

Научная статья

УДК 55, 551.2, 551.14, 532.5

DOI: 10.2109/2227-9245-2023-29-4-8-18

Склоны поднятий земной поверхности: структурное воздействие мантийных плюмов малой тепловой мощности

Алексей Анатольевич Кирдяшкин¹, Анатолий Григорьевич Кирдяшкин²

^{1,2}Институт геологии и минералогии им. В. С. Соболева СО РАН, г. Новосибирск, Россия

¹aak@igm.nsc.ru; <https://orcid.org/0000-0002-9873-4533>,

²<https://orcid.org/0000-0002-8398-7202>

Информация о статье:

Статья поступила
в редакцию 23.10.2023

Одобрена после
рецензирования 06.11.2023

Принята к публикации
09.11.2023

Ключевые слова:

геодинамическое
моделирование, склон
поднятия, горизонтальный
градиент давления, вязкая
жидкость, динамическая
вязкость, скорость
течения, движущая сила,
сила упругой деформации,
свободный объём,
понижение поверхности

Рассматривается структура течения, организующаяся под действием горизонтального градиента давления в склоне поднятия, и исследуются силы, вызывающие разрывы склона поднятия и обуславливающие его структуру. Объект исследования – склоны поднятий земной поверхности. Целью исследования является установление условий, при которых создаются течения в высоковязком склоне поднятия и определение основных сил, вызывающих образование разрывов склона и формирование его структуры. Показано, что в склоне поднятия существует горизонтальный градиент давления, в условиях которого в высоковязком склоне поднятия организуются горизонтальные течения. Вязкое течение в склоне поднятия проанализировано с использованием модели течения вязкой (ньютоновской) жидкости в слое с наклонной верхней (свободной) поверхностью. Обозначено распределение скорости течения по высоте слоя. Установлено условие создания блоковой структуры склона поднятия, находящегося в условиях растяжения. Представлена зависимость движущей (гравитационной) силы, обусловленной горизонтальным градиентом давления, от вязкости блока. Установлено, что разрыв течения склона поднятия образуется, когда величина силы упругой деформации разрыва равна разности величин движущей силы и силы трения на подошве склона. Процессы, происходящие в области раздвижения блоков, проанализированы с использованием данных лабораторного и теоретического исследования истечения вязкой жидкости из прямоугольного сосуда. Определена зависимость средней скорости течения и времени первого периода заполнения свободного объёма от горизонтального размера слоя для различных вязкостей материала склона. Получены выражения для понижения уровня свободной поверхности склона, происходящего вследствие заполнения свободного объёма между блоками, и для горизонтального размера образовавшейся области понижения. По результатам геодинамического моделирования представлена структура склона поднятия.

Благодарность: Работа выполнена по государственному заданию ИГМ СО РАН (№ 122041400057-2).

Slopes of Uplifts Of The Earth's Surface: Structural Impact of Mantle Plumes of Low Thermal Power

Aleksey A. Kirdyashkin¹, Anatoly G. Kirdyashkin²

^{1,2}V. S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy SB RAS, Novosibirsk, Russia

¹aak@igm.nsc.ru; <https://orcid.org/0000-0002-9873-4533>

²<https://orcid.org/0000-0002-8398-7202>

Information about the article:

Received 23 October, 2023

Approved after review
6 November, 2023

Accepted for publication
9 November, 2023

Keywords: geodynamic modeling, elevation slope, horizontal pressure gradient, viscous liquid, dynamic viscosity, flow velocity, driving force, elastic deformation force, free volume, lowering of the surface

The flow structure, which is organized under the influence of a horizontal pressure gradient in the uplift slope is considered. The forces that cause disruptions of the uplift slope and determine its structure are investigated. *The object of the study* is the slopes of uplifts of the Earth's surface. *The aim of the study* is to establish the conditions under which flows are created in a high-viscosity uplift slope and to determine the main forces causing the formation of slope breaks and the formation of the slope structure. It is shown that there is a horizontal pressure gradient in the uplift slope. Under this gradient horizontal flows are organized in the high-viscosity uplift slope. The viscous flow in the uplift slope is analyzed using a model of the viscous (Newtonian) fluid flow in a layer with an inclined upper (free) surface. The flow velocity distribution over the layer height is obtained. The condition for creating a block structure of the uplift slope under strain conditions is established. The dependence of the driving (gravitational) force due to the horizontal pressure gradient on the viscosity of the block is presented. It has been established that a disruption of the uplift slope flow is formed when the magnitude of the elastic deformation force of the rupture is equal to the difference between the magnitudes of the driving force and the friction force at the slope bottom. The processes occurring in the area of block separation are analyzed using data of laboratory and theoretical studies of the viscous outflow from a rectangular vessel. The dependence of the average flow velocity and the time of the first period of filling the free volume on the horizontal size of the layer are presented for different viscosities of the slope material. Expressions are obtained for lowering of the free surface level of the slope, which occurs due to the filling of the free volume between the blocks, as well as for the horizontal size of the lowering area. Based on the results of geodynamic modeling, the structure of the uplift slope is presented.

Acknowledgment: The work was carried out according to the state assignment of IGM SB RAS (No. 122041400057-2).

Введение. В. В. Белоусовым было предсказано существование локальных каналов, обладающих низкой вязкостью и характеризующихся высокими тепловыми потоками. В областях существования таких каналов должны создаваться вертикальные силы, под воздействием которых образуются поднятия земной поверхности [3]. В настоящее время эти каналы получили название мантийных термомеханических плюмов. С использованием геологических данных показано, что формирование поднятий может быть обусловлено подъёмом мантийных плюмов [10; 12; 13]. Образование поднятий может ускорять процесс растяжения континентов [16]. В работе [4] указана связь континентального рифтогенеза с подъёмом мантийных плюмов к литосфере. Для решения задачи о формировании поднятий применяются методы лабораторного, теоретического и численного моделирования [11]. В статьях [14; 15] показано, что поднятие создаётся под действием вертикально

направленной силы сверхлитостатического давления, действующего на кровлю плюма, не достигшего поверхности. Крупнейшие поднятия создаются вследствие воздействия семейств плюмов малой мощности, которые не прорываются на поверхность [15].

Образование поднятия Кавказа можно связать с активностью группы плюмов, не вышедших на поверхность, под действием которых сформировалась с запада на восток последовательность его наиболее высоких горных вершин [14]. Представлены результаты вычислений параметров поднятия, сформировавшегося под действием группы плюмов. Расчёты показали, что протяжённость, наибольшая высота и горизонтальный размер основной части такого поднятия хорошо согласуются с параметрами поднятия Кавказа [3]. На Кавказе выявляется сложное пространственно-временное распределение обстановок сжатия и растяжения [6; 7]. В ряде зон Центрального и Казбекского сегмен-

тов мегасвода Большого Кавказа отмечается преобладание блоковых структур, новейшие структуры формировались в условиях преобладающего растяжения [7; 8]. Следует отметить, что геодезические (GPS) измерения указывают на увеличение ширины зоны Главного хребта и Большого Кавказа в целом [5]. Для северных склонов Западного Кавказа характерны обстановки растяжения [6]. На северном склоне Западного Кавказа, проявлена система трёх моноклинальных хребтов, параллельных главному хребту [1].

Актуальность исследования. В связи с характерным рельефом северо-западной части Кавказа, в которой наблюдаются новейшие тектонические структуры, характерные для зон растяжения, возникает задача выяснения влияния условий растяжения на структуру и рельеф склона поднятия, сформированного под воздействием плюма малой тепловой мощности. С этой задачей тесно связана другая – об условиях образования нарушений сплошности (разрывов) склона поднятия. Анализ имеющейся литературы по поднятиям поверхности показал, что вышеуказанные задачи, несмотря на их важное значение для понимания глубинных геодинамических механизмов формирования структуры и рельефа склонов поднятий, пока остаются нерешёнными.

Объект исследования – склоны поднятий земной поверхности. **Предмет исследования** – структурное воздействие мантийных плюмов малой тепловой мощности (плюмов, не достигших поверхности) на склоны поднятий.

Целью исследования является установление условий, при которых создаются течения в высоковязком склоне поднятия и определение основных сил, вызывающих образование разрывов склона и формирование его структуры.

Задачи исследования – определить гидродинамическую структуру течения, создающегося в условиях горизонтального градиента давления в высоковязком склоне поднятия; найти условия, в которых создаются растягивающие напряжения в склоне поднятия; определить основные силы, действующие на склон поднятия, находящийся в состоянии растяжения, и найти их величины; на основе экспериментальных исследований и теоретического анализа истечения жидкости из сосуда прямоугольного сечения выяснить, как взаимодействие процессов раздвижения блоков и заполнения свободного объё-

ма между блоками сказывается на структуре склона поднятия.

Методология исследования основана на системном подходе к объекту исследования как к вязкоупругой среде, структура которой изменяется под воздействием плюмов малой тепловой мощности. **Методы исследования:** основной метод, применяемый для исследования движений в склоне поднятия, и сил, вызывающих эти движения и формирующих структуру склона, – метод моделирования, как лабораторного (физического), так и теоретического. Кроме того, для решения поставленных задач исследования применялись информационный анализ, методы обобщения и сопоставительного анализа.

В настоящей статье представлены результаты лабораторного и теоретического моделирования структуры течения, создающейся в условиях горизонтального градиента давления в высоковязком склоне поднятия, и исследуются силы, вызывающие разрывы склона поднятия и обуславливающие его структуру.

Структура вязкого течения в склоне поднятия. Рассмотрим движение в высоковязком склоне поднятия (рис. 1). Литостатическое давление на основании поднятия (при $y = 0$) уменьшается с удалением от оси главного хребта ($x = 0$), т. е. в склоне поднятия существует горизонтальный градиент давления.

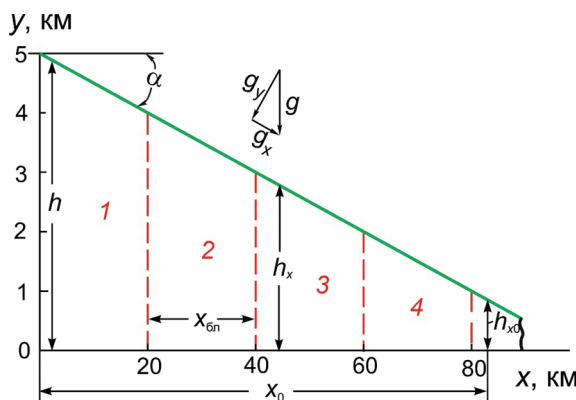


Рис. 1. Схема склона поднятия: g – гравитационное ускорение; 1–4 – блоки склона поднятия; $x_{бл}$ – горизонтальный размер блоков / **Fig. 1.** Scheme of uplift slope: g – gravitational acceleration; 1–4 – blocks of uplift slope; $x_{бл}$ – horizontal size of blocks

В условиях горизонтального градиента давления в высоковязком склоне поднятия организуются горизонтальные течения. Вязкое течение в склоне поднятия проанализируем с использованием модели течения вязкой

(ньютоновской) жидкости в слое с наклонной верхней (свободной) поверхностью. Угол наклона кровли слоя постоянный и определяется выражением $\alpha = \arctg[(h - h_{x_0})/x_0]$, где h – толщина слоя при $x = 0$, h_{x_0} – толщина слоя на удалении $x = x_0$ от его торца, имеющего координату $x = 0$. В сечении x толщина слоя h_x определяется из соотношения $h_x = h - [x(h - h_{x_0})/x_0]$.

Горизонтальный градиент давления на подошве слоя (при $y = 0$)

$$dP(x, 0)/dx = -\rho g(h - h_{x_0})/x_0, \quad (1)$$

где P – давление, ρ – плотность, g – гравитационное ускорение. При малом угле наклона верхней (свободной) границы слоя в первом приближении принимаем горизонтальный градиент давления вблизи неё постоянным. Для малых скоростей течения и высокой вязкости инерционные члены в уравнении движения пренебрежимо малы [17], и тогда уравнение движения записывается в следующем виде

$$\eta(d^2v/dy^2) = dP/dx, \quad (2)$$

где η – коэффициент динамической вязкости, v – скорость течения. Граничные условия к уравнению (2): $v = 0$ при $y = 0$; $dv/dy = 0$ при $y = h_x$. Решая уравнение (2) при вышеуказанных граничных условиях, находим скорость течения в слое

$$v = \frac{\rho g(h - h_{x_0})}{\eta x_0} \left(h_x y - \frac{y^2}{2} \right). \quad (3)$$

Тогда наибольшая скорость течения

$$v_{\max} = \rho g(h - h_{x_0})h_x^2/2\eta x_0. \quad (4)$$

Используя соотношения (3) и (4), после преобразований находим скорость течения, усреднённую по толщине слоя h_x ,

$$v_{\text{av}} = \rho g(h - h_{x_0})h_x^2/3\eta x_0. \quad (5)$$

С использованием соотношения (3) получаем касательное напряжение на подошве слоя $\tau_0 = \eta(dv/dy)_{y=0}$:

$$\tau_0 = \rho g(h - h_{x_0})h_x/x_0. \quad (6)$$

На основании геофизических данных Е. Е. Милановский заключил, что северные склоны западного крыла Кавказа характеризуются преобладанием зон растяжения [6]. Для реализации состояния растяжения скорость течения в склоне поднятия должна возрастать по мере удаления от главного хребта, что возможно с уменьшением вязко-

сти по мере увеличения горизонтальной координаты x согласно соотношениям (3)–(5). Согласно нашим оценкам при значениях параметров $h = 5 \cdot 10^3$ м, $x_0 = 8 \cdot 10^4$ м и $h_{x_0} = 10^3$ м, для осуществления на северном склоне западного Кавказа условий растяжения необходимо, чтобы на удалении от оси главного хребта динамическая вязкость была более чем в 25 раз меньше, чем у его подошвы.

На северном склоне Западного Кавказа, проявлена система трех моноклинальных хребтов, параллельных главному хребту и расположенных, соответственно, на расстояниях 40 км, 52 км и 70 км от него [1]. Наличие такой системы хребтов указывает на образование разрывов течения склона поднятия. При движении блоков склона поднятия и образовании разрывов склона образуется свободный объём между блоками. Свободный объём на основе распределения скорости течения в склоне поднятия $v(y)$, полученного с использованием соотношения (3), представлен на рис. 2. Максимальный градиент скорости dv/dy – вблизи подошвы склона, следовательно, наиболее выраженное влияние на скорость течения оказывает величина коэффициента динамической вязкости при $y = 0$.

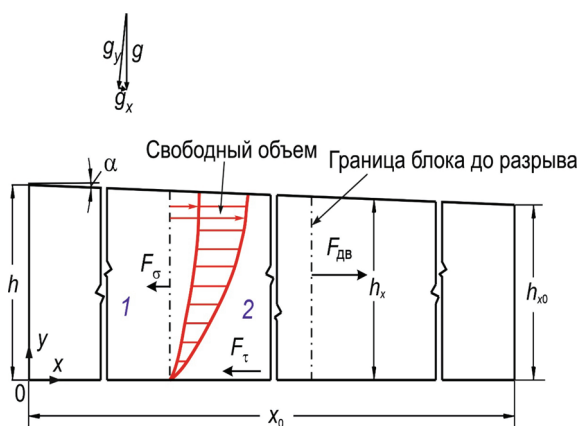


Рис. 2. Силы, действующие на блок склона поднятия при образовании разрыва: 1 и 2 – блоки склона / **Fig. 2.** Forces acting on the uplift slope block during the formation of a disruption: 1 and 2 – slope blocks

Вязкие деформации проявляются в склоне поднятия при малых и больших горизонтальных градиентах давления, или, другими словами, вязкие деформации склона не обладают порогом устойчивости. При упругих деформациях, в том случае, когда величина напряжения превышает предел прочности $\sigma_{кр}$, нарушается сплошность массива, что выражается в образовании разрыва или раз-

лома. Таким образом, для упругой деформации существует порог устойчивости. При наличии сил, действующих на вязкоупругий массив, при увеличении вязкой деформации будет возрастать и упругая деформация до величины $\sigma_{кр}$, т. е. до формирования разрыва или разлома. Таким образом, возникает блоковая структура, разделённая нарушениями сплошности склона поднятия. Итак, отсутствие порога устойчивости при вязкой деформации и наличие порога устойчивости при упругой деформации обуславливают образование блоковой структуры в процессе движения вязкоупругого склона поднятия, которое в свою очередь происходит под действием горизонтального градиента давления, возникающего при уменьшении высоты склона по мере удаления от главного хребта и убывании вязкости.

В случае слоистой структуры поднятия основание каждого блока склона представляют слои, различающиеся по вязкости. Средняя скорость течения возрастает с удалением блока от главного хребта. Упругие свойства разрыва будут проявляться по границам блоков. Как указано выше, на северном склоне поднятия Кавказа в его западном крыле имеются главный хребет и три хребта, протягивающиеся параллельно ему. Поэтому представим склон модельного поднятия состоящим из четырёх блоков, средний горизонтальный размер каждого блока $x_{бл} = 2 \cdot 10^4$ м (см. рис. 1). Определим условия формирования разрывов между блоками склона.

Условия формирования разрыва склона поднятия. Рассматривается склон поднятия, находящийся в условиях растяжения. Силы, действующие на блок склона поднятия в период образования разрыва между блоками, показаны на рис. 2. Во-первых, на блок действует сила упругой деформации разрыва F_{σ} , величина которой

$$F_{\sigma} = h_x \sigma_{кр}, \quad (7)$$

где h_x – высота склона в сечении x .

Гравитационная сила, представляющая собой движущую силу для блока склона $F_{дв}$, выражается через горизонтальный градиент давления dP/dx следующим образом: $F_{дв} = (dP/dx)h_x x_{бл} = \tau_0 x_{бл}$. С учётом равенств (1), (4) и (6), получаем

$$F_{дв} = 2v_{max} \eta x_{бл} / h_x. \quad (8)$$

На подошву блока действует сила трения F_{τ} (см. рис. 2), которую можно определить из следующего соотношения

$$F_{\tau} = 2v_{max,p} \eta x_{бл} / h_x, \quad (9)$$

где $v_{max,p}$ – скорость движения, при которой происходит разрыв склона и формируется граница между блоками.

Условие формирования разрыва между блоками записывается в виде

$$F_{\sigma} = F_{дв} - F_{\tau}. \quad (10)$$

Используя соотношения (7)–(9), из равенства (10) получаем

$$v_{\sigma} = v_{max} - v_{max,p}, \quad (11)$$

где характерная скорость

$$v_{\sigma} = \sigma_{кр} h_x / [2\eta(x_{бл}/h_x)]. \quad (12)$$

Как следует из соотношений (4) и (5), скорости течения v_{max} и $v_{ав}$ возрастают с увеличением горизонтальной координаты x , т. е. с удалением от главного хребта, и с уменьшением динамической вязкости блоков склона поднятия η . Характерная скорость v_{σ} и скорость формирования разрывов склона (разрывов между блоками) также увеличиваются с ростом координаты x и уменьшением вязкости η .

Длина блоков зависит от разности их наибольших скоростей Δv_{max} , которая в свою очередь зависит от вязкости блоков. Обозначим блоки цифрами от 1 до 4 (см. рис. 1). Для протяжённости блоков склона $x_{бл} = 2 \cdot 10^4$ м и разности их максимальных скоростей ~ 1 мм/год принимаем коэффициенты динамической вязкости: для блока 1 – $\eta_1 = 10^{21}$ Па·с, для блока 2 – $\eta_2 = 1,2 \cdot 10^{20}$ Па·с, для блока 3 – $\eta_3 = 4 \cdot 10^{19}$ Па·с и для блока 4 – $\eta_4 = 1,2 \cdot 10^{19}$ Па·с. Кроме того, принимаем следующие значения параметров для склона поднятия: $\rho = 2900$ кг/м³, $\sigma_{кр} = 6 \cdot 10^6$ Н/м², $g = 9,8$ м/с², $h = 5 \cdot 10^3$ м, $h_{x0} = 10^3$ м и $x_0 = 8 \cdot 10^4$ м.

Высоты склона поднятия h_x рассчитаны для сечений $x = 10$ км, 30 км, 50 км и 70 км с использованием соотношения $h_x = h - [x(h - h_{x0})/x_0]$. Характерная скорость v_{σ} определена по формуле (12). Скорость $v_{max,p}$ найдена из соотношения (11). Как показали вычисления, отношение указанных скоростей для всех блоков $v_{\sigma}/v_{max} = 0,21$. Поэтому, согласно (11), скорость течения, при которой образуется разрыв между блоками, $v_{max,p} = v_{max} - v_{\sigma} = 0,79v_{max}$.

Сила упругой деформации склона F_{σ} рассчитана по (7), движущая (гравитационная) сила $F_{дв}$ – по (8), сила трения на подошвах блоков склона F_{τ} – по (9). Величина силы упругой деформации F_{σ} уменьшается от $2,7 \cdot 10^{10}$ Н/м до $0,9 \cdot 10^{10}$ Н/м при увеличе-

нии горизонтальной координаты x от 10 км до 70 км и уменьшении высоты склона поднятия h_x от 4,5 км до 1,5 км. Величина движущей силы $F_{дв}$ возрастает от $4,3 \cdot 10^{10}$ Н/м до $12,8 \cdot 10^{10}$ Н/м с увеличением динамической вязкости блоков от $1,2 \cdot 10^{19}$ Па · с до 10^{21} Па · с (рис. 3). Отношение движущей силы к силе упругой деформации $F_{дв}/F_{\sigma} = 4,7$. Величина силы трения на подошве склона поднятия составляет $F_{\tau} = (3,4 - 10,1) \cdot 10^{10}$ Н/м для $\eta = 1,2 \cdot 10^{19} - 10^{21}$ Па · с.

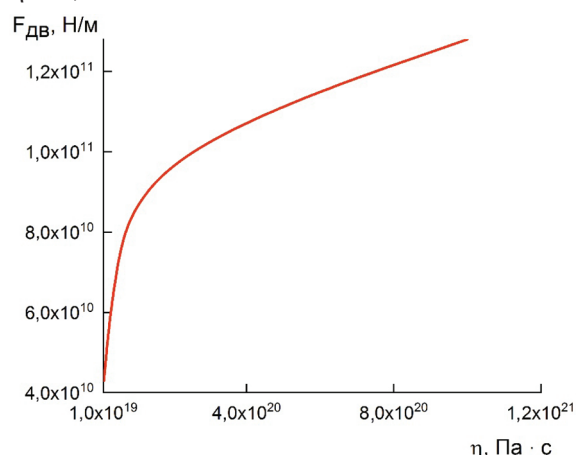


Рис. 3. Движущая (гравитационная) сила в зависимости от коэффициента динамической вязкости склона / **Fig. 3.** Driving (gravitational) force depending on the coefficient of dynamic viscosity of the slope

Моделирование процессов в области раздвижения блоков склона поднятия.

Рассмотрим процессы раздвижения границ блоков и заполнения образовавшегося свободного объёма с использованием модели вязкой (ньютоновской) жидкости для склона поднятия. При разрывах склона поднятия создаются свободные вертикальные границы блоков. Образовавшийся свободный объём между блоками возрастает из-за различия скоростей блоков. Вследствие разности плотностей блока и окружающего воздуха создаётся гравитационная сила, под воздействием которой в области границы блока организуется течение. Происходит заполнение свободного объёма между блоками породами склона. В реальных условиях заполнение свободного объёма, создающегося между блоками склона поднятия, происходит при малых числах Рейнольдса $Re = \nu h/\nu$ ($\nu = \eta/\rho$ – кинематическая вязкость), т. е. при заполнении свободного объёма имеет место ползущее течение.

Исследование течения, организующегося в склоне поднятия при образовании вер-

тикальных границ блоков склона, проводили с использованием модели, в которой реализуется истечение вязкой жидкости из прямоугольного сосуда. Прозрачный прямоугольный сосуд размерами 50 мм × 70 мм × 80 мм был заполнен вязкой жидкостью (мёдом). Измеренная вязкость мёда лежит в интервале от $4,062 \cdot 10^3$ Па · с до $4,58 \cdot 10^3$ Па · с для температуры $T = 0,5 - 5$ °С. Вертикальную свободную поверхность жидкости создавали следующим образом. Сосуд, стоящий на ровной поверхности, практически мгновенно переводили в положение, при котором горизонтальная свободная поверхность мёда размерами 50 мм × 70 мм становилась вертикальной. В этих условиях начиналось истечение жидкости из сосуда на горизонтальную поверхность. Производилась видеосъёмка истечения при различных температурах жидкости.

Фотографии течения представлены на рис. 4. Эксперименты показали, что существуют два периода истечения вязкой жидкости из сосуда прямоугольного сечения. В первом периоде истечения толщина слоя вытекающей жидкости практически постоянна, и возрастает горизонтальный размер слоя (рис. 4а). Во втором периоде высота слоя уменьшается с течением времени, горизонтальный размер слоя меняется значительно слабее, чем в первом периоде (рис. 4б).

В первом периоде истечения жидкости из прямоугольного сосуда вертикальный размер свободной поверхности жидкости постоянен ($h_c = \text{const}$). Горизонтальный размер слоя вытекающей жидкости x_0 возрастает с течением времени от начального значения $x_0 = x_n$ до конечного значения $x_0 = x_k$. В наших экспериментах время первого периода истечения составляет $t_n = 111$ с. Выражение для средней скорости истечения вязкой жидкости из прямоугольного сосуда v_{av} в первом периоде было получено на основе соотношения для среднего горизонтального градиента давления в слое жидкости:

$$v_{av} = \rho g h_c^2 (\ln X_k + 1,9) / 24 \eta X_k, \quad (13)$$

где $X_k = x_k/h_c = 2x_1/h_c$ и x_1 – величина, сравнимая с длиной сосуда.

Время истечения для первого периода t_n определено, исходя из равенства количества жидкости, протекающей в сечении $x = x_0/2$ за это время, количеству жидкости, вытекающей из сосуда,

$$t_n = x_1 / 2v_{av}. \quad (14)$$

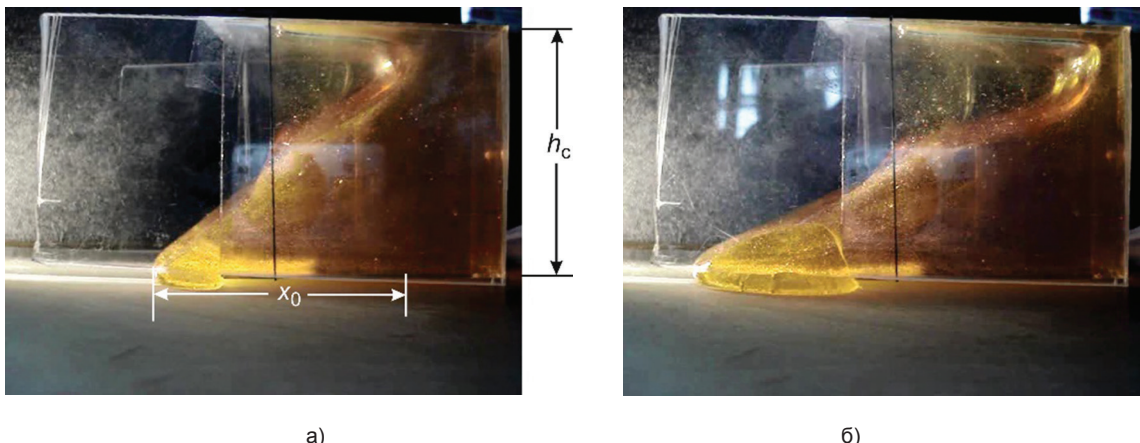


Рис. 4. Истечение вязкой жидкости из сосуда прямоугольного сечения. В момент времени $t = 0$ создается свободная вертикальная поверхность жидкости, после чего свободная поверхность приходит в движение. Картина течения в моменты времени: а – $t = 67$ с; б – $t = 125$ с / **Fig. 4.** The outflow of a viscous liquid from a rectangular vessel. A free vertical surface of the liquid is created at the time $t = 0$, whereupon the free surface begins to move. Flow pattern for times: а – $t = 67$ s; б – $t = 125$ s

Переходя к рассмотрению движений в склоне поднятия, оценим время первого периода t_n после образования вертикальной свободной поверхности (разрыва поднятия) и свободного объёма между блоками склона. Как следует из лабораторного моделирования, в первом периоде толщина слоя практически постоянна, длина слоя x_0 возрастает во времени. Средняя скорость течения в первом периоде v_{av} и время t_n были вычислены соответственно с использованием соотношений (13) и (14) для различных коэффициентов динамической вязкости для следующих значений параметров склона поднятия: $h = 3 \cdot 10^3$ м, $x_k = (3-6) \cdot 10^3$ м и $\rho = 2900$ кг/м³.

Зависимость скорости v_{av} и времени t_n от горизонтального размера для течения материала склона x_k для различных значений динамической вязкости представлена на рис. 5. Как видно из рисунка, средняя скорость течения v_{av} уменьшается с ростом горизонтального размера x_k . С уменьшением вязкости скорость v_{av} возрастает. Время t_n возрастает с увеличением динамической вязкости η . Так, для $\eta = 5 \cdot 10^{19}$ Па·с время $t_n = 117-344$ тыс. лет, и для $\eta = 5 \cdot 10^{20}$ Па·с время $t_n = 1,18-3,46$ млн лет.

Время существования склона поднятия Кавказа $t_k \sim 10$ млн лет [3]. Следовательно для второго периода время $t_b = t_k - t_n$. Проанализируем процессы, происходящие в области раздвижения блоков. В первом приближении принимаем $h_{x_0} \approx 0$, т. е. берём толщину слоя $h - h_{x_0} \approx h$. С учётом соотношения (5) получаем среднюю скорость течения во втором

периоде истечения, т. е. периоде, когда толщина слоя со временем уменьшается:

$$U_b = \rho g h^3 / 3 \eta x_{02}, \tag{15}$$

где x_{02} – горизонтальный размер слоя жидкости. Тогда средняя скорость течения в том случае, когда толщина слоя уменьшается до значения $h = 0$:

$$U_{av} = \frac{1}{h} \int_0^h U_b dv = \rho g h^3 / 12 \eta x_{02}. \tag{16}$$

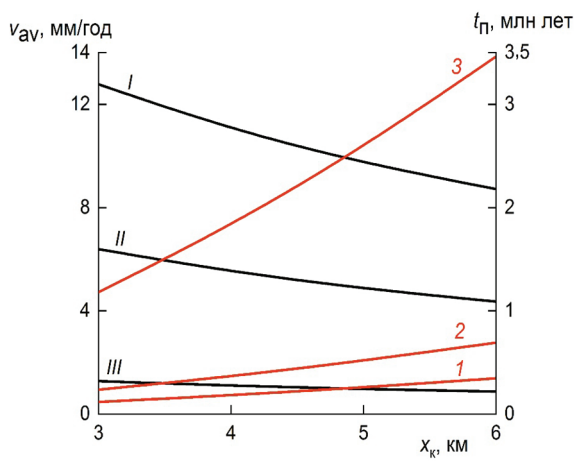


Рис. 5. Средняя скорость течения в склоне поднятия и время t_n в зависимости от горизонтального размера x_k : I, 1 – $\eta = 5 \cdot 10^{19}$ Па·с; II, 2 – $\eta = 10^{20}$ Па·с; III, 3 – $\eta = 5 \cdot 10^{20}$ Па·с / **Fig. 5.** The average flow velocity in the uplift slope and the time t_n depending on the horizontal size x_k : I, 1 – $\eta = 5 \cdot 10^{19}$ Pa·s; II, 2 – $\eta = 10^{20}$ Pa·s; III, 3 – $\eta = 5 \cdot 10^{20}$ Pa·s

Если толщина слоя $h_{xap} = 0,63h$, то из соотношений (15) и (16) вытекает, что $U_b = U_{av}$. Таким образом, для характерной высоты

склона поднятия $h_{\text{хар}} = 0,63h$ свободный объём между блоками склона равен объёму высоковязкого материала склона, поступающего в пространство между блоками. Таким образом, происходит заполнение свободного пространства в области разлома склона. Понижение уровня свободной поверхности склона при расхождении блоков склона будет равно $\Delta h_{\text{скл}} = h_x - h_{\text{хар}}$, и, следовательно

$$\Delta h_{\text{скл}} = 0,37h_x \quad (17)$$

Средняя скорость раздвижения двух блоков склона: $\Delta v_{\text{ав}} = v_{\text{ав,бп2}} - v_{\text{ав,бп1}}$. Из соотношений (5) и (16) находим отношение средних скоростей раздвижения блоков и заполнения свободного объёма между ними:

$$\Delta v_{\text{ав}} / U_{\text{ав}} = x_{\text{оп}} / x_0, \quad (18)$$

где $x_{\text{оп}}$ – длина области опускания свободной поверхности склона между расходящимися блоками, или, другими словами, протяжённость депрессии, образующейся в склоне поднятия. Оценки на основе соотношения (18) для значений $x_0 = 10^5$ м и $x_{\text{оп}} = 7 \cdot 10^2 - 10^4$ м показывают, что $\Delta v_{\text{ав}} / U_{\text{ав}} \ll 1$, т. е., $U_{\text{ав}} \gg \Delta v_{\text{ав}}$.

Увеличение свободного объёма между расходящимися блоками $V_{\text{расх}}$ за время t определяется равенством: $V_{\text{расх}} = \Delta v_{\text{ав}} h_x t$. Свободный объём, сформировавшийся в склоне поднятия вследствие опускания свободной поверхности склона, $V_{\text{св}} = x_{\text{оп}} \Delta h_{\text{скл}}$. Вследствие заполнения свободного объёма между блоками, уровень свободной поверхности склона понижается на величину Δh_x и горизонтальный размер образовавшейся впадины $x_{\text{оп}}$ увеличивается с течением времени. За небольшое в геологическом смысле время может быть достигнут квазистационарный режим, при котором $V_{\text{расх}} = V_{\text{св}}$. Исходя из этого равенства и с учётом соотношения (17), получаем протяжённость депрессии склона

$$x_{\text{оп}} = 2,7 \Delta v_{\text{ав}} t. \quad (19)$$

Вычисления параметров склона поднятия были выполнены при следующих значениях: $\rho = 2,9 \cdot 10^3$ кг/м³, $h = 5 \cdot 10^3$ м, $h_{x0} = 10^3$ м, $x_0 = 8 \cdot 10^4$ м, $x_{\text{оп}} = 2 \cdot 10^4$ м и $\sigma_{\text{кр}} = 6 \cdot 10^6$ Н/м². Средняя скорость раздвижения блоков $\Delta v_{\text{ав}} = v_{\text{ав2}} - v_{\text{ав1}}$ рассчитана по соотношению (5). С использованием результатов вычислений была представлена структура склона поднятия (рис. 6а). В масштабе рисунка представлены профили скорости $v(y)$ для границ блоков, образующихся за время t . Отметим, что построенные профили скорости соответствуют случаю, когда нет заполнения высоковязкими породами свободного объёма между расходящимися блоками склона. Дли-

на областей понижения поверхности склона $x_{\text{оп}}$ найдена с использованием равенства (19). Сами области понижения построены, исходя из значений глубины $\Delta h_{\text{скл}}$ (17).

Вычисления показали, что с увеличением возраста склона поднятия происходит смещение областей образовавшихся опусканий поверхности склона к подножию поднятия. Протяжённость областей понижения поверхности увеличивается со временем. Строение склона поднятия контролируется первоначальным расположением разломов между блоками склона поднятия и числом создавшихся блоков, которые в свою очередь задаются изменением вязкости у подошвы поднятия. В. В. Белоусов указывает, что возраст поднятия Кавказа может составлять ~ 10 млн лет [3]. Как можно видеть из рис. 6а, для времени $t = 7$ млн лет происходит образование структур типа возвышений (хребтов) на склоне поднятия. Наблюдается качественное соответствие результатов моделирования реальному профилю склона поднятия Северо-Западного Кавказа (рис. 6б). На профиле (рис. 6б) в окрестности осевой части поднятия проявлен Главный хребет. Далее к северу от него наблюдается рельеф, представленный поднятиями (хребтами), параллельными Главному хребту, чередующимися с областями понижения (депрессиями) склона поднятия [9]. Аналогичный характерный рельеф имеет место и для центральной части Кавказа [2].

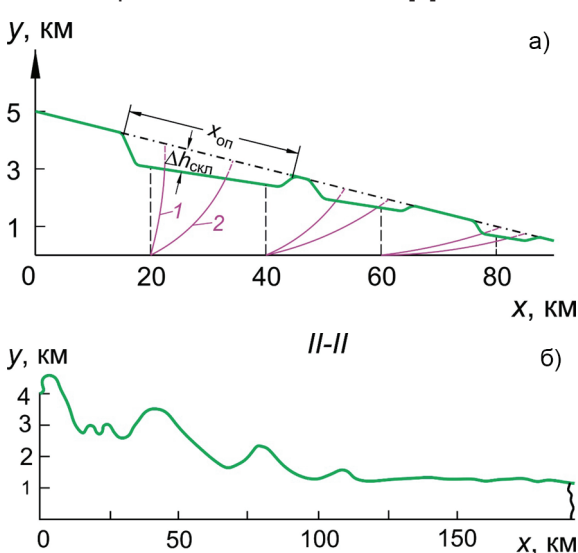


Рис. 6. Структура склона поднятия: а – схема склона поднятия для времени $t = 7$ млн лет; 1, 2 – профили скорости $v(y)$; б – рельеф склона поднятия северо-западного Кавказа (по [9], с изменениями) / **Fig. 6.** Uplift slope structure: а – scheme of the uplift slope for the time $t = 7$ Ma; 1, 2 – velocity profiles $v(y)$; б – uplift slope relief of the north-western Caucasus (according to [9], with modifications)

Выводы. Проведено исследование геодинамических процессов, протекающих в склонах поднятий поверхности, сформированных деятельностью мантийных плюмов малой мощности, создающихся на границе ядро-мантия. Литостатическое давление на основании поднятия уменьшается с удалением от оси главного хребта, и следовательно, в склоне поднятия существует горизонтальный градиент давления. При наличии горизонтального градиента давления в высоковязком склоне поднятия организуются горизонтальные течения. Скорость течения в склоне поднятия изменяется прямо пропорционально квадрату высоты склона h_x и обратно пропорционально его динамической вязкости.

Движущей силой, действующей на блок склона, находящийся в состоянии растяжения, является гравитационная сила, обусловленная горизонтальным градиентом давления в склоне. Разрыв течения склона поднятия (разрыв между блоками) образует-

ся, когда величина силы упругой деформации разрыва равна разности величин движущей силы и силы трения на подошве склона. Отношение движущей силы к силе упругой деформации разрыва является постоянным числом и составляет 4,7.

Процессы, происходящие в области раздвижения блоков склона поднятия, проанализированы с использованием данных лабораторного и теоретического моделирования истечения вязкой жидкости из прямоугольного сосуда. Как показали наши оценки, средняя скорость заполнения свободного объема намного больше средней скорости расхождения блоков. Основные закономерности формирования структуры склона поднятия определяются взаимосвязью процессов раздвижения и заполнения свободного пространства между блоками склона. Обнаружено качественное соответствие структуры склона поднятия, полученной при моделировании, профилю склона поднятия для северо-западной части Кавказа.

Список литературы

1. Асоян Д. С., Петрушина М. Н., Хаин В. Е. Большой Кавказ // Большая российская энциклопедия. Электронная версия. 2016. URL: <https://old.bigenc.ru/geography/text/1877178> (дата обращения: 31.10.2023). Текст: электронный.
2. Астамирова М. А.-М., Тайсумов М. А., Атаев З. В., Байбатырова Э. Р. Физико-географические условия формирования растительного покрова альпийского пояса высокогорных ландшафтов Центрального и Восточного Кавказа // Известия Дагестанского государственного педагогического университета. 2021. Т. 15, № 2. С. 35–45. DOI: 10.31161/1995-0675-2021-15-2-35-45.
3. Белоусов В. В. Основы геотектоники. М.: Недра, 1989. 382 с.
4. Гурбанов А. Г., Богатиков О. А., Докучаев А. Я., Газеев В. М., Лексин А. Б., Ляшенко О. В. Транскавказское направление вулканизма: причина, следствия и эпитептермальная минерализация // Вестник Владикавказского научного центра. 2007. Т. 7, № 3. С. 25–44.
5. Лукк А. А., Шевченко В. И. Сейсмичность, тектоника и GPS-геодинамика Кавказа // Физика Земли. 2019. № 4. С. 99–123. DOI: <https://doi.org/10.31857/S0002-33372019499-123>.
6. Милановский Е. Е. Новейшая тектоника Кавказа. М.: Недра, 1968. 483 с.
7. Несмеянов С. А., Воейкова О. А., Комаревская М. Н. Неоструктурное районирование Российской части Центрального сегмента мегасвода Большого Кавказа (опережающие исследования для инженерных изысканий) // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология. 2023. № 1. С. 3–20. DOI: 10.31857/S0869780923010083.
8. Несмеянов С. А., Никитин М. Ю., Воейкова О. А., Комаревская М. Н. Неоструктурное районирование Российской части Казбекского сегмента мегасвода Большого Кавказа // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология. 2023. № 3. С. 5–14. DOI: 10.31857/S0869780923030086.
9. Сафронов И. Н. Геоморфология Северного Кавказа. Ростов н/Д.: Изд-во Ростов. ун-та, 1969. 218 с.
10. Bergman S. C., Eldrett J. S., Minisini D. Phanerozoic large igneous province, petroleum system, and source rock links // Large igneous provinces: A driver of global environmental and biotic changes. Geophysical Monograph 255 / eds R. E. Ernst, A. J. Dickson, A. Bekker. Hoboken: Wiley, Washington: American Geophysical Union, 2020. P. 191–228. DOI: 10.1002/9781119507444.ch9.
11. Choudhuri M., Nemčok M. Mantle plumes and their effects. Cham: Springer, 2017. 137 p. DOI: 10.1007/978-3-319-44239-6.
12. Göğüş O. H. Geodynamic experiments suggest that mantle plume caused Late Permian Emeishan large igneous province in Southern China // International Geology Review. 2020. DOI: 10.1080/00206814.2020.1855602.
13. Heron P. J. Mantle plumes and mantle dynamics in the Wilson cycle // Fifty years of the Wilson cycle concept in plate tectonics / eds R. W. Wilson, G. A. Houseman, K. J. W. McCaffrey, A. G. Doré, S. J. H. Buiter. London: Geological Society Special Publications. 2019. Vol. 470. P. 87–103. DOI: 10.1144/sp470-2018-97.

14. Kirdyashkin A. A., Kirdyashkin A. G. Conditions for the formation of uplift by a plume that has not reached the surface // *Geotectonics*. 2022. Vol. 56, no. 6. P. 781–790. DOI: 10.1134/S0016852122060048.
15. Kirdyashkin A. G., Kirdyashkin A. A. Mantle thermochemical plumes and their influence on the formation of highlands // *Geotectonics*. 2015. Vol. 49, no. 4. P. 332–341. DOI: 10.1134/S0016852115040032.
16. Niu Y. On the cause of continental breakup: A simple analysis in terms of driving mechanisms of plate tectonics and mantle plumes // *Journal of Asian Earth Sciences*. 2020. Vol. 194. 104367. DOI: 10.1016/j.jseaes.2020.104367.
17. Schlichting H., Gersten K. *Boundary-layer theory*. Berlin; Heidelberg: Springer, 2017. 805 p.

References

1. Asoyan D. S., Petrushina M. N., Khain V. E. The Greater Caucasus. Great Russian Encyclopedia. Electronic version. 2016. Web. 31.10.2023. <https://old.bigenc.ru/geography/text/1877178>. (In Rus.).
2. Astamirova M. A.-M., Taysumov M. A., Ataev Z. V., Baybatyrova E. R. Physical and geographical conditions of vegetation cover formation in the Alpine belt of high mountain landscapes in the Central and Eastern Caucasus. *Dagestan State Pedagogical University Journal. Natural and Exact Sciences*, vol. 15, no. 2, pp. 35–45, 2021. DOI: 10.31161/1995-0675-2021-15-2-35-45. (In Rus.).
3. Belousov V. V. *Fundamentals of geotectonics*. Moscow: Nedra, 1989. (In Rus.).
4. Gurbanov A. G., Bogatkov O. A., Dokuchaev A. Ya., Gazeev V. M., Lexin A. B., Lyashenko O. V. Transcaucasian direction of volcanism: cause, consequences and epithermal mineralization. *Bulletin of Vladikavkaz Scientific Center*, vol. 7, no. 3, pp. 25–44, 2007. (In Rus.).
5. Lukk A. A., Shevchenko V. I. Seismicity, tectonics, and GPS geodynamics of the Caucasus. *Fizika Zemli*, no. 4, pp. 99–123, 2019. DOI: <https://doi.org/10.31857/S0002-33372019499-123>. (In Rus.).
6. Milanovsky E. E. *Neotectonics of Caucasus*. Moscow: Nedra, 1968. (In Rus.).
7. Nesmeyanov S. A., Voeikova O. A., Komarevskaya M. N. Neostuctural zoning of the Russian part of the Greater Caucasus megavault, the Central segment (advanced studies for engineering survey). *Geocology. Engineering Geology. Hydrogeology. Geocryology*, no. 1, pp. 3–20, 2023. DOI: 10.31857/S0869780923010083. (In Rus.).
8. Nesmeyanov S. A., Nikitin M. Yu., Voeikova O. A., Komarevskaya M. N. Neostuctural zoning of the Russian part of the Kazbek segment of the Greater Caucasus megavault. *Geocology. Engineering Geology. Hydrogeology. Geocryology*, no. 3, pp. 5–14, 2023. DOI: 10.31857/S0869780923030086. (In Rus.).
9. Safronov I. N. *Geomorphology of the North Caucasus*. Rostov-on-Don: Rostov State University Publishing House, 1969. (In Rus.).
10. Bergman S. C., Eldrett J. S., Minisini D. Phanerozoic large igneous province, petroleum system, and source rock links. In: *Large igneous provinces: A driver of global environmental and biotic changes*. Geophysical Monograph 255. Eds R. E. Ernst, A. J. Dickson, A. Bekker. Hoboken: Wiley, Washington: American Geophysical Union, 2020. DOI: 10.1002/9781119507444.ch9. (In Eng.).
11. Choudhuri M., Nemčok M. *Mantle plumes and their effects*. Cham: Springer, 2017. DOI: 10.1007/978-3-319-44239-6. (In Eng.).
12. Göğüş O. H. Geodynamic experiments suggest that mantle plume caused Late Permian Emeishan large igneous province in Southern China. *International Geology Review*, 2020. DOI: 10.1080/00206814.2020.1855602. (In Eng.).
13. Heron P. J. Mantle plumes and mantle dynamics in the Wilson cycle. In: *Fifty years of the Wilson cycle concept in plate tectonics*. Eds R. W. Wilson, G. A. Houseman, K. J. W. McCaffrey, A. G. Doré, S. J. H. Buiter. Vol. 470. London: Geological Society Special Publications. DOI: 10.1144/sp470-2018-97. (In Eng.).
14. Kirdyashkin A. A., Kirdyashkin A. G. Conditions for the formation of uplift by a plume that has not reached the surface. *Geotectonics*, vol. 56, no. 6, pp. 781–790, 2022. DOI: 10.1134/S0016852122060048. (In Eng.).
15. Kirdyashkin A. G., Kirdyashkin A. A. Mantle thermochemical plumes and their influence on the formation of highlands. *Geotectonics*, vol. 49, no. 4, pp. 332–341, 2015. DOI: 10.1134/S0016852115040032. (In Eng.).
16. Niu Y. On the cause of continental breakup: A simple analysis in terms of driving mechanisms of plate tectonics and mantle plumes. *Journal of Asian Earth Sciences*, vol. 194, 2020. DOI: 10.1016/j.jseaes.2020.104367. (In Eng.).
17. Schlichting H., Gersten K. *Boundary-layer theory*. Berlin; Heidelberg: Springer, 2017. (In Eng.).

Информация об авторах

Кирдяшкин Алексей Анатольевич, д-р геол.-минерал. наук, профессор РАН, зав. лабораторией физического и химического моделирования геологических процессов, Институт геологии и минералогии им. В. С. Соболева СО РАН, г. Новосибирск, Россия; aak@igm.nsc.ru; <https://orcid.org/0000-0002-9873-4533>. Область научных интересов: лабораторное и теоретическое моделирование геодинамических процессов, тектонофизика, геотектоника.

Кирдяшкин Анатолий Григорьевич, д-р техн. наук, ведущий научный сотрудник лаборатории физического и химического моделирования геологических процессов, заслуженный деятель науки РФ, лауреат Государственной премии РФ, Институт геологии и минералогии им. В. С. Соболева СО РАН, г. Новосибирск, Россия; <https://orcid.org/0000-0002-8398-7202>. Область научных интересов: лабораторное и теоретическое моделирование геологических процессов, сочетание геодинамического и петрологического моделирования, использование законов и методов теплофизики в задачах геодинамики, рост кристаллов.

Information about the authors

Kirlyashkin Aleksey A., doctor of geology and mineralogy sciences, professor, Russian Academy of Sciences, chief of the Laboratory of Physical and Chemical Modeling of Geological Processes, V. S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy SB RAS, Novosibirsk, Russia; aak@igm.nsc.ru; <https://orcid.org/0000-0002-9873-4533>. Research interests: laboratory and theoretical modeling of geodynamic processes, tectonophysics, geotectonics.

Kirlyashkin Anatoly G., doctor of technical sciences, leading researcher, Laboratory of Physical and Chemical Modeling of Geological Processes, honored scientist of the Russian Federation, State prize of the Russian Federation laureate, V. S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy SB RAS, Novosibirsk, Russia; <https://orcid.org/000-0002-8398-7202>. Research interests: laboratory and theoretical modeling of geological processes, combination of geodynamic and petrologic modeling, application of principles and methods of thermophysics to geodynamic problems, crystal growth.

Вклад авторов в статью

А. А. Кирдяшкин – разработка идеи исследования, проведение экспериментального и теоретического моделирования, выполнение вычислений, обработка и анализ результатов, написание текста, формулировка выводов.

А. Г. Кирдяшкин – разработка идеи исследования, проведение экспериментального моделирования, консультации по теоретическому моделированию, анализ результатов исследования.

The authors' contribution to the article

A. A. Kirlyashkin – development of the research idea, conducting experimental and theoretical modeling, processing and analysis of the experimental results, performing calculations, writing the text, formulating conclusions.

A. G. Kirlyashkin – development of the research idea, experimental modeling, consultations on theoretical modeling, analysis of research results.

Для цитирования

Кирдяшкин А. А., Кирдяшкин А. Г. Склоны поднятий земной поверхности: структурное воздействие мантийных плюмов малой тепловой мощности // Вестник Забайкальского государственного университета. 2023. Т. 29, № 4. С. 8–18. DOI: 10.2109/2227-9245-2023-29-4-8-18.

For citation

Kirlyashkin A. A., Kirlyashkin A. G. Slopes of Uplifts Of The Earth's Surface: Structural Impact of Mantle Plumes of Low Thermal Power // Transbaikal State University Journal. 2023. Vol. 29, no. 4. P. 8–18. DOI: 10.2109/2227-9245-2023-29-4-8-18.