

Научная статья

УДК 551.2:551.14:532.5

DOI: 10.21209/2227-9245-2025-31-4-27-39

**Параметры мантийного термохимического плюма как факторы формирования
Таримской крупной магматической провинции****Алексей Анатольевич Кирдяшкин¹, Валерий Элимович Дистанов²,
Софья Викторовна Банушкина³, Зоя Фридриховна Голицына⁴**¹Новосибирское высшее военное командное ордена Жукова училище, г. Новосибирск, Россия^{2,3,4}Институт геологии и минералогии им. В. С. Соболева СО РАН, г. Новосибирск, Россия¹aakir@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9873-4533>²dist@igm.nsc.ru, <https://orcid.org/0009-0005-7584-3787>³banushkinasv@igm.nsc.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5676-2851>⁴zoe.zhurko@igm.nsc.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3222-9139>

В статье для имеющихся геолого-геофизических данных о продолжительности излияний и объёме излившегося базальтового расплава найдены основные параметры Таримского плюма. Актуальность исследования обусловлена необходимостью определения возможной структуры и основных параметров мантийного плюма, ответственного за формирование Таримской крупной магматической провинции (далее – ТКМП) (Северо-Западный Китай). Объект исследования – мантийный термохимический плюм, ответственный за образование ТКМП. Цель исследования – выявить тепловую и гидродинамическую структуру Таримского мантийного термохимического плюма и определить основные его формирующие факторы. Для выяснения тепловой и гидродинамической структуры Таримского плюма и определения его основных параметров применён метод теплофизического моделирования. На основе результатов лабораторного и теоретического моделирования предложена схема развития головы плюма, достигшего «тугоплавкого» слоя в литосфере. Тепло сообщается каналом плюма «тугоплавкому» слою, тем самым обеспечивая подплавление литосферного горизонта вдоль его подошвы. Вследствие такого подплавления формируется грибообразная голова плюма. Представлены формулы для тепловой мощности и диаметра канала плюма, балансовое соотношение для тепловых потоков в голове плюма, на основе которого найдена формула для диаметра головы плюма. Модель мантийного термохимического плюма, представленная в настоящей работе, применена для нахождения базовых параметров мантийного плюма, ответственного за формирование ТКМП. Параметры Таримского плюма определены на основе полученных нами данных лабораторного и теоретического моделирования с использованием имеющихся геолого-геофизических данных о площади магматического ареала, объёмах магматизма и продолжительности излияний базальтового расплава плюма ТКМП. Впервые получены основные параметры Таримского плюма: тепловая мощность $N = (1,7-6,8) \cdot 10^{11}$ Вт, относительная тепловая мощность $Ka = 16,3-48,8$ и диаметр канала плюма $d = 43-87$ км. Показано, что данные значения соответствуют параметрам плюма большой тепловой мощности, способного создать крупную магматическую провинцию. На основании полученных результатов представлена позиция Таримского плюма на диаграмме геодинамических режимов. Оценены время и скорость подъёма вторичного плюма в «тугоплавком» слое литосферы. Найдены величины динамической вязкости «тугоплавкого» слоя, при которых достигается величина площади головы Таримского плюма, соответствующая имеющимся геологическим оценкам магматического ареала платобазальтов Таримского мантийного термохимического плюма.

Ключевые слова: мантийный термохимический плюм, канал плюма, голова плюма, свободноконвективные течения, расплав, Таримская крупная магматическая провинция, тепловая мощность, диаметр канала, вторичный плюм, «тугоплавкий» слой, диаграмма режимов, объём излияний, динамическая вязкость

Финансирование: работа выполнена по государственному заданию Института геологии и минералогии им. В. С. Соболева СО РАН (№ 122041400057-2).

Для цитирования

Кирдяшкин А. А., Дистанов В. Э., Банушкина С. В., Голицына З. Ф. Параметры мантийного термохимического плюма как факторы формирования Таримской крупной магматической провинции // Вестник Забайкальского государственного университета. 2025. Т. 31, № 4. С. 27–39. DOI: 10.21209/2227-9245-2025-31-4-27-39



Original article

Parameters of the Mantle Thermochemical Plume
as Formation Factors of the Tarim Large Igneous ProvinceAlexey A. Kirdyashkin¹, Valery E. Distanov², Sofia V. Banushkina³, Zoia F. Golitsyna⁴¹Novosibirsk Higher Military Command School of the Order of Zhukov, Novosibirsk, Russia^{2,3,4}V. S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy SB RAS, Novosibirsk, Russia¹aakir@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9873-4533>²dist@igm.nsc.ru, <https://orcid.org/0009-0005-7584-3787>³banushkinasv@igm.nsc.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5676-2851>⁴zoe.zhurko@igm.nsc.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3222-9139>

In the article, the main parameters of the Tarim plume are found for the available geological and geophysical data on the eruption duration and the eruption volume. The relevance of the study is dictated by the need to determine the possible structure and main parameters of the mantle plume responsible for the formation of the Tarim large igneous province (Northwest China). The object of the study is a mantle thermochemical plume responsible for the formation of the Tarim large igneous province. The aim of the study is to determine the thermal and hydrodynamic structure of the Tarim mantle thermochemical plume and to determine the main formation factors of the Tarim large igneous province. The method of thermophysical modeling is applied to clarify the thermal and hydrodynamic structure of the Tarim plume and determine its main parameters. A diagram of a plume head development along a "refractory" layer in the lithosphere is shown on the basis of results of laboratory (physical) modeling and theoretical analysis. The heat from the plume conduit is transferred to the "refractory" layer thereby ensuring the melting of the lithospheric horizon along its base. As a result of this melting, a mushroom-shaped plume head is formed. The formulae for the thermal power and the plume conduit diameter of the plume conduit are presented. The thermal balance in the plume is presented and the formula for the diameter of the plume head of the plume is found based on it. The relation for the plume head diameter is found. The model of the mantle thermochemical plume responsible for the LIP formation presented in this article is used to determine the main parameters of the mantle plume responsible for the formation of the Tarim LIP. The parameters of this plume are determined based on our laboratory and theoretical modeling using the available geological and geophysical data on the magmatic area, the volume of magmatism and the eruption duration of the basalt melt of the Tarim LIP plume. The main parameters of the Tarim plume are as follows based on the laboratory and theoretical modeling: the thermal power $N = (1.7-6.8) \cdot 10^{11}$ W, the relative thermal power $Ka = 16.3-48.8$ and the plume conduit diameter $d = 43-87$ km. It is shown that these values correspond to the parameters of a high-power plume responsible for LIP formation. Based on the results obtained the position of the Tarim plume is shown on the diagram of geodynamic regimes of plumes. The time and the ascent velocity of the secondary plume in the "refractory" layer of the lithosphere are estimated. The values of the dynamic viscosity of the "refractory" layer have been found, at which the head area of the Tarim plume is reached, corresponding to the available geological estimates of the TLIP flood-basalt area.

Keywords: mantle thermochemical plume, plume conduit, plume head, free convective flows, melt, Tarim Large igneous province, thermal power, diameter of the conduit, secondary plume, "refractory" layer, diagram of regimes, eruption volume, dynamic viscosity

Funding: the work was carried out according to the state assignment of V. S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy SB RAS (No. 122041400057-2).

For citation

Kirdyashkin A. A., Distanov V. E., Banushkina S. V., Golitsyna Z. F. Parameters of the Mantle Thermochemical Plume as Formation Factors of the Tarim Large Igneous Province // Transbaikalian State University Journal. 2025. Vol. 31, no. 4. P. 27–39. DOI: 10.21209/2227-9245-2025-31-4-27-39

Введение. Ранее показано, что плюмы, контролирующие формирование Сибирской крупной магматической провинции (далее – СКМП) и Западно-Сибирской рифтовой системы, формировались на ядро-мантийной границе, при этом излияние расплавов, образованных плюмами, происходило в условиях существования «тугоплавкого» слоя в литосфере [1; 2]. Если температура плавления слоя выше, чем в канале плюма, то такой слой считается тугоплавким [1].

В результате экспериментов обнаружено, что диаметр кровли плюма, достигшей «тугоплавкого» слоя, увеличивается относительно диаметра канала [1]. Экспериментально и теоретически показано, что «тугоплавкий» слой может существовать на глубине 100–200 км при условии, что литосферная часть мантии представлена породами дунит-гарцбургитовой серии, а также имеет место связь температуры плавления истощённой мантии и температуры расплава у кровли плюма [1; 2].

Переходя от СКМП к Таримской крупной магматической провинции (далее – ТКМП) (Северо-Западный Китай), отметим, что исследователи всё чаще задаются вопросом о глубинных факторах формирования крупных магматических провинций, в частности о формирующих факторах ТКМП [3]. Решению этого вопроса посвящена настоящая статья, в которой на основе данных теплофизического (лабораторного и теоретического) моделирования представлена модель тепловой и гидродинамической структуры мантийного термохимического плюма, взаимодействующего с «тугоплавким» слоём в литосфере, в рамках которой приведены соотношения для основных параметров мантийного плюма. С использованием этих соотношений и современных геолого-геофизических оценок площади магматического ареала, объёмов и длительности магматизма определены основные параметры плюма, ответственного за формирование ТКМП: тепловая мощность, диаметр канала, диаметр и площадь головы плюма.

Актуальность исследования. В связи с исследованиями глубинных факторов, формирующих ТКМП, возникает задача выяснения тепловой и гидродинамической структуры Таримского мантийного термохимического плюма, ответственного за создание ТКМП, а также связанная с ней вторая задача об определении базовых параметров этого плюма. Анализ имеющихся исследований ТКМП показал, что указанные задачи, несмотря на их значение для определения влияния Таримского мантийного плюма на формирование ТКМП, пока далеки от окончательного решения.

Объект исследования – мантийный термохимический плюм, ответственный за образование ТКМП (Таримский плюм).

Предмет исследования – факторы формирования ТКМП.

Цель исследования – выявить тепловую и гидродинамическую структуру Таримского мантийного термохимического плюма и определить основные формирующие факторы ТКМП.

Задачи исследования: представить модель тепловой и гидродинамической структуры мантийного термохимического плюма, ответственного за формирование ТКМП; в рамках этой модели найти базовые параметры плюма, ответственного за формирование ТКМП (тепловую мощность, диаметр канала и головы плюма, время и скорость подъёма вторичного плюма в «тугоплавком» слое литосферы), установить его геодинамический режим.

Методология исследования основана на системном подходе к объекту исследования как к каналу расплава, структура и теплообмен которого определяются интенсивностью свободно конвективных течений в расплаве. **Методом исследования** служит теплофизическое моделирование. Для решения поставленных задач исследования применяли информационный анализ, методы обобщения и сопоставительного анализа.

В основу научной аргументации исследования положены теория конвективного теплообмена, теория течения вязкой ньютоновской жидкости и теория мантийных плюмов. Способами аргументации стали ссылки на литературные источники, включающие геолого-геофизические данные о площади магматического ареала, объёмах магматизма и продолжительности излияний базальтового расплава плюма ТКМП, а также данные лабораторного и теоретического моделирования мантийных термохимических плюмов.

Разработанность темы исследования. ТКМП (Северо-Западный Китай) соотносится с деятельностью мантийного плюма [3–10]. В пределах ТКМП выделены крупные сульфидные PGE–Cu–Ni и оксидные V–Ti–Fe месторождения [11–13].

В настоящее время получены геолого-геофизические оценки площади магматического ареала и возможных объёмов магматизма ТКМП. Согласно некоторым исследованиям [14–16], площадь распространения базальтов пермского возраста в пределах ТКМП составляет более 100 000–200 000 км². Геофизические и скважинные данные позволяют предположить, что пермские базальты ТКМП распределены на площади от ~250 000 до ≥300 000 км² (рис. 1) [17–19]. По данным бурения объём Таримских базальтов оценивается как ~1,5 · 10⁵ км³ [20]. Согласно другим работам [19], объём магматических пород ТКМП составляет более 300 000 км³, из которых более 80 % приходится на платобазальты.

Основные излияния базальтов ТКМП, по-видимому, происходили в течение времени ≤5 млн лет [16; 20; 21]. В одном из исследований [22] продолжительность всей раннепермской фазы излияния базальтов Таримского бассейна оценивается ~5,5 млн лет. Предлагаются модели верхней части плюма и его взаимодействия с литосферой Тарима [7–10; 20]. Однако до настоящего времени остаётся нерешённой задача об определении возможной тепловой и гидродинамической структуры и основных параметров мантийного плюма, ответственного за формирование ТКМП.

Тепловая и гидродинамическая структура мантийного термохимического плюма, ответственного за формирование КМП. Представлена схема развития головы плюма, достигшего «тугоплавкого» слоя в литосфере на базе результатов лабораторного (физического) и теоретического моделирования (рис. 2). С учётом данных лабораторного моделирования [23] в вертикальном сечении

канал плюма является системой конвективных ячеек. На границах ячеек, где происходит сужение зон, подъёмный свободно конвективный поток переносится на противоположную стенку канала. По образующей поверхности канала располагается пограничный слой нисходящего конвективного течения. Средний диаметр сужения канала плюма $d_c = 0,5d$, где d – средний диаметр канала (и подошвы) плюма.

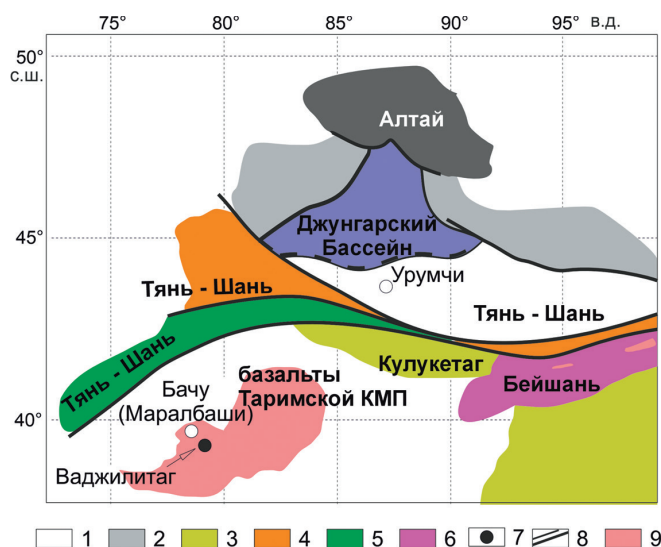


Рис. 1. Тектонические единицы и распространение раннепермских базальтов в Северном Синьцзяне (Северо-Западный Китай) [адапт. по: 5, с изм.]: 1 – мезо-кайнозойские отложения; 2 – активная континентальная окраина; 3 – девон-каменноугольная дуга; 4 – силур-каменноугольная дуга с докембрийским фундаментом; 5 – девон-каменноугольный аккреционный комплекс; 6 – Бейшаньский пояс; 7 – магматический комплекс и ассоциирующее с ним месторождение Ваджилитаг (V-Ti-Fe); 8 – разломные/сутурные зоны; 9 – раннепермские базальты Таримской КМП и Бейшаня / **Fig. 1.** Tectonic units and distribution of Early Permian basalts in Northern Xinjiang (Northwest China) [modified after: 5]: 1 – Meso-Cenozoic sediments; 2 – active continental margin; 3 – Devonian-Carboniferous arc; 4 – Silurian-Carboniferous arc with Precambrian basement; 5 – Devonian-Carboniferous accretionary complex; 6 – Beishan area; 7 – igneous complex and associated Wajilitag (V-Ti-Fe) deposit; 8 – fault/suture zones; 9 – Early Permian basalts of the Tarim LIP and Beishan

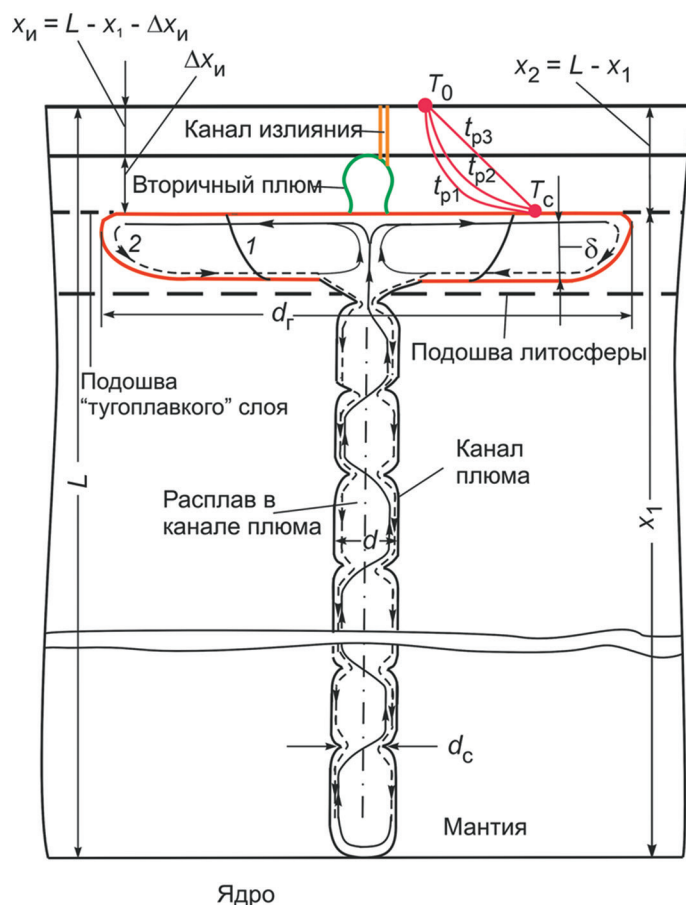


Рис. 2. Схема развития головы плюма, достигшего «тугоплавкого» слоя в литосфере, где: $x_2 = L - x_1$ – глубина залегания подошвы «тугоплавкого» слоя; Δx_{ii} – высота подъёма вторичного плюма; $x_{ii} = L - x_1 - \Delta x_{ii}$ – высота канала излияния. Представлены профили температуры по толщине x_2 в моменты времени $t_{p1} < t_{p2} < t_{p3}$. 1 и 2 – положение границы головы плюма в моменты времени t_{p1} и t_{p2} соответственно. На основе данных лабораторного (физического) моделирования [21] показаны свободноконвективные потоки в расплаве канала и головы плюма / **Fig. 2.** Diagram of the plume head growth. The plume head has reached the "refractory" layer in the lithosphere: $x_2 = L - x_1$ – the depth of the "refractory" layer sole; Δx_{ii} – the ascent height of the secondary plume; $x_{ii} = L - x_1 - \Delta x_{ii}$ – the height of the eruption conduit. The temperature profiles across the thickness x_2 are presented for times $t_{p1} < t_{p2} < t_{p3}$. 1 and 2 are the positions of the plume head border for times t_{p1} and t_{p2} respectively. Based on laboratory (physical) modeling data [21], free-convective flows in the melt of the plume conduit and the plume head are shown

Тепловая мощность источника плюма, находящегося на границе «ядро-мантия», составляет:

$$N = \Delta GC/\beta, \quad (1)$$

где $\Delta G = \rho_{\text{и}} V_{\text{и}}/t$ – массовый расход излившегося магматического расплава, образованного плюмом;

$\rho_{\text{и}}$ – плотность расплава;

$V_{\text{и}}$ – объёмный расход расплава;

C – теплоёмкость;

t – время;

β – коэффициент теплового объёмного расширения мантийного вещества.

Диаметр канала плюма составляет:

$$d = [N(av)^{1/3}/0.045\pi\lambda d_s^2 \Delta T_s^{4/3} (\beta g)^{1/3}]^{1/2}, \quad (2)$$

где a – температуропроводность расплава в канале плюма;

v – кинематическая вязкость расплава;

λ – теплопроводность расплава;

d_s – диаметр подошвы (и канала) плюма;

$\Delta T_s = (T_1 - T_{\text{пх}})/1,57$ – перепад температуры в пограничном слое вблизи подошвы плюма;

g – ускорение силы тяжести.

Относительная тепловая мощность плюма составляет:

$$Ka = N/N_1, \quad (3)$$

где $N_1 = 0,5\pi\lambda\Delta TH$ – тепловая мощность, которая в режиме стационарной теплопроводности передаётся каналом плюма в окружающую мантию;

λ – теплопроводность мантии, усреднённая по высоте канала плюма;

$\Delta T = T_{\text{пл}} - T_0$ – перепад температуры между границей канала плюма и окружающей мантией, усреднённый по высоте канала плюма;

H – высота выплавленного канала плюма.

Окружающую плюм литосферу мы рассматриваем в качестве высоковязкой ньютоновской жидкости. Канал плюма отдаёт тепло «тугоплавкому» слою, тем самым обеспечивая подплавление литосферы вдоль его подошвы. В результате формируется грибообразная голова плюма. Граница головы плюма (граница раздела «расплав/вмещающая литосфера») распространяется вдоль подошвы «тугоплавкого» слоя со скоростью v , что приводит к увеличению диаметра головы плюма d_r (см. рис. 2). При анализе тепловых потоков в голове плюма при средней толщине головы плюма, приблизительно равной диаметру ($\delta \approx d$), получаем:

$$Nt_p = \frac{\pi d_r^2 \rho d}{4} [B\varphi + C(T_{\text{пр}} - T_{\text{ом}})] + \frac{\pi d_r^2 \bar{q} t}{4}, \quad (4)$$

где Nt_p – количество тепла, отдаваемого плюмом «тугоплавкому» слою за время t_p , отсчитываемое от момента достижения плюмом подошвы «тугоплавкого» слоя.

Время t_p в соотношении (4) – это время роста грибообразной головы плюма, достигшего подошвы «тугоплавкого» слоя. Первое слагаемое в правой части равенства (4) – количество тепла, затрачиваемое на нагрев и последующее плавление окружающей литосферы, где:

ρ – плотность окружающей литосферы вблизи головы плюма;

B – теплота плавления;

φ – доля расплава в голове плюма;

C – теплоёмкость;

$T_{\text{пр}}$ – температура расплава в голове плюма;

$T_{\text{ом}}$ – температура окружающего массива литосферы.

Второе слагаемое в правой части равенства (4) – количество тепла, отдаваемого в литосферу над головой плюма, где \bar{q} – тепловой поток от кровли плюма в литосферу, усреднённый за время t_p .

Решая уравнение теплообмена в литосфере над кровлей плюма, находим тепловой поток, при этом должно соблюдаться начальное условие: в начальный момент времени $t_p = 0$ температура на подошве «тугоплавкого» слоя мгновенно изменяется от средней температуры литосферы T_1 до температуры солидуса на кровле плюма T_c . С учётом равенства (4) и полученного выражения для теплового потока \bar{q} соотношение для диаметра головы плюма примет следующий вид:

$$d_r = \left[\frac{4Nt_p}{\pi \rho d [B\varphi + C(T_{\text{пр}} - T_{\text{ом}})] + \frac{2(\pi t)^{1/2} \lambda (T_c - T_1)}{a_n^{1/2}}} \right]^{1/2}, \quad (5)$$

где a_n – температуропроводность литосферы над кровлей плюма.

Формула для площади головы плюма имеет вид $S_r = \pi d_r^2/4$.

При достижении кровлей плюма подошвы «тугоплавкого» слоя вдоль кровли происходит плавление, что ведёт к образованию на подошве указанного слоя химического вторичного плюма. Такой плюм начинает подниматься из-за разности плотностей расплава и окружающих пород. Подъём вторичного плюма от подошвы тугоплавкого слоя продолжается до уровня $\Delta x_{\text{и}}$, где происходит излияние расплава на поверхность (см. рис. 2).

Скорость и время подъёма вторичного до высоты $\Delta x_{\text{и}}$ получены с использованием

соотношения для сверхлитостатического давления в расплаве у кровли плюма при возрастании диаметра головы плюма от d до максимального $d_{r,max}$ и соотношения для сопротивления движущегося в «тугоплавком» слое вторичного плюма. Вторичный плюм рассмотрен в первом приближении как сферический. Скорость подъёма вторичного плюма в «тугоплавком» слое от подошвы до уровня Δx_i :

$$u_0 = \xi \rho_0 g x_1 \beta (T_p - T_0) r_b / 6 \eta, \quad (6)$$

где параметр ξ уменьшается от 1 до 1/3 для отношения $d/d_{r,max}$, которое в свою очередь возрастает от 0 до 1;

ρ_0 – средняя плотность вмещающей мантии;

g – ускорение силы тяжести;

β – коэффициент теплового объёмного расширения расплава в канале плюма;

T_p – температура расплава, усреднённая по высоте канала;

T_0 – средняя температура окружающего массива мантии;

$r_b = d/2$ – радиус головы вторичного плюма;

η – динамическая вязкость «тугоплавкого» слоя.

Время подъёма вторичного плюма от подошвы «тугоплавкого» слоя до уровня Δx_i рассчитывается по формуле:

$$t_b = \Delta x_i \beta \eta / \xi \rho_0 g x_1 \beta (T_p - T_0) r_b.$$

Время роста головы основного (термохимического) плюма t_p сравнимо со временем подъёма вторичного плюма t_b . Время t_b , вычисленное по соотношению (7), использовалось для определения диаметра голо-

вы плюма d_r по соотношению (5). Используя вычисленный диаметр d_r , находили площадь головы плюма S_r .

Представленная модель мантийного термохимического плюма, который регулирует формирование КМП, использована для определения основных параметров мантийного плюма, ответственного за формирование ТКМП.

Основные параметры плюма ТКМП и его геодинамический режим. Параметры плюма, ответственного за образование ТКМП, определялись по соотношениям (1)–(7) с использованием геологических данных о площади магматического ареала, объёмах магматизма и продолжительности основной фазы базальтового магматизма ТКМП. В вычислениях приняты различные объёмы излияний V_i и продолжительность излияния $t = 2, 3$ и 5 млн лет. Как и в предыдущих работах [1; 2], принимаем в наших расчётах следующие значения параметров: $\rho_0 = 4500 \text{ кг/м}^3$, $\lambda = 7 \text{ Вт/м} \cdot ^\circ\text{C}$, $\nu = 1 \text{ м}^2/\text{с}$, $C = 1200 \text{ Дж/кг} \cdot ^\circ\text{C}$, $a = \lambda/C\rho_0 = 1.3 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$, $\beta = (1 - 3) \cdot 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$, $B = 2.1 \cdot 10^5 \text{ Дж/кг}$, $\Delta T = 440 \text{ } ^\circ\text{C}$, $\Delta T_s = 10 \text{ } ^\circ\text{C}$. Плотность изверженного таримского базальта $\rho_i = 2980 \text{ кг/м}^3$ [18].

В таблице (3–6-й столбцы) помещены наши результаты расчётов для $t=5$ млн лет и $\beta = 1 \cdot 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$. Используя диаграмму геодинамических режимов плюмов [24] для описания таблицы, можно увидеть, что строки 1–3 содержат параметры плюма с грибообразной головой, создающего крупное интрузивное тело ($1,9 < Ka < 10$). Строки 4–8 соответствуют плюму большой тепловой мощности ($Ka > 10$).

Параметры Таримского плюма для $t = 5$ млн лет и $\beta = 1 \cdot 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ /
Parameters of the Tarim plume for $t = 5 \text{ Ma}$ and $\beta = 1 \cdot 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$

№ п/п	$V_i, \text{ км}^3 / V_i, \text{ км}^3$	$\Delta G, \text{ кДж/с} / \Delta G, \text{ кДж/с}$	$N, \text{ Вт} / N, \text{ Вт}$	Ka / Ka	$d, \text{ км} / d, \text{ км}$
1	18 600	352	$4,2 \cdot 10^{10}$	3,0	22
2	24 400	461	$5,5 \cdot 10^{10}$	4,0	25
3	40 000	756	$9,1 \cdot 10^{10}$	6,5	32
4	75 000	1417	$1,7 \cdot 10^{11}$	12,2	43
5	$1,0 \cdot 10^5$	1890	$2,3 \cdot 10^{11}$	16,3	50
6	$1,5 \cdot 10^5$	2835	$3,4 \cdot 10^{11}$	24,4	61
7	$2,4 \cdot 10^5$	4536	$5,4 \cdot 10^{11}$	39,1	78
8	$3,0 \cdot 10^5$	5670	$6,8 \cdot 10^{11}$	48,8	87

С возрастанием коэффициента теплового объёмного расширения тепловая мощность плюма N и, соответственно, Ka и диаметр канала плюма d уменьшаются (рис. 3). Для объёма

излившихся базальтовых магм $V_i = 1,5 \cdot 10^5 \text{ км}^3$ и продолжительности излияния $t = 5$ млн лет для коэффициента теплового объёмного расширения $\beta = (1-2) \cdot 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ тепловая мощность

¹ Объём излияний V_i (км³) (2-й столбец) для строк: 1 и 2 [14]; 3 [25]; 4 [26]; 5 [17]; 6 [20]; 7 [19]; 8 [27].

и диаметр канала плюма отвечают модели плюма большой тепловой мощности ($Ka > 10$). Для $V_{\text{и}} = 2,4 \cdot 10^5 \text{ км}^3$ и $t = 5$ млн лет тепловая мощность и диаметр соответствуют указанной модели для всех значений β из рассматриваемого интервала ($\beta = (1-3) \cdot 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$).

Как видно из таблицы (строки 5–8), для $\beta = 1 \cdot 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ объёму расплава $V_{\text{и}} \geq 105 \text{ км}^3$ соответствуют почти все варианты плюма большой тепловой мощности, для них имеем $Ka = 16,3 - 48,8$ и $d = 50 - 87 \text{ км}$.

Определено положение Таримского плюма на диаграмме геодинамических режимов (рис. 4). Таримский плюм (для $Ka = 48,8$) находится слева от позиции плюма Тунгусской синеклизы, в пределах которой сосредоточен основной объём излияний платобазальтов СКМП. Вычисления для более короткого времени излияния платобазальтов $t < 5$ млн лет, в частности для $t = 2$ млн лет, дают значения Ka и d , превышающие таковые для плюма СКМП.

Рис. 3. Тепловая мощность и диаметр канала Таримского плюма в зависимости от коэффициента теплового объемного расширения расплава в канале плюма для объёма излияний базальтов $V_{\text{и}} = 1,5 \cdot 10^5 \text{ км}^3$ и $2,4 \cdot 10^5 \text{ км}^3$ и длительности излияния $t = 5$ млн лет. 1, 3 – $V_{\text{и}} = 1,5 \cdot 10^5 \text{ км}^3$; 2, 4 – $V_{\text{и}} = 2,4 \cdot 10^5 \text{ км}^3$ / **Fig. 3.** Thermal power and diameter of the Tarim plume conduit versus the thermal volumetric expansion coefficient of the melt in the plume conduit for the basalt eruption volume $V_{\text{и}} = 1,5 \cdot 10^5 \text{ км}^3$ and $2,4 \cdot 10^5 \text{ км}^3$ and the eruption duration $t = 5$ Ma. 1, 3 – $V_{\text{и}} = 1,5 \cdot 10^5 \text{ км}^3$; 2, 4 – $V_{\text{и}} = 2,4 \cdot 10^5 \text{ км}^3$

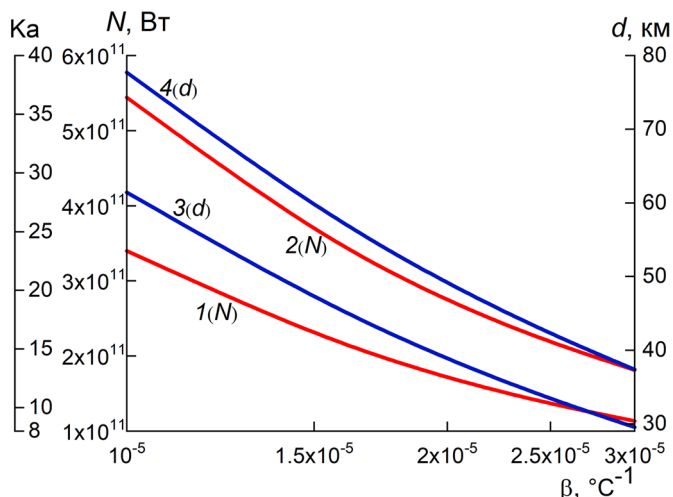
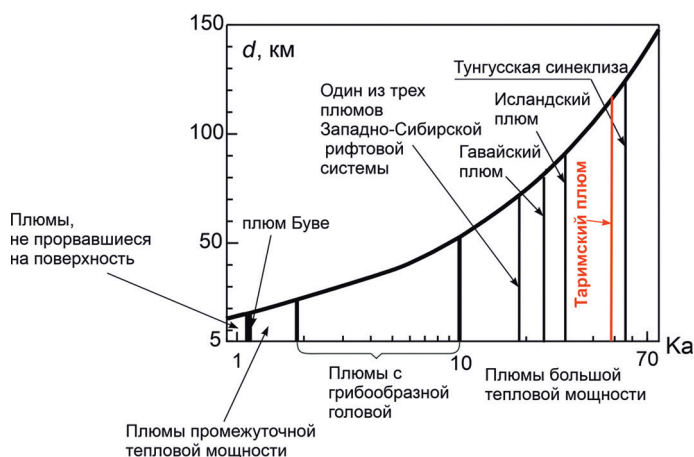


Рис. 4. Положение плюма ТКМП на диаграмме геодинамических режимов мантийных плюмов. Диаграмма режимов приведена по данным [22], с изм. $Ka = N/N_1$, $N_1 = 1,39 \cdot 10^{10} \text{ Вт}$ / **Fig. 4.** The position of the TLIP plume on the diagram of geodynamic regimes of mantle plumes. The regime diagram, modified after [22]. $Ka = N/N_1$, $N_1 = 1.39 \cdot 10^{10} \text{ W}$



Будем называть основным плюмом термохимический плюм, выплавившийся от границы «ядро-мантия» и создающий грибообразную голову вследствие плавления литосферы вдоль подошвы «тугоплавкого» слоя. Вторичный плюм поднимается в «тугоплавком слое» от подошвы до уровня $\Delta x_{\text{и}}$, достигнув которого изливается на поверхность (см. рис. 2).

В вычислениях параметров основного (Таримского) плюма и соответствующего вторичного плюма значения d и N взяты из представленной таблицы для следующих объёмов излившегося расплава: $V_{\text{и}} = 10^5 \text{ км}^3$, $1,5 \cdot 10^5 \text{ км}^3$ и $2,4 \cdot 10^5 \text{ км}^3$ (строки 5–7), приня-

тых согласно современным оценкам объёма базальтов ТКМП. В вычислениях мы принимали и очень высокие оценки объёмов магматизма ($V_{\text{и}} = (1,3-4) \cdot 10^6 \text{ км}^3$), приведённые в одном из исследований [5]. В этом случае оказалось, что параметры Таримского плюма (тепловая мощность, диаметры канала и головы) сравнимы или превышают таковые для плюма СКМП.

В расчётах расстояние по высоте от границы «ядро-мантия» до подошвы «тугоплавкого» слоя $x_1 = L - x_2 = 2880 - 100 = 2780 \text{ км}$, где L – расстояние от границы «ядро-мантия» до поверхности, а x_2 – глубина залегания

подошвы «тугоплавкого» слоя в литосфере. Высота, на которую поднимается вторичный плюм в «тугоплавком» слое, $\Delta x_{\text{и}} = x_2 - x_{\text{и}} = 70$ км, где $x_{\text{и}} = 30$ км – высота канала излияния (см. рис. 2).

Исходя из оценок температур плавления вблизи подошвы «тугоплавкого» слоя и расплава в голове плюма [1], в расчётах диаметра головы плюма по соотношению (5) для глубины залегания $x_2 = 100$ км принимаем разности температуры: $T_c - T_1 = (T_c - T_{\text{дп}})/2 = 750$ °С, где $T_1 = (T_c + T_{\text{дп}})/2$ – средняя температура литосферы над головой плюма; $T_{\text{дп}} = 0$ °С – температура дневной поверхности; $T_{\text{гр}} - T_{\text{ом}} = 100$ °С. Доля расплава в голо-

ве плюма составляет $\phi = 0.5$. Скорость u_0 и время подъёма вторичного плюма $t_{\text{в}}$ вычислены соответственно по соотношениям (6) и (7). Согласно нашим расчётам, параметр χ , входящий в указанные соотношения, равен 0,398. Полагаем, что площадь головы Таримского плюма S_r сравнима с площадью магматического ареала платобазальтов ТКМП ($S_r = S_{\text{пб}}$).

Результаты вычислений представлены на рис. 5, из которого следует, что время подъёма вторичного плюма возрастает с увеличением вязкости окружающей литосферы. Диаметр и, следовательно, площадь головы плюма увеличиваются с ростом вязкости литосферы.

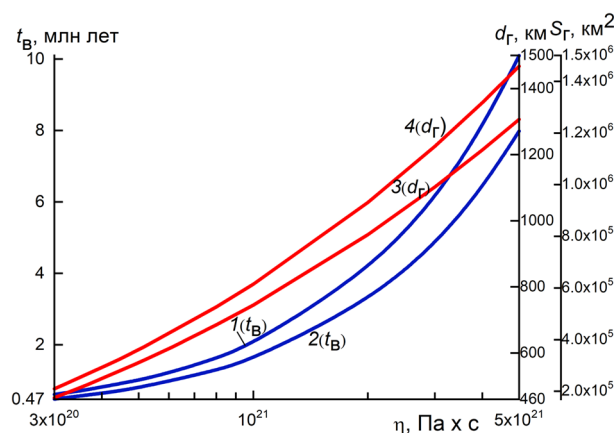


Рис. 5. Зависимость времени подъёма вторичного плюма и диаметра (и площади) головы Таримского (основного) плюма от вязкости окружающей литосферы для объёма излившихся базальтов $V_{\text{и}} = 1,5 \cdot 10^5 \text{ км}^3$ и $2,4 \cdot 10^5 \text{ км}^3$ ($b = 1,0 \cdot 10^{-5} \text{ °С}^{-1}$). 1, 3 – $V_{\text{и}} = 1,5 \cdot 10^5 \text{ км}^3$; 2, 4 – $V_{\text{и}} = 2,4 \cdot 10^5 \text{ км}^3$ / **Fig. 5.** The ascent time of the secondary plume as well as the diameter (and area) of the Tarim plume (main plume) head versus the viscosity of the surrounding lithosphere for the eruption volume $V_{\text{и}} = 1,5 \cdot 10^5 \text{ км}^3$ and $2,4 \cdot 10^5 \text{ км}^3$ ($b = 1,0 \cdot 10^{-5} \text{ °С}^{-1}$). 1, 3 – $V_{\text{и}} = 1,5 \cdot 10^5 \text{ км}^3$; 2, 4 – $V_{\text{и}} = 2,4 \cdot 10^5 \text{ км}^3$

Определена вязкость «тугоплавкого» слоя η , отвечающая геологическим оценкам площади магматического ареала платобазальтов ТКМП $S_{\text{пб}} = 2 \cdot 10^5 \text{ км}^2$, $2,5 \cdot 10^5 \text{ км}^2$, $2,65 \cdot 10^5 \text{ км}^2$ и $3 \cdot 10^5 \text{ км}^2$, полученным в работах [3; 7; 17; 27]. Для глубины залегания подошвы «тугоплавкого» слоя $x_2 = 100$ км, $\beta = 1,0 \times 10^{-5} \text{ °С}^{-1}$ и $V_{\text{и}} = 1,5 \cdot 10^5 \text{ км}^3$ площадь ареала платобазальтов $S_{\text{пб}} = S_r = (2-3) \cdot 10^5 \text{ км}^2$ достигается при вязкости «тугоплавкого слоя» в литосфере $\eta = (3,7 - 6,1) \cdot 10^{20} \text{ Па} \cdot \text{с}$. Для объёма излияний $V_{\text{и}} = 2,4 \cdot 10^5 \text{ км}^3$ указанная площадь достигается при $\eta = (3,2 - 5,2) \cdot 10^{20} \text{ Па} \cdot \text{с}$. При вязкости $\eta > 6,1 \cdot 10^{20} \text{ Па} \cdot \text{с}$ для $V_{\text{и}} = 1,5 \cdot 10^5 \text{ км}^3$ и при $\eta > 5,2 \cdot 10^{20} \text{ Па} \cdot \text{с}$ для $V_{\text{и}} = 2,4 \cdot 10^5 \text{ км}^3$ площадь головы плюма превышает $3 \cdot 10^5 \text{ км}^2$ – верхнюю геологическую оценку площади магматического ареала платобазальтов ТКМП.

Выводы

Представлена схема развития головы плюма, достигшего «тугоплавкого» слоя в литосфере на основе результатов лабораторного (физического) моделирования и теоретического анализа. Тепло от канала плюма передаётся «тугоплавкому» слою, тем самым обеспечивая подплавление литосферы вдоль его подошвы. В результате

формируется грибообразная голова плюма. Граница раздела расплава и окружающей литосферы распространяется вдоль подошвы «тугоплавкого» слоя со скоростью v , увеличивая диаметр головы плюма d_r . Предложенная нами модель образования грибообразной головы мантийного плюма может быть широко использована для определения основных параметров плюмов большой тепловой мощности и основных факторов формирования крупных магматических провинций.

На основе указанной геодинамической модели плюма для имеющихся геолого-геофизических данных о продолжительности излияний и объёме излившегося базальтового расплава ($t = 5$ млн лет и $V_{\text{и}} = (1 - 3) \cdot 10^5 \text{ км}^3$) нами впервые получены следующие значения основных параметров Таримского плюма: тепловая мощность $N = (1,7 - 6,8) \cdot 10^{11} \text{ Вт}$, относительная тепловая мощность $Ka = 16,3 - 48,8$ и диаметр канала плюма $d = 43 - 87 \text{ км}$. Установлено, что полученные значения соответствуют параметрам плюма большой тепловой мощности, способного создать крупную магматическую провинцию. На диаграмме геодинамических режимов Таримский плюм

находится в области плюмов большой тепловой мощности, при этом его тепловая мощность меньше, чем тепловая мощность плюма Тунгусской синеклизы, в пределах которой сосредоточен основной объём излияний платобазальтов СКМП.

Таким образом, в результате вычислений основных параметров плюма становятся возможными определение его геодинамического режима, его однозначное отнесение к тому или иному классу плюмов и сопоставление с другими плюмами, положение которых указано ранее на диаграмме геодинамических режимов.

При длительности излияний платобазальтов $t < 5$ млн лет тепловая мощность и диаметр плюма ТКМП могут значительно возрастать по сравнению с приведёнными параметрами Таримского плюма, что представляется менее соответствующим реальным данным для ТКМП.

Теоретическое моделирование процесса подъёма вторичного плюма, отвечающего основному плюму КМП, позволяет получить значения параметров вторичного плюма в зависимости от вязкости «тугоплавкого» слоя литосферы. Время подъёма вторичного плюма в «тугоплавком» слое литосферы и, соответственно, время роста грибообразной головы плюма увеличиваются с возрастанием вязкости этого слоя. Диаметр и, следовательно, площадь головы плюма увеличиваются с ростом вязкости «тугоплавкого» слоя. Площадь головы Таримского плюма, отвечающая имеющимся геологическим оценкам магматического ареала платобазальтов ТКМП, достигается при вязкости «тугоплавкого» слоя в литосфере $\eta = (3,2 - 6,1) \cdot 10^{20}$ Па · с. Таким образом, теоретическое моделирование вторичного плюма даёт возможность определить один из ключевых параметров «тугоплавкого» слоя литосферы – его динамическую вязкость.

Список литературы

1. Dobretsov N. L., Kiryashkin A. A., Kiryashkin A. G., Vernikovskiy V. A., Gladkov I. N. Modelling of thermochemical plumes and implications for the origin of the Siberian traps // *Lithos*. 2008. Vol. 100, no. 1–4. P. 66–92. DOI: 10.1016/j.lithos.2007.06.025. EDN: LLJHSN
2. Kiryashkin A. G., Kiryashkin A. A. Parameters of plumes of North Asia // *Russian Geology and Geophysics*. 2016. Vol. 57, no 11. P. 1535–1550. DOI: 10.1016/j.rgg.2016.10.002. EDN: XFRNFB
3. Liu Y., Lü X., Wu C., Hu X., Duan Z., Deng G., Wang H., Zhu X., Zeng H., Wang P., Wang W., Lu Q. The migration of Tarim plume magma toward the northeast in Early Permian and its significance for the exploration of PGE-Cu-Ni magmatic sulfide deposits in Xinjiang, NW China: As suggested by Sr-Nd-Hf isotopes, sedimentology and geophysical data // *Ore Geology Reviews*. 2016. Vol. 72. P. 538–545. DOI: 10.1016/j.oregeorev.2015.07.020. EDN: VFEWQV
4. Борисенко А. С., Сотников В. И., Изох А. Э., Поляков Г. В., Оболенский А. А. Пермотриасовое оруденение Азии и его связь с проявлением плюмового магматизма // *Геология и геофизика*. 2006. Т. 47, № 1. С. 166–182. EDN: NDLLGZ
5. Добрецов Н. Л. Раннепалеозойская тектоника и геодинамика Центральной Азии: роль раннепалеозойских мантийных плюмов // *Геология и геофизика*. 2011. Т. 52, № 12. С. 1957–1973. EDN: ONZTLH
6. Bi Y., Chen H., Hanski E., Kuritani T., Wu H. X., Zhang F. Q., Liu J., Gu X. Y., Xia Q.-K. Hydrous mantle plume promoted the generation of continental flood basalts in the Tarim Large Igneous Province // *Scientific Reports*. 2024. Vol. 14, no. 1. P. 9514. DOI: 10.1038/s41598-024-60213-4. EDN: BRJANR
7. Li W., Wang X., Liang X., Zuo S., Li S., Qu Ch., Tian X., Chen L. Heterogeneous Tarim cratonic crust induced by a mantle plume and its effect on later tectonic evolution based on multi-frequency receiver functions imaging // *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. 2024. Vol. 129, no. 11. DOI: 10.1029/2024JB029579. EDN: YVCRYE
8. Sun J., Liang T., Liu X., Zhang X., Liu B., Quan G. Triassic thermal pulse of Tarim mantle plume: evidence from geochronology, geochemistry, and Nd isotopes of the mafic dikes from the Halaqi Area, Xinjiang, China // *Minerals*. 2024. Vol. 14, no. 3. P. 283. DOI: 10.3390/min14030283. EDN: WPLANF
9. Xiang X., Chen H., Chen L., Xu X., Lin X., Li Z., Yan Z. Plume-modified lithosphere mantle controlled the Cenozoic sediment thickness in the Tarim Basin // *Geophysical Research Letters*. 2024. Vol. 51, no. 2. e2023GL106203. DOI: 10.1029/2023GL106203. EDN: CIOUMC
10. Xu X., Chen H., Zusa A. V., Yin A., Yu P., Lin X., Zhao C., Luo J., Yang S., Wang B. Phanerozoic cratonization by plume welding // *Geology*. 2023. Vol. 51, no. 2. P. 209–214. DOI: 10.1130/G50615.1. EDN: XMQTMQ
11. Yang S. H., Zhou M. F., Wang C. Y., Jiang C. Emplacement and ore potential of the Permian Pobei mafic-ultramafic complex, NE Tarim, NW China // *Journal of Asian Earth Sciences*. 2024. Vol. 263. P. 105992. DOI: 10.1016/j.jseaes.2023.105992. EDN: CPIOCE
12. Yu H., Chen H., Cao H., Said N., Huang C., Ma Z., Xiao B., Chen H., Zou H. Advances in magmatic Ni-Cu-(PGE) sulphide deposits and their constraints on Neoproterozoic tectonic settings of China // *Geological Journal*. 2024. Vol. 60, no. 4. P. 807–823. DOI: 10.1002/gj.5105. EDN: IWJFYG

13. Zhang S., Zeng R., Duan S., Pan J., Liang D., Yan J., Wan J., Liu Q., Zhang Y. Mineralogical characterization and provenance of Black Sand in the Xiahenan Area, Tarim Large Igneous Province // *Minerals*. 2025. Vol. 15, no. 8. P. 884. DOI: 10.3390/min15080884. EDN: IZZOQZ
14. Blacker K. J., Reichow M. K., Wang Z., Zhang Z., New estimates on the basalt volume of the Tarim (not so large) Igneous Province, NW China // *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. 2021. Vol. 126, no. 12. DOI: 10.1029/2021JB022061. EDN: BIZNQR
15. Yang S. F., Chen H. L., Li Z. L., Li Y. Q., Li D. X., Meng L. F. Yu X. Early Permian Tarim large igneous province in northwest China // *Science China: Earth Sciences*. 2013. Vol. 56, no. 12. P. 2015–2026. DOI: 10.1007/s11430-013-4653-y. EDN: SPOUHP
16. Zhang R., Cheng Zh., Zhang Zh., Chen Zh., Ernst R., Santosh M. Formation of Tarim Large Igneous Province and strengthened lithosphere revealed through machine learning // *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. 2023. Vol. 128, no. 1. DOI: 10.1029/2022JB025772. EDN: NJGOIC
17. Bo H., Zhang Z., Cheng Z., Ren K., Santosh M. Pre-eruptive evolution and timescales of silicic volcanism in the Tarim Large Igneous Province // *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. 2023. Vol. 128, no. 1. DOI: 10.1029/2022JB025016. EDN: TBOUW
18. Pan Y., Wang Z.X., Pan M. Redefined distribution of the Permian volcanic rocks in the Tarim Basin: Based on logging and seismic data // *Applied Mechanics and Materials*. 2014. Vol. 448–453. P. 3723–3727. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.448-453.3723
19. Usui Y., Tian W. Paleomagnetic directional groups and paleointensity from the flood basalt in the Tarim large igneous province: implications for eruption frequency // *Earth Planets Space*. 2017. Vol. 69, no. 14. DOI: 10.1186/s40623-016-0595-x5
20. Xu Y. G., Wei X., Luo Z. Y., Liu H. Q., Cao J. The Early Permian Tarim Large Igneous Province: Main characteristics and a plume incubation model // *Lithos*. 2014. Vol. 204. P. 20–35. DOI: 10.1016/j.lithos.2014.02.015. EDN: USURSB
21. Li Y. Q., Li Z. L., Yang S. F., Chen H. L., Tang Z. L., Zou S. Y., Langmuir C. H., Yu X., Santosh M., Song B. Origin of the Early Permian zircons in Keping basalts and magma evolution of the Tarim Large Igneous Province (northwestern China) // *Lithos*. 2014. Vol. 204. P. 47–58. DOI: 10.1016/j.lithos.2014.05.021. EDN: UOETJX22
22. Zhong Y. T., Luo Z. Y., Liu H. Q., He B., Huang X. L., Xu Y. G., Mundil R., Wei X., Tian W. Constraining the duration of the Tarim flood basalts (northwestern China): CA-TIMS zircon U-Pb dating of tuffs // *Geological Society of America Bulletin*. 2022. Vol. 134, no. 1-2. P. 325–334. DOI: 10.1130/B36053.1. EDN: EXMCKY
23. Gladkov I. N., Distanov V. E., Kirdyashkin A. A., Kirdyashkin A. G. Stability of a melt/solid interface with reference to a plume channel // *Fluid Dynamics*. 2012. Vol. 47, no. 4. P. 433–447. DOI: 10.1134/S0015462812040023. EDN: RHWKDZ
24. Kirdyashkin A. A., Kirdyashkin A. G., Distanov V. E., Gladkov I. N. Geodynamic regimes of thermochemical mantle plumes // *Russian Geology and Geophysics*. 2016. Vol. 57, no. 6. P. 858–867. DOI: 10.1016/j.rgg.2016.05.003. EDN: WVPSC
25. Shangguan S., Peate I. U., Tian W., Xu Y. Re-evaluating the geochronology of the Permian Tarim magmatic province: implications for temporal evolution of magmatism // *Journal of the Geological Society*. 2016. Vol. 173, no. 1. P. 228–239. DOI: 10.1144/jgs2014-114
26. Li Y. Q., Li Z. L., Chen H.-L., Yang S. F., Sun Y. L., Santosh M., Langmuir C. H., Chen Z. X., Yu X. Platinum-group elements and geochemical characteristics of the Permian continental flood basalts in the Tarim Basin, northwest China: Implications for the evolution of the Tarim Large Igneous Province // *Chemical Geology*. 2012. Vol. 328. P. 278–289. DOI: 10.1016/j.chemgeo.2012.03.007. EDN: RHWKKN
27. Tian W., Guan P., Chen M., Yu H., Zhu W., Campbell I. H., Allen C. M., Pan W. The Tarim picrite-basalt-rhyolite suite, a Permian flood basalt from northwest China with contrasting rhyolites produced by fractional crystallization and anatexis // *Contributions to Mineralogy and Petrology*. 2010. Vol. 160, no. 3. P. 407–425. DOI: 10.1007/s00410-009-0485-3. EDN: MZDLT

References

1. Dobretsov NL, Kirdyashkin AA, Kirdyashkin AG, Vernikovskiy VA., Gladkov IN. Modelling of thermochemical plumes and implications for the origin of the Siberian traps. *Lithos*. 2008;100(1-4):66-92. DOI: 10.1016/j.lithos.2007.06.025. EDN: LLJHSN
2. Kirdyashkin AG., Kirdyashkin AA. Parameters of plumes of North Asia. *Russian Geology and Geophysics*. 2016;57(11):1535-1550. DOI: 10.1016/j.rgg.2016.10.002. EDN: XFRNFB
3. Liu Y, Lü X, Wua C, Hu X, Duan Z, Deng G (et al). The migration of Tarim plume magma toward the northeast in Early Permian and its significance for the exploration of PGE-Cu-Ni magmatic sulfide deposits in Xinjiang, NW China: As suggested by Sr-Nd-Hf isotopes, sedimentology and geophysical data. *Ore Geology Reviews*. 2016;72:538-545. DOI: 10.1016/j.oregeorev.2015.07.020. EDN: VFEWQV
4. Borisenko AS, Sotnikov VI, Izokh AE, Polyakov GV, Obolensky AA. Permo-triassic mineralization in Asia and its relation with plume magmatism. *Geologiya i Geofizika*. 2006;47(1):166-182. EDN: NDLLGZ. (In Russian)

5. Dobretsov NL. Early paleozoic tectonics and geodynamics of central Asia: role of mantle plumes. *Geologiya i Geofizika*. 2011;52(12):1957-1973. EDN: ONZTLH. (In Russian)
6. Bi Y, Chen H, Hanski E, Kuritani T, Wu HX, Zhang FQ. Hydrous mantle plume promoted the generation of continental flood basalts in the Tarim Large Igneous Province. *Scientific Reports*. 2024;14(1):9514. DOI: 10.1038/s41598-024-60213-4. EDN: BRJANR
7. Li W, Wang X, Liang X, Zuo S, Li S, Qu Ch (et al). Heterogeneous Tarim cratonic crust induced by a mantle plume and its effect on later tectonic evolution based on multi-frequency receiver functions imaging. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. 2024;129(11). DOI: 10.1029/2024JB029579. EDN: YVCRYE
8. Sun J, Liang T, Liu X, Zhang X, Liu B, Quan G. Triassic thermal pulse of Tarim mantle plume: evidence from geochronology, geochemistry, and Nd isotopes of the mafic dikes from the Halaqi Area, Xinjiang, China. *Minerals*. 2024;14(3):283. DOI: 10.3390/min14030283. EDN: WPLANF
9. Xiang X, Chen H, Chen L, Xu X, Lin X, Li Z. Plume-modified lithosphere mantle controlled the Cenozoic sediment thickness in the Tarim Basin. *Geophysical Research Letters*. 2024;51(2). DOI: 10.1029/2023GL106203. EDN: CIOUMC
10. Xu X, Chen H, Zuza AV, Yin A, Yu P, Lin X. Phanerozoic cratonization by plume welding. *Geology*. 2023;51(2):209-214. DOI: 10.1130/G50615.1. EDN: XMQTMQ
11. Yang SH, Zhou MF, Wang CY, Jiang C. Emplacement and ore potential of the Permian Pobei mafic-ultramafic complex, NE Tarim, NW China. *Journal of Asian Earth Sciences*. 2024;263:105992. DOI: 10.1016/j.jseaes.2023.105992. EDN: CPIOCE
12. Yu H, Chen H, Cao H, Said N, Huang C, Ma Z (et al). Advances in magmatic Ni-Cu-(PGE) sulphide deposits and their constraints on Neoproterozoic tectonic settings of China. *Geological Journal*. 2024;60(4):807-823. DOI: 10.1002/gj.5105. EDN: IWJFYG
13. Zhang S, Zeng R, Duan S, Pan J, Liang D, Yan J (et al). Mineralogical characterization and provenance of Black Sand in the Xiahenan Area, Tarim Large Igneous Province. *Minerals*. 2025;15(8):884. DOI: 10.3390/min15080884. EDN: IZZOQZ
14. Blacker KJ, Reichow MK, Wang Z, Zhang Z. New estimates on the basalt volume of the Tarim (not so large) Igneous Province, NW China. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. 2021;126(12). DOI: 10.1029/2021JB022061. EDN: BIZNQR
15. Yang SF, Chen HL, Li ZL, Li YQ, Li DX, Meng LF (et al). Early Permian Tarim large igneous province in northwest China. *Science China: Earth Sciences*. 2013;56(12):2015-2026. DOI: 10.1007/s11430-013-4653-y. EDN: SPOUHP
16. Zhang R, Cheng Zh, Zhang Zh, Chen Zh, Ernst R, Santosh M. Formation of Tarim Large Igneous Province and strengthened lithosphere revealed through machine learning. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. 2023;128(1). DOI: 10.1029/2022JB025772. EDN: NJGOIC
17. Bo H, Zhang Z, Cheng Z, Ren K, Santosh M. Pre-eruptive evolution and timescales of silicic volcanism in the Tarim Large Igneous Province. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. 2023;128(1). DOI: 10.1029/2022JB025016. EDN: TBOUW
18. Pan Y, Wang ZX, Pan M. Redefined distribution of the Permian volcanic rocks in the Tarim Basin: Based on logging and seismic data. *Applied Mechanics and Materials*. 2014;448-453:3723-3727.
19. Usui Y, Tian W. Paleomagnetic directional groups and paleointensity from the flood basalt in the Tarim large igneous province: implications for eruption frequency. *Earth Planets Space*. 2017;69(14). DOI: 10.1186/s40623-016-0595-x5
20. Xu YG, Wei X, Luo ZY, Liu HQ, Cao J. The Early Permian Tarim Large Igneous Province: Main characteristics and a plume incubation model. *Lithos*. 2014;204:20-35. DOI: 10.1016/j.lithos.2014.02.015. EDN: USURSB
21. Li YQ, Li ZL, Yang SF, Chen HL, Tang ZL, Zou SY. Origin of the Early Permian zircons in Keping basalts and magma evolution of the Tarim Large Igneous Province (northwestern China). *Lithos*. 2014;204:47-58. DOI: 10.1016/j.lithos.2014.05.021. EDN: UOETJX22
22. Zhong YT, Luo ZY, Liu HQ, He B, Huang XL, Xu YG. Constraining the duration of the Tarim flood basalts (northwestern China): CA-TIMS zircon U-Pb dating of tuffs. *Geological Society of America Bulletin*. 2022;134(1-2):325-334. DOI: 10.1130/B36053.1. EDN: EXMCKY
23. Gladkov IN, Distanov VE, Kirdyashkin AA, Kirdyashkin AG. Stability of a melt/solid interface with reference to a plume channel. *Fluid Dynamics*. 2012;47(4):433-447. DOI: 10.1134/S0015462812040023. EDN: RHWKZ
24. Kirdyashkin AA, Kirdyashkin AG, Distanov VE, Gladkov IN. Geodynamic regimes of thermochemical mantle plumes. *Russian Geology and Geophysics*. 2016;57(6):858-867. DOI: 10.1016/j.rgg.2016.05.003. EDN: WVPSC
25. Shangguan S, Peate IU, Tian W, Xu Y. Re-evaluating the geochronology of the Permian Tarim magmatic province: implications for temporal evolution of magmatism. *Journal of the Geological Society*. 2016;173(1):228-239. DOI: 10.1144/jgs2014-114
26. Li YQ, Li ZL, Chen HL, Yang SF, Sun YL, Santosh M (et al). Platinum-group elements and geochemical characteristics of the Permian continental flood basalts in the Tarim Basin, northwest China: Implications for

the evolution of the Tarim Large Igneous Province. *Chemical Geology*. 2012;328:278-289. DOI: 10.1016/j.chemgeo.2012.03.007. EDN: RHWKKN

27. Tian W, Guan P, Chen M, Yu H, Zhu W, Campbell IH (et al). The Tarim picrite-basalt-rhyolite suite, a Permian flood basalt from northwest China with contrasting rhyolites produced by fractional crystallization and anatexis. *Contributions to Mineralogy and Petrology*. 2010;160(3):407-425. DOI: 10.1007/s00410-009-0485-3. EDN: MZDLOT

Информация об авторах

Кирдяшкин Алексей Анатольевич, д-р геол.-минерал. наук, профессор РАН, доцент кафедры общепрофессиональных дисциплин, Новосибирское высшее военное командное ордена Жукова училище, г. Новосибирск, Россия; aakir@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9873-4533>. Область научных интересов: лабораторное и теоретическое моделирование геодинамических процессов, тектонофизика, геотектоника.

Дистанов Валерий Элимирович, канд. геол.-минерал. наук, старший научный сотрудник лаборатории физического и химического моделирования геологических процессов, Институт геологии и минералогии им. В. С. Соболева СО РАН, г. Новосибирск, Россия; dist@igm.nsc.ru, <https://orcid.org/0009-0005-7584-3787>. Область научных интересов: геодинамика, конвективный теплообмен, физическое моделирование, рост кристаллов.

Банушкина Софья Викторовна, канд. геол.-минерал. наук, младший научный сотрудник лаборатории физического и химического моделирования геологических процессов, Институт геологии и минералогии им. В. С. Соболева СО РАН, г. Новосибирск, Россия; banushkinasv@igm.nsc.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5676-2851>. Область научных интересов: геодинамика, петрология, магматизм, экспериментальные исследования при высоких давлениях, физико-химический анализ.

Голицына Зоя Фридриховна, младший научный сотрудник лаборатории физического и химического моделирования геологических процессов, Институт геологии и минералогии им. В. С. Соболева СО РАН, г. Новосибирск, Россия; zoe.zhurko@igm.nsc.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3222-9139>. Область научных интересов: геодинамика, петрология, минералогия, экспериментальные исследования при высоких давлениях, физико-химический анализ.

Information about the authors

Kirdyashkin Alexey A., Doctor Of Geology And Mineralogy Sciences, Professor, Russian Academy of Sciences, Novosibirsk Higher Military Command School of the Order of Zhukov, Novosibirsk, Russia; aak@igm.nsc.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9873-4533>. Research interests: laboratory and theoretical modeling of geodynamic processes, tectonophysics, geotectonics.

Distanov Valery E., Candidate of Geology and Mineralogy Sciences, Senior Researcher, Laboratory of Physical and Chemical Modelling of Geological Processes, V. S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy SB RAS, Novosibirsk, Russia; dist@igm.nsc.ru, <https://orcid.org/0009-0005-7584-3787>. Research interests: geodynamics, convective heat transfer, physical modeling, crystal growth.

Banushkina Sofia V., Candidate of Geology and Mineralogy Sciences, Research Assistant, Laboratory of Physical and Chemical Modeling of Geological Processes, V. S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy SB RAS, Novosibirsk, Russia; banushkinasv@igm.nsc.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5676-2851>. Research interests: geodynamics, petrology, magmatism, experimental investigations at high pressures, physico-chemical analysis.

Golitsyna Zoia F., Research Assistant, Laboratory of Physical and Chemical Modeling of Geological Processes, V. S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy SB RAS, Novosibirsk, Russia; zoe.zhurko@igm.nsc.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3222-9139>. Research interests: petrology, mineralogy, experimental investigations at high pressures, physico-chemical analysis.

Вклад авторов в статью

Кирдяшкин А. А. – разработка идеи исследования, постановка задачи, консультации по теоретическому моделированию, написание текста, формулировка выводов.

Дистанов В. Э. – проведение теоретического моделирования, анализ результатов исследования, написание текста.

Банушкина С. В. – выполнение вычислений, анализ результатов исследования, редактирование текста.

Голицына З. Ф. – выполнение вычислений, обработка и визуализация результатов исследования, редактирование текста.

The authors' contribution to the article

Kirdyashkin A. A. – development of a research idea, problem statement, consultations on theoretical modeling, writing the text, formulation of conclusions.

Distanov V. E. – conducting theoretical modeling, analyzing research results, writing the text.

Banushkina S. V. – performing calculations, analysis of the research results.

Golitsyna Z. F. – performing calculations, processing and visualization of the research results, editing the text.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of Interest: The authors declare no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 28.10.2025; одобрена после рецензирования 22.11.2025;
принята к публикации 29.11.2025.

Received 2025, October 28; approved after review 2025, November 22;
accepted for publication 2025, November 29.