



УДК 911.2:551.4.04

DOI 10.18413/2075-4671-2019-43-1-42-51

**ДИНАМИКА ИЗМЕНЕНИЯ РЕЛЬЕФА ПОВЕРХНОСТИ ЗЕМЛИ  
ПРИ КОЛЛИЗИИ ЛИТОСФЕРНЫХ ПЛИТ****DYNAMICS OF RELIEF CHANGE OF THE EARTH SURFACE  
IN THE COLLISION OF LITHOSPHERIC PLATES****В.Н. Тюпин****V.N. Tyupin**

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

Belgorod National Research University,  
85 Pobeda St, Belgorod, 308015, Russia

E-mail: tyupinvn@mail.ru

**Аннотация**

В статье на основе известных фактов о горизонтальном перемещении литосферных плит и динамике изменения рельефа поверхности Земли рассмотрен вопрос о столкновении плит – коллизии. То есть, проведена реконструкция природного явления – механического взаимодействия литосферных плит во времени. Данный процесс сопровождается формированием горных комплексов за счет вертикальных деформаций поверхности Земли. Для определения динамики изменения рельефа поверхности Земли на основе закона сохранения энергии разработана математическая модель. В зависимости от скорости горизонтальных смещений литосферных плит, их физико-технических свойств получены формулы для определения относительных и абсолютных вертикальных деформаций поверхности Земли во времени. Проведены численные расчеты по определению вертикальных деформаций в районе горных сооружений Альпы, Кавказский хребет, Уральские горы, Памир. Расчетные значения скорости вертикальных деформаций 0.0053–0.027 мм в год совпадают с данными А.В. Пейве. Математический и численный анализ полученных формул указывает на их правомерность. Настоящие исследования могут быть использованы для прогнозирования величин вертикальных тектонических движений поверхности Земли в районах коллизии литосферных плит.

**Abstract**

In the article, on the basis of known facts about the horizontal movement of lithospheric plates and the dynamics of changes in the relief of the surface of the Earth, the question of the collision of plates – a collision – was considered. That is, the reconstruction of a natural phenomenon – the mechanical interaction of lithospheric plates in time. The process of mechanical interaction of lithospheric plates is accompanied by the formation of mountain complexes due to vertical deformations of the Earth's surface. A mathematical model has been developed to determine the dynamics of changes in the terrain of the Earth's surface on the basis of the energy conservation law. Depending on the speed of horizontal displacements of lithospheric plates, their physico-technical properties, formulas were obtained for determining the relative and absolute vertical deformations of the Earth's surface over time. Numerical calculations were carried out to determine vertical deformations in the area of the Alps, Caucasus Mountains, Ural Mountains, Pamir mountains. The calculated values of the rate of vertical deformations of 0.0053–0.027 mm per year coincide with the data of A.V. Peive. Mathematical and numerical analysis of the obtained formulas indicates their validity. These studies can be used to predict the magnitude of the vertical tectonic movements of the Earth's surface in areas of collision of lithospheric plates.

**Ключевые слова:** рельеф поверхности Земли, тектоническое движение, литосферные плиты, коллизия, горные сооружения, закон сохранения энергии, формулы, вертикальные деформации, правомерность.

**Keywords:** relief of the Earth's surface, tectonic movement, lithospheric plates, collision, mountain structures, energy conservation law, formulas, vertical deformations, legitimacy.

## Введение

Динамика изменения рельефа поверхности Земли является одним из элементов, влияющих на жизнь и деятельность человеческого общества. Поэтому одной из важных задач является реконструкция тектонических движений и взаимодействия литосферных плит во времени, что в конечном итоге приводит к изменению ландшафтной оболочки Земли, ее структуры. Тектонические движения приводят к изменению геологического строения земной коры и могут формировать месторождения различных полезных ископаемых. Поэтому изучение движений тектонических плит и результат их взаимодействия имеет теоретическое и большое практическое значение [Гзовский, 1975; Артюшков, 1993; Аглонов, 2001; Лобковский, Никишин, Хаин, 2004; Сорохтин и др., 2002, 2010; Чамберс, 2004; Полянский и др., 2014; Скляр и др., 2014; Трифонов, 2016; Короновский, 2016; Добрецов и др., 2017; Трифонов, Соколов, 2017; Рогожин, 2017].

В настоящее время считается, что горизонтальные и вертикальные движения тектонических плит взаимосвязаны. Скорость движений в горизонтальном направлении составляет 0.01–0.13 м в год, в вертикальном 0.005–0.01 мм в год. [Хаин, Ломидзе, 1985; Артюшков, 1993; Лобковский и др., 2004; Маринин, Сим, 2015; Милуков и др., 2015].

Горизонтальные движения тектонических плит обеспечиваются конвективными потоками в мантии Земли. Потоки циркулируют, опускаясь к ядру Земли, где отдают тяжелые элементы ядру. Затем облегченные и под действием высокой температуры поднимаются к нижней плоскости литосферной плиты, где движутся горизонтально, вызывая перемещение плит.

То есть, конвективные потоки в мантии Земли приводят к горизонтальному перемещению литосферных плит. При этом континентальные литосферные плиты сталкиваются и за счет деформаций на контакте формируются горные сооружения (рис. 1). Это можно считать первым механизмом горообразования. Процесс столкновения плит называется *коллизией* [Аглонов, 2001].

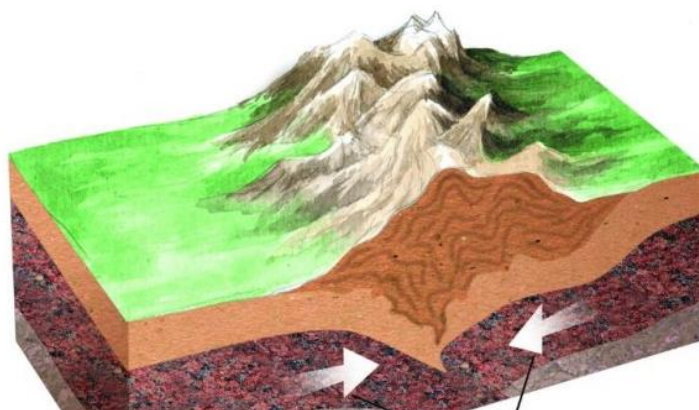


Рис. 1. Образование горных сооружений при столкновении литосферных плит  
Fig. 1. The formation of mountain structures in the collision of lithospheric plates

Вторым механизмом формирования горных сооружений является взаимодействие более легкой континентальной литосферы с более тяжелой океанской, которая погружается под континентальную. Этот процесс называется субдукцией и также приводит к формированию горных сооружений [Аглонов, 2001].

Области взаимодействия литосферных плит являются зонами с высокой сейсмической активностью. Максимальные глубины гипоцентров землетрясений не превышают 150–200 км, а большая их часть сконцентрирована в слое 50 км. Предполагается, что мощность литосферных плит под океанами составляет 5–100 км, под континентами 25–350 км.

Уральский складчатый пояс образовался в ходе герцинской коллизии 260 млн. лет назад на границе Восточно-Европейской платформы и Западно-Сибирской тектонической плиты и были разрушены процессами выветривания в мезозойско-кайнозойское время. Уральские горы в настоящее время растут, но сейсмическая активность в этой зоне низкая – обновление горного пояса сопровождается землетрясениями магнитудой от 3 до 6, которые происходят достаточно редко. За последние 300 лет (период времени, о котором имеются достаточно подробные данные сейсмических наблюдений) на Урале было зарегистрировано около 50 подобных землетрясений. При этом сейсмические толчки магнитудой до 3 происходят на Урале регулярно – только на территории Свердловской области ежегодно регистрируется до пяти подобных сейсмических событий. Большая часть эпицентров землетрясений Урала расположена в пределах Средне-Уральского и Кировско-Кажимского сейсмодоменов.

Например, агентство «ТАСС-ДОСЬЕ» сообщает: 5 сентября 2018 г. в 03:58 по местному времени на Урале произошло землетрясение магнитудой 5.6. Эпицентр находился в Катав-Ивановском муниципальном районе Челябинской области в 133 км к востоку от Уфы. Толчки ощущались на территории Челябинской, Свердловской областей и в Башкирии. Характерный вид Уральских гор, образуемых в результате коллизии, представлен на рис. 2.



Рис. 2. Уральские горы – результат столкновения Восточно-Европейской платформы и Западно-Сибирской тектонической плиты

Fig. 2. The Ural Mountains are the result of a collision between the East European Platform and the West Siberian tectonic plate

Обстановки коллизии, развивающиеся по первому механизму, проявляются в пределах Альпийско-Гималайского складчатого пояса, который простирается от Атлантического до Тихого океана. На данной конвергентной границе в настоящее время Индо-Австралийская, Иранская, Аравийская и Африканская литосферные плиты взаимодействуют с Евразийской плитой. Этот процесс формирует горные сооружения – Памир, Гиндукуш, плато Тибет. Между Евразией и Африкой продолжается коллизия в Альпах и на Кавказе (рис. 3) [Аплонов, 2001].

При этом горные сооружения продолжают расти. Стрелки на рис. 3 указывают на направление движения литосферных плит.

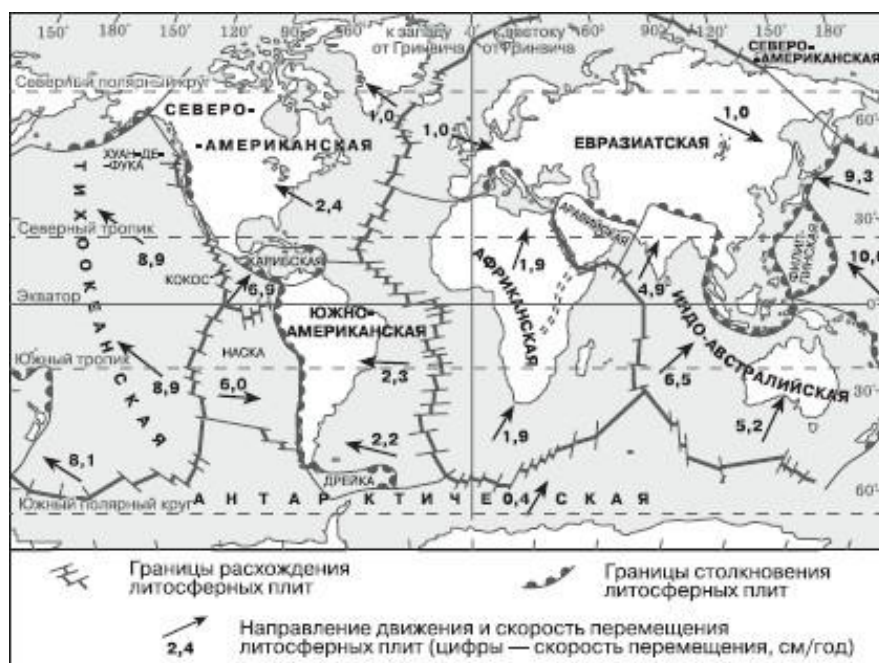


Рис. 3. Коллизия Евразийской плиты с Индо-Австралийской, Иранской, Аравийской и Африканской создает горные сооружения – Памир, Гиндукуш, плато Тибет, Кавказ и Альпы  
 Fig. 3. The conflict of the Eurasian plate with the Indo-Australian, Iranian, Arabian and African creates mountain structures – Pamir, Hindu Kush, Tibet plateau, the Caucasus and the Alps

Таким образом, коллизия определяется столкновением континентов, литосферных плит и сопровождается интенсивными землетрясениями, вертикальными тектоническими движениями и горообразованием.

Целью настоящей статьи является определение вертикальных деформаций (изменение рельефа) поверхности Земли во времени при коллизии континентальных литосферных плит (первый механизм образования горных сооружений).

### Объекты и методы исследования

Объектом исследования является рельеф поверхности Земли при коллизии (столкновении) континентальных литосферных плит. Это приводит к деформированию и разрушению плит на контакте с подъемом поверхности Земли и образованием горных сооружений. Для исследования используется метод математического моделирования, основанный на механическом процессе столкновения плит и законе сохранения энергии с анализом полученных формул и численными расчетами.

### Результаты и их обсуждение

Ранее было сказано, что литосферные плиты Земли находятся в постоянном движении. Причем скорость их горизонтального перемещения составляет 0.01–0.13 м в год. То есть литосферные плиты обладают кинетической энергией. Встречая на своем пути неподвижное препятствие, например, Евразийский континент при внедрении в него Аравийской плиты образуют Кавказские горы, Африканской плиты – Альпы. То есть происходит деформирование и разрушение плит на контакте. Однако известно, что при разрушении горных пород их объем увеличивается. С другой стороны, если образец горной породы сжимать в одном направлении (в этом направлении длина образца уменьшается), то в перпендикулярных направлениях размер образца увеличивается. Вероятно, эти механизмы и присутствуют при столкновении литосферных плит, и, используя их, можно определить скорость вертикальных деформаций горных массивов.

Будем считать, что одна литосферная плита движется с определенной скоростью, другая является неподвижной. При движении литосферной плиты ее удельная

кинетическая энергия ( $W_K$ ) затрачивается на упругопластические деформации в районе контакта двух плит ( $W_{уп}$ ). Тогда

$$W_K = W_{уп} \quad (1)$$

Значения удельной кинетической энергии и упругопластических деформаций определяют по формулам [Тюпин, 2017; Тюпин, 2018]

$$W_K = 0,5\rho v^2 \quad W_{уп} = \frac{\sigma_c^2(r)}{2E}\Phi \quad (2)$$

где  $\rho$ ,  $E$  – объемная масса и модуль упругости породы литосферных плит, соответственно;  $v$  – скорость движения литосферной плиты;  $\sigma_c(r)$  – величина сжимающего напряжения на контакте плит;  $\Phi$  – показатель трещиноватости горного массива в районе контакта литосферных плит.

Поскольку скорость передвижения литосферной плиты весьма незначительна, то в (2) сжимающее напряжение  $\sigma_c(r)$  необходимо заменить на касательное напряжение  $\tau$ , которое при коллизии будет обеспечивать вертикальные деформации земной поверхности с образованием горного сооружения (рис. 4).

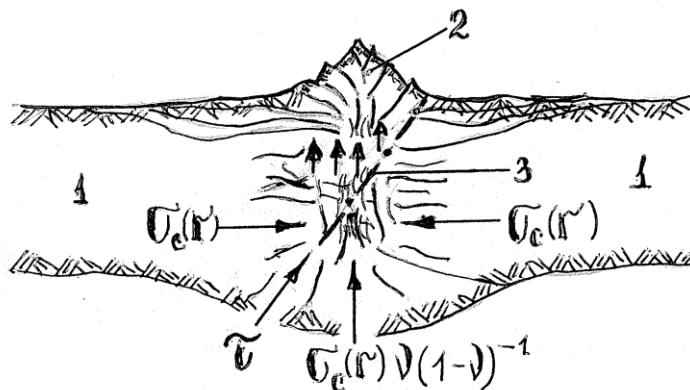


Рис. 4. Схема формирования горного сооружения при коллизии литосферных плит.

1 – литосферные плиты; 2 – формирующееся горное сооружение;

3 – плоскость максимального касательного напряжения

Fig. 4. The scheme of the formation of a mountain structure with a collision of lithospheric plates.

1 – lithospheric plates; 2 – forming mountain structure; 3 – the plane of maximum tangential stress

В работе [Гзовский, 1975] при неравенстве трех компонент напряжений касательные напряжения  $\tau$  определяют по формуле

$$\tau = 0,5[\sigma_c(r) - \sigma_c(r)\nu(1 - \nu^{-1})] \quad (3)$$

где  $\nu$  – коэффициент Пуассона горной породы литосферной плиты.

С другой стороны [Гзовский, 1975] касательное напряжение равно

$$\tau = \frac{\varepsilon}{t}\eta \quad (4)$$

где  $\varepsilon$  – относительные деформации массива в районе контакта литосферных плит;  $\eta$  – вязкость горной породы литосферных плит;  $t$  – время действия нагрузки.

Подставляя (4) в (3) получим

$$\sigma_c(r) = 2\frac{\varepsilon}{t}\eta\left(\frac{1 - \nu}{1 - 2\nu}\right) \quad (5)$$

Подставив (5) в (2) и результат в (1) получим формулу для определения величины относительных вертикальных деформаций во времени в виде

$$\varepsilon = \frac{v t (\rho E)^{0.5}}{2 \eta \Phi^{0.5}} \left( \frac{1 - 2\nu}{1 - \nu} \right) \quad (6)$$

В (6) можно сделать замены

$$E = \rho c^2; \quad \varepsilon = \Delta h H_{\Pi}^{-1} \quad (7)$$

где  $c$  – скорость продольной волны в литосферной плите;  $\Delta h$  – величина вертикального перемещения поверхности Земли в районе контактирующих плит;  $H_{\Pi}$  – высота контакта плит, или толщина литосферных плит.

Подставляя (7) в (6) получим значение величины вертикального перемещения поверхности Земли в районе контакта литосферных плит в зависимости от времени

$$\Delta h = \frac{v \rho c t H_{\Pi}}{2 \eta \Phi^{0.5}} \left( \frac{1 - 2\nu}{1 - \nu} \right) \quad (8)$$

Анализ зависимости (6, 8) показывает, что с увеличением скорости горизонтального перемещения ( $v$ ), объемной массы ( $\rho$ ), упругих свойств литосферных плит ( $E, c$ ), времени ( $t$ ), толщины плиты ( $H_{\Pi}$ ) величина вертикального перемещения увеличивается. С увеличением величины вязкости пород литосферных плит ( $\eta$ ) и степени их трещиноватости ( $\Phi$ )  $\Delta h$  уменьшается. С физической точки зрения эти выводы являются вполне логичными и обоснованными.

В формулах (6, 8) показано, что абсолютные и относительные вертикальные деформации существенно зависят от кинематических параметров ( $v, t, H$ ) и физико-механических свойств литосферы Земли ( $E, \rho, \nu, \eta$ ).

Для проведения численных расчетов и доказательства правомерности полученных зависимостей необходимо определить численные значения параметров, входящих в формулы (6, 8).

### Анализ и численные параметры для расчетов

Анализ литературных источников и данных интернета позволил установить примерную скорость горизонтального перемещения литосферных плит. Африканская плита, увеличивающая высоту Альпийских гор, движется со скоростью  $v = 0.019$  м/год. Аравийская – создающая Кавказские горы имеет скорость  $v = 0.02$  м/год. Индо-Австралийская литосферная плита имеет скорость  $v = 0.049$  м/год. Горизонтальная скорость сближения Восточно-Европейской платформы и Западно-Сибирской плиты составляет 0.01 м/год.

Толщина литосферных плит под континентами составляет  $H = 25\text{--}350$  км, под океанами 5–100 км.

Анализ технической литературы показал, что все физико-механические свойства пород существенно зависят от всестороннего давления, то есть изменяются с глубиной залегания [Гзовский, 1975; Воларович и др., 1974; Справочник (кадастр)..., 1975; Справочник..., 1978].

Численные значения показателей ( $\rho, c, E, \nu, \eta$ ) для типичных пород осадочного слоя, верхней коры (гранитный слой), нижней коры (базальтовый слой) выбраны из технической литературы [Гзовский, 1975; Справочник..., 1978] в зависимости от величины всестороннего давления приведены в табл.1.

В работе [Гзовский, 1975] приведены данные по упругим свойствам верхних слоев литосферы ( $E, \nu$ ), полученные из сейсмологических данных. Ценность сейсмологических данных заключается в том, что охватываются большие объемы слоев литосферы. На



основе вышеприведенных данных и данных [Гзовский, 1975] составлена таблица физико-механических свойств основных слоев земной коры.

Таблица 1  
Table 1

Физико-механические свойства основных слоев земной коры в условиях всестороннего давления  
Physic-mechanical properties of the main layers of the earth's crust  
under conditions of comprehensive pressure

Наименование слоев	$E, 10^{10},$ Па	$\nu$	$\rho, 10^3,$ кг/м <sup>3</sup>	$c, 10^3,$ м/с	$H, 10^3,$ м
Осадочный	4–6	0.22–0.25	2.4–2.6	3–5	< 5
Верхняя кора (гранитный)	6–10	0.21–0.26	2.6–2.8	5.0–6.5	5–50
Нижняя кора (базальтовый)	10–15	0.25–0.27	3.0–3.2	6.5–7.5	50–80
Верхняя часть подкорковой оболочки	22	0.24–0.28	3.2–3.4	7.5–9.0	> 80

При внесении в табл. 1 численных значений объемной массы и скорости продольных волн в горных массивах использовалась литература [Аглонов, 2001; Воларович и др., 1974; Справочник (кадастр)..., 1975; Справочник..., 1978]. При этом величину  $\rho$  и  $c$  определяли с учетом горного давления на глубине, соответствующей расположению слоев земной коры.

Вязкость слоев горных пород земной коры обусловлена практической деформацией и не упругостью пород. Количественно вязкость определяется как отношение величины касательных напряжений в сдвигаемом слое и скорости пластического течения [Горная энциклопедия, 1984]. При нормальном давлении и температуре вязкость горных пород равна  $10^{13}$ – $10^{20}$  Па·с. Согласно работе [Гзовский, 1975] вязкость слоев земной коры существенно зависит от касательных напряжений. При увеличении касательных напряжений до  $2 \cdot 10^6$  Па, вязкость снижается для гранитного, базальтового слоя с  $10^{21}$  до  $10^{16}$  Па·с. Для слоя осадочных пород с  $10^{19}$  до  $10^{15}$  Па·с.

Используя формулу (8) данные о физико-технических свойствах пород гранитного, базальтового слоя можно определить скорость вертикальных деформаций Уральских гор, Альп, Кавказских гор, Гималаев. Исходные данные и результаты расчетов приведены в табл. 2 и ниже.

Таблица 2  
Table 2

Величины вертикальных перемещений сталкивающихся литосферных плит  
в зависимости от времени  
The magnitudes of the vertical displacements of the colliding lithospheric plates with time

Наименование горного сооружения	$v$		$\Delta h,$ мм/год	Расчетная высота гор за 300 млн. лет, м
	м/год	$10^{-9},$ м/с		
Уральские горы	0.01	3.17	0.0056	1680
Альпы	0.019	6.02	0.0106	3180
Кавказский хребет	0.02	6.35	0.0112	3360
Памир	0.049	15.53	0.0274	8220

Постоянные параметры в (8), выбранные на основе приведенных исследований:  $\rho = 3.0 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>;  $c = 7 \cdot 10^3$  м/с;  $t = 3.15 \cdot 10^7$  с (1 год);  $H_H = 80 \cdot 10^3$  м;  $\eta = 10^{16}$  Па·с;  $\Phi = 1$ ;  $\nu = 0.25$ .

На основе математического моделирования получены формулы расчета относительных и абсолютных вертикальных деформаций горных сооружений (рельефа поверхности Земли) в результате коллизии литосферных плит. Из технической литературы выбраны необходимые физико-механические свойства слоев земной коры, кинематические характеристики литосферных плит. Установлено, что с глубиной от поверхности Земли плотность, модуль упругости, скорость продольной волны в горных породах существенно увеличиваются. Практически не меняется коэффициент Пуассона. Интересно отметить, что с глубиной увеличивается температура, при которой все физические свойства пород уменьшаются, однако согласно [Справочник..., 1978] при одновременном увеличении давления и температуры численные значения  $E$ ,  $\rho$ ,  $c$  все равно увеличиваются.

Проведены численные расчеты по определению вертикальных деформаций поверхности Земли в районе горных сооружений Альпы, Кавказский хребет, Уральские горы, Памир. Расчетные значения скорости вертикальных деформаций 0.0053–0.027 мм в год совпадают с данными А.В. Пейве. Расчеты высоты горных сооружений за 300 млн. лет в целом совпадают: самые низкие горы – Уральские, более высокие Альпы, затем Кавказский хребет и, наконец, Памир.

Следует сразу отметить, что у различных горных сооружений вероятно различно время их образования, могут варьировать и толщина континентальной коры. Кроме того, например, Уральские горы более древние и более длительный промежуток времени были подвержены процессам выветривания.

В целом проведенные исследования, то есть математическая модель, полученные формулы и численные расчеты доказывают правомерность полученных формул расчета абсолютных и относительных вертикальных деформаций поверхности Земли в районе коллизии континентальных литосферных плит. Логичны сами формулы, так как очевидно, что с увеличением  $\nu$ ,  $\rho$ ,  $c$ ,  $t$ , НП вертикальные деформации увеличиваются. С увеличением вязкости  $\mathcal{E}$  и  $\Delta h$  – снижаются. Численные расчеты совпадают с имеющимися данными о скорости вертикальных движений горных сооружений. Расчетная высота горных сооружений (Уральские горы, Альпы, Кавказ, Памир) в первом приближении соответствует действительности. Для точного определения параметров деформаций необходимо более углубленно изучать кинематические, геометрические параметры движущихся плит и их физико-механические свойства в условиях высоких давлений и температур.

### Заключение

На основе известных фактов об изменении рельефа поверхности Земли за счет горизонтального перемещения литосферных плит, что сопровождается их столкновением (коллизией) разработана математическая модель. Она полагается на закон сохранения энергии, согласно которому кинетическая энергия движущейся плиты затрачивается на упругопластические деформации в районе столкновения литосферных плит. Получены формулы для определения относительных и абсолютных вертикальных деформаций поверхности Земли во времени. Проведены численные расчеты по определению вертикальных деформаций поверхности Земли в районе горных сооружений Альпы, Кавказский хребет, Уральские горы, Памир. Расчетные значения скорости вертикальных деформаций 0.0053–0.027 мм в год совпадают с данными А.В. Пейве. Математический анализ и численные расчеты указывают на правомерность полученных формул. Настоящие исследования могут быть использованы для прогнозирования величин вертикальных тектонических движений в районах коллизии континентальных литосферных плит.



## Список литературы References

1. Аплоннов С.В. 2001. Геодинамика: Учебник. СПб., Изд-во Санкт-Петербургского университета, 360.  
Aplonov S.V. 2001. Geodynamics: Textbook. St. Petersburg, Publishing house St. Petersburg University, 360. (in Russian)
2. Артюшков Е.В. 1993. Физическая тектоника. М., Наука, 455.  
Artyushkov E.V. 1993. Physical tectonics. Moscow, Science, 455. (in Russian)
3. Гзовский М.В. 1975. Основы тектонофизики. М., Наука, 536.  
Gzovsky M.V. 1975. Tektonofizika bases. Moscow, Science, 536. (in Russian)
4. Горная энциклопедия. 1984. М., Советская энциклопедия, т. 1, 558.  
Mountain encyclopedia. Moscow, Soviet encyclopedia, vol. 1, 558. (in Russian)
5. Воларович М.П., Баюк Е.И., Левыкин А.И. 1974. Физико-механические свойства горных пород и минералов при высоких давлениях и температурах. М., Наука, 223.  
Volarovich M.P., Bayuk E.I., Levykin A.I. 1974. Physical and mechanical properties of rocks and minerals at high pressures and temperatures. Moscow, Science, 223. (in Russian)
6. Добрецов Н.Л., Буслов М.М., Рубанова Е.С., Василевский А.Н., Куликова А.В., Баталева Е.А. 2017. Среднепоздне палеозойские геодинамические комплексы и структура Горного Алтая, их отражение в гравитационном поле. Геология и геофизика, 58 (11): 1617–1632. DOI: 10.15372/GIG20171101.  
Dobretsov N.L., Buslov M.M., Rubanova E.S., Vasilevsky A.N., Kulikova A.V., Bataleva E.A. 2017. Late Paleozoic geodynamic complexes and the structure of the Gorny Altai, ihotrazhenie in the gravitational field. Geology and geophysics, 58 (11): 1617–1632. DOI: 10.15372 / GIG20171101. (in Russian)
7. Короновский Н.В. 2016. Этапы новейшего вулканизма и проблемы их корреляции с формированием рельефа Центрального Кавказа. Геотектоника, 5: 47–66.  
Koronovsky N.V. 2016. Stages of modern volcanism and problems of their correlation with the formation of the Central Caucasus relief. Geotectonics, 5: 47–66. (in Russian)
8. Лобковский Л.И., Никишин А.М., Хаин В.Е. 2004. Современные проблемы геотектоники и геодинамики. М., Научный мир, 525.  
Lobkovsky L.I., Nikishin A.M., Hain V.E. 2004. Modern problems of geotectonics and geodynamics. Moscow, Scientific world, 525. (in Russian)
9. Маринин А.В., Сим Л.А. 2015. Новейшее напряженное состояние и деформации на западном погружении Большого Кавказа. Геотектоника, 5: 62–77.  
Marinin A.V., Sim A.M., 2015. The latest state of stress and strain in the western immersion of the Greater Caucasus. Geotectonics, 5: 62–77. (in Russian)
10. Милуков В.К., Миронов А.П., Рогожин Е.А., Стеблов Г.М. 2015. Оценки скоростей современных движений Северного Кавказа по GPS наблюдениям. Геотектоника, 3: 56–65.  
Milyukov V.K., Mironov A.P., Rogozhin E.A., Steblov G.M. 2015. Estimation of speeds of modern movements of the North Caucasus by GPS observations. Geotectonics, 3: 56–65. (in Russian)
11. Полянский О.П., Сухоруков В.П., Ревердатто В.В., Бабичев А.В. 2014. Термо-тектоническое численное моделирование надвигообразования и формирование мигматитов коллизионной зоны Монгольского Алтая. В кн.: Геологические процессы в обстановках субдукции, коллизии и скольжения литосферных плит. Материалы Второй Всероссийской конференции с международным участием. Новосибирск, Изд. СО АН РФ: 242–244.  
Polyansky O.P., Sukhorukov V.P., Reverdatto V.V. 2014. Thermo-tectonic numerical modeling of a nadvigoobrazovaniye and formation of migmatit of a conflict zone of the Mongolian Altai. In: Geological processes in situations of a subduktion, a collision and sliding of earth's plates. Materials of the Second All-Russian conference with the international participation. Novosibirsk, Publishing House of the Siberian Branch of the Academy of Sciences of the Russian Federation: 242–244. (in Russian)
12. Рогожин Е.А. 2017. Тектоническая позиция, геологические проявления очагов и афтершоковые процессы серии сильных землетрясений 2016–2017 гг. в центральной Италии. Геотектоника, 6: 96–105.  
Rogozhin E.A. 2017. Tectonic position, geological manifestations of foci and aftershock processes of a series of strong earthquakes 2016–2017 in Central Italy. Geotectonics, 6: 96–105. (in Russian)

13. Склярёв Е.В., Федоровский В.С., Лавренчук А.В. 2014. Процессы минглинга в системах косой коллизии (На примере западного Прибайкалья). В кн.: Геологические процессы в обстановках субдукции, коллизии и скольжения литосферных плит. Материалы Второй Всероссийской конференции с международным участием. Новосибирск, Изд. СО АН РФ: 252–255.
- Sklyarov E.V., Fedorovsky V.S., Lavrenchuk A.V. 2014. Processes of a mingling in the systems of a slanting collision (On the example of the western Baikal region). In: Geological processes in situations of a subduction, a collision and sliding of earth's plates. Materials of the Second All-Russian conference with the international participation. Novosibirsk, Publishing House of the Siberian Branch of the Academy of Sciences of the Russian Federation: 252–255. (in Russian)
14. Сорохтин О.Г., Ушаков С.А. 2002. Развитие Земли. М., Изд-во МГУ, 506.
- Sorokhtin O.G., Ushakov S.A. 2002. Development of Land. Moscow, Publishing house of Moscow State University, 506. (in Russian)
15. Сорохтин О.Г., Чилингар Дж.В., Сорохтин Н.О. 2010. Теория развития Земли: происхождение, эволюция и трагическое будущее. Серия «Науки о Земле». М., Изд-во «ИКИ», 752.
- Sorokhtin O.G., Chilingar J.V., Sorohtin N.O. 2010. The theory of the Earth: origin, evolution and tragic future. Series «Earth Sciences». Moscow, Publishing house «IKI», 752. (in Russian)
16. Справочник (кадастр) физических свойств горных пород. 1975. Под ред. Н.В. Мельникова, В.В. Ржевского, М.М. Протодяконова. М., Недра, 276.
- Handbook (cadastre) of physical properties of rocks. 1975. Under. edited by N.V. Melnikov, V.V. Rzhovsky, M.M. Protodyakonova. Moscow, Nedra, 276. (in Russian)
17. Справочник по физическим свойствам минералов и горных пород при высоких термодинамических параметрах. 1978. Под ред. М.П. Воляровича. М., Недра, 235.
- Handbook of physical properties of minerals and rocks at high thermodynamic parameters. 1978. Under edited by M.P. Volarovich. Moscow, Nedra, 235. (in Russian)
18. Трифонов В.Г. 2016. Коллизия и горообразование. Геотектоника, 1: 3–24.
- Trifonov V.G. 2016. Conflict and mountain building. Geotectonics, 1: 3–24. (in Russian)
19. Трифонов В.Г., Соколов С.Ю. 2017. Подлитосферные течения в мантии. Геотектоника, 6: 3–17.
- Trifonov V.G., Sokolov S.U. 2017. Sub-lithospheric currents in the mantle. Geotectonics, 6: 3–17. (in Russian)
20. Тюпин В.Н. 2018. Определение параметров деформирования земной коры и разрушений при внедрении астероида. Научные ведомости Белгородского государственного университета. Серия Математика. Физика, 50 (2): 209–216.
- Tyupin V.N. 2018. Definition parameters of deformation crust and destructions at introduction of the asteroid. Belgorod State University Scientific Bulletin. Series Mathematics. Physics, 50 (2): 209–216 (in Russian)
21. Тюпин В.Н. 2017. Взрывные и геомеханические процессы в трещиноватых напряженных горных массивах. Белгород, ИД «Белгород» НИУ «БелГУ», 192.
- Tyupin V.N. 2017. Blasting and geomechanical processes in fractured rock masses intense. Belgorod, publishing house «Belgorod» Belgorod National Research University, 192. (in Russian)
22. Хаин В.Е., Ломидзе Н.Г. 1985. Геотектоника с основами геодинамики. М., Изд. МГУ, 480.
- Hain V.E., Lomidze N.G. 1985. Geotectonics with fundamentals of geodynamics. Moscow, Prod. MSU, 480. (in Russian)

**Ссылка для цитирования статьи**  
**Reference to article**

Тюпин В.Н. Динамика изменения рельефа поверхности Земли при коллизии литосферных плит // Научные ведомости Белгородского государственного университета. Серия: Естественные науки. 2019. Т. 43, №1. С. 42–51. doi: 10.18413/2075-4671-2019-43-1-42-51

Tyupin V.N. Dynamics of Relief Change of the Earth Surface in the Collision of Lithospheric Plates // Belgorod State University Scientific Bulletin. Natural Sciences Series. 2019. V. 43, №1. P. 42–51. doi: 10.18413/2075-4671-2019-43-1-42-51