здесь $\varepsilon = \frac{\mu}{1 - \mu}$ – коэффициент бокового распора (μ – коэффициент поперечных деформаций (Пуассона)); $\sigma_v = \rho g H$ – вертикальное давление (ρ – усреднённая плотность налегающей толщи пород, g – ускорение свободного падения, H – глубина).

Значения σ_v и σ_{hg} , рассчитанные с использованием значений $\mu = 0.3$ и $\rho = 2700$ кг/м³, показаны в таблице 4. Они равномерно увеличиваются с глубиной.



Таблица 4
Гравитационные вертикальные (σ_v) и горизонтальные (σ_{hg}) напряжения сжатия в массиве прочных горных пород

Z, м	10	100	200	400	600	800	1000
σ_v , МПа	0.27	2.65	5.30	10.6	15.9	21.2	26.5
σ_{hg} , МПа	0.12	1.14	2.28	4.55	6.83	9.07	11.4

$$\sigma_h = \sigma_{hg} + \sigma_{ht} \quad (6)$$

Значения σ_h , вычисленные по σ_{ht} и σ_{hg} из таблиц 3 и 4, представлены в таблице 5.

Таблица 5
Полные горизонтальные напряжения сжатия (σ_h) и отношение σ_h/σ_v в массиве прочных горных пород (варианты 1 и 2)

Варианты		Z, м						
		10	100	200	400	600	800	1000
1	σ_h , МПа	10.0	9.64	9.58	9.85	10.7	11.9	13.5
	σ_h/σ_v	37.1	3.64	1.81	0.94	0.68	0.56	0.51
2	σ_h , МПа	10.0	10.0	10.3	11.0	11.9	13.2	14.7
	σ_h/σ_v	37.1	3.79	1.94	1.03	0.75	0.62	0.55

обоих вариантах значения σ_h слабо изменяются с глубиной, а отношение σ_h/σ_v убывает, особенно резко – в верхнем горизонте пород.

Теперь имеется возможность сравнить рассчитанные показатели горизонтальных напряжений с данными измерений в массивах прочных пород и проверить изложенное объяснение природы избыточных напряжений. Мы затронем эту задачу в небольшой мере.

По данным Дж. Ферхугена и его коллег [10], фактические значения отношения σ_h/σ_v в приповерхностных упругих горных породах континентов составляют 0.5–1.0. В некоторых случаях эти значения достигают 2.0. Авторы отмечают, что в случае чисто гравитационного возникновения горизонтальных напряжений сжатия рассматриваемое отношение имело бы значения около 0.4. Но в малоупругих породах, а также породах, не способных длительное время выдерживать касательные напряжения, значения горизонтальных гравитационных напряжений приближаются к 1.0 (поскольку устанавливается равновесие, подобное гидростатическому).

В работе Д.М. Казикаева [11] представлены данные о современном поле напряжений в массиве горных пород Коробковского месторождения железистых кварцитов, в пределах железорудного бассейна Курской магнитной аномалии (КМА). Исследование проводилось на глубинах от 100 до 400 м методом полной разгрузки торца скважин. Все напряжения в массиве сжимающие, причём, субгоризонтальные нормальные напряжения по модулю близки к субвертикальным или превышают их. Отношение σ_h/σ_v , как правило, имеет значения в пределах 0.7–2.0. По характеру поля напряжений получен вывод, что исследованный массив горных пород испытывает тектоническое сжатие, наиболее сильное – в направлении простирания складчатых структур.

В Австралии, как отмечают Денхам и Виндзор (D. Denham, C.R. Windsor) [12], верхнекорые тектонические напряжения (горизонтальные стрессы) практически везде являются сжимающими. Они выявлены в туннелях, шахтах, карьерах, скважинах. Сильное приповерхностное проявление этих напряжений наблюдается в юго-западном и некоторых других районах Австралии. На глубине около 10 м их значения могут превышать 20 МПа. В таких случаях $\sigma_h/\sigma_v > 74$. Ориентация осей максимальных напряжений – различная и менее всего выдержанная на глубинах до 500 м.

Эти данные о горизонтальных напряжениях сжатия вполне укладываются в диапазон рассчитанных нами значений. В принципе, нельзя считать исключением покровные слои горных пород в Австралии. Встречающиеся там большие значения σ_h и σ_h/σ_v только в 2 раза отличаются от расчётных. Мы полагаем, что породам этих слоёв свойственны аномально большие значения комплексного коэффициента термомеханического сжатия ($E\beta > 10^6$ Н/м²К). Австралийские специалисты имеют возможность проверить данное объяснение.

Пространственная ориентация климатически обусловленных тектонических стрессов зависит от формы полей послеледникового повышения температуры на материках, характера геологических структур, свойств горных пород в их пределах. В соответствии с этим, в бассейне КМА совпадение векторов максимальных напряжений сжатия с направлением простирания складок можно объяснить продольной жёсткостью структур. Что касается напряжений попе-

Полные горизонтальные напряжения сжатия (σ_h) в массиве пород – это сумма горизонтальных напряжений термотектонического и гравитационного происхождения:

Верхние две строки таблицы получены для условий кондуктивной теплопроводности в толще пород ($\alpha = 1 \cdot 10^{-6}$ м²/с), а нижние – для условий участия конвективной теплопроводности ($\alpha = 2 \cdot 10^{-6}$ м²/с). Во втором варианте значения σ_h и σ_h/σ_v немного больше, чем в первом. В



речных направлений, то они могли испытать частичную разрядку вследствие некоторой податливости древних складок для дальнейшего бокового их смятия.

Таким образом, воздействие глобального послеледникового потепления климата на поле горизонтальных напряжений сжатия в приповерхностных горизонтах упругих горных пород представляется очевидным по физическому смыслу и поддается аналитическому расчёту. Существенно, что кроме климатической причины не известно ни одного другого реально действующего фактора, который смог бы вызвать избыточные горизонтальные напряжения сжатия на всех материках планеты. Для дальнейшего изучения термомеханической генерации напряжений целесообразно провести физическое и математическое моделирование процессов с привлечением фактических данных по разным регионам континентов.

Список литературы

1. Сергин В.Я., Сергин С.Я. Системный анализ проблемы больших колебаний климата и оледенения Земли. – Л.: Гидрометеоиздат, 1978. – 280 с.
2. The past 800 ka viewed through Antarctic ice cores // Episodes. – 2008. – Vol. 31. – № 2. – P. 219-221.
3. Crowley T.J. The geologic record of climatic change // Rev. of Geophys. and Space Phys. – 1983. – Vol. 21. – № 4. – P. 828–877.
4. Сергин С.Я. Угрожает ли человечеству климатическая катастрофа? – Saarbrücken Palmarium Academic Publishing, 2012. – 65 p.
5. Тихонов А.Н., Самарский А.А. Уравнения математической физики. 4-е. изд. – М.: Наука, 1972. – 736 с.
6. Моисеенко У.И., Смыслов А.А. Температура земных недр. – Л.: Недра. Ленингр. отделение, 1986. – 178 с.
7. Фролов Н.М. Гидрогеотермия. Изд. 2-е. – М.: Недра, 1976. – 280 с.
8. Протодяконов М.М., Ильницкая Е.И., Тедер Р.И. Справочник (кадастр) физических свойств горных пород – М.: Недра, 1975. – 279 с.
9. Физические свойства горных пород и полезных ископаемых / Ред. Н.Б. Дортман. – М.: Недра, 1984. – 455 с.
10. Земля. Введение в общую геологию / Дж. Ферхуген, Ф. Тернер, Л. Вейс и др. – М.: Мир, 1974. – Т. 2. – С. 399-846.
11. Казикаев Д.М. Геомеханические процессы при совместной и повторной разработке руд. – М.: Недра, 1981. – 288 с.
12. DePam D., Windsor C.R. The crustal stress pattern in the Australian continent // Explor. Geophys. – 1991. – Vol. 22. – P. 101–106.

SURPLUS HORIZONTAL COMPRESSION TENSIONS IN THE UPPER CRUST OF CONTINENTS: THE CLIMATIC CAUSE THEIR ORIGIN

S.Ya. Sergin, S.V. Sergeev

*Belgorod State National Research
University, 85, Pobedy St., Belgorod,
308015, Russia*

*E-mail: sergin@bsu.edu.ru;
sergeev@bsu.edu.ru*

Transition from last glacial epoch to modern interglacial epoch caused temperature increase of upper crust rocks of continents and their thermal expansion. Horizontal thermomechanical compressions set up there. According to our analysis, they are main component of tectonic stresses in upper layers of continental crust.

Key words: upper crust, thermomechanical compressions, tectonic stresses, postglacial climate warming, climate and tectonic.