

УДК 551.2+551.14+536.25
DOI: 10.21209/2227-9245-2021-27-8-26-34

СТРУКТУРА КАНАЛА ПЛЮМА, ФОРМИРУЮЩЕГОСЯ В ПЛОСКОМ СЛОЕ (МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЛЮМА В ЗОНЕ СУБДУКЦИИ)

STRUCTURE OF A PLUME CONDUIT FORMING IN A FLAT LAYER (MODELING OF A PLUME IN A SUBDUCTION ZONE)



А. А. Кирдяшкин,
Институт геологии и минералогии
им. В. С. Соболева СО РАН,
г. Новосибирск
aak@igm.nsc.ru

A. Kirdyashkin,
Sobolev Institute of Geology and
Mineralogy SB RAS, Novosibirsk



А. Г. Кирдяшкин,
Институт геологии и минералогии
им. В. С. Соболева СО РАН,
г. Новосибирск
agk@igm.nsc.ru

A. Kirdyashkin,
Sobolev Institute of Geology and
Mineralogy SB RAS, Novosibirsk



В. Э. Дистанов,
Институт геологии и минералогии
им. В. С. Соболева СО РАН,
г. Новосибирск
dist@igm.nsc.ru

V. Distanov,
Sobolev Institute of Geology and
Mineralogy SB RAS, Novosibirsk



И. Н. Гладков,
Институт геологии и минералогии
им. В. С. Соболева СО РАН, г. Новосибирск
kir@igm.nsc.ru

I. Gladkov,
V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy
SB RAS, Novosibirsk



Ю. М. Непогодина,
Институт геологии и минералогии
им. В. С. Соболева СО РАН, г. Новосибирск
nepogodina@igm.nsc.ru

Yu. Nepogodina,
V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy
SB RAS, Novosibirsk

Представлены экспериментальные исследования плюма, образующегося в плоском слое парафина над локальным источником тепла. Эксперименты выполнены на установке с передней прозрачной стенкой при угле наклона слоя относительно вектора силы тяжести, равном 2° . Определена тепловая мощность, отдаваемая каналом плюма в режиме стационарной теплопроводности. Для различных тепловых мощностей на подошве плюма (на нагревателе) исследованы структура канала и структура свободно-конвективных течений в нем. Свободно-конвективные течения по высоте канала плюма представляют собой

ячеистые течения. Ячеистая структура возникает вследствие неустойчивой стратификации по высоте канала плюма. Восходящий поток в канале плюма представляет собой локализованное струйное течение, нисходящий поток существует по периметру канала. Границы ячеек отвечают сужениям канала плюма, образующимся вследствие охлаждения нисходящего течения до температуры, близкой к температуре плавления. Определены параметры ячеек канала плюма при различных значениях относительной тепловой мощности (критерия Ka) и структура свободно-конвективных течений в ячейках. Определены режимы выхода на поверхность для плюмов в плоском слое в зависимости от относительной тепловой мощности. При относительной мощности $Ka > 1,14$ модельный плюм выходит на поверхность с образованием грибообразной головы. Этот случай может соответствовать плюмам, ответственным за образование батолитов в Андской зоне субдукции. Эксперименты показали, что структура канала плюма в плоском слое соответствует структуре плюма, образующегося в сплошном твердом массиве над локальным источником тепла. Отличия в тепловой гидродинамической и структуре для плоского слоя наблюдаются из-за твердых, ограничивающих слой поверхностей

Ключевые слова: зона субдукции; свободно-конвективные течения; термохимические плюмы; лабораторное моделирование; плоский слой; канал плюма; голова плюма; тепловая мощность; слой парафина; ячеистая структура

Experimental studies of a plume forming in a flat paraffin layer above a local heat source are presented. The experiments were performed on an installation with a transparent front wall. The flat layer is inclined two degrees with respect to the gravity vector. The thermal power transferred from the plume conduit under conditions of stationary thermal conduction is determined. The structure of the plume conduit and the structure of free-convective flows are determined for different plume thermal power values. Free-convection flows along the conduit height are cellular ones. The cellular structure occurs due to unstable stratification along the height of the plume conduit. The ascending flow in the plume conduit is a localized jet stream; the descending flow exists along the perimeter of the conduit. The cell boundaries correspond to narrowings of the plume conduit, formed due to cooling of the descending flow to a temperature close to the melting point. The cell parameters are determined for different values of relative thermal power (Ka criterion). The free-convection flow structure in the cells of the plume conduit is elucidated. The modes of reaching the surface for plumes forming in a flat layer are determined in relation to Ka criterion. When the relative power Ka exceeds 1.14, the model plume reaches the surface with the formation of a mushroom-shaped head. This case may correspond to plumes responsible for the formation of batholiths in the Andean subduction zone. Experiments have shown that the structure of the plume conduit in a flat layer corresponds to the plume structure formed in a solid massif above a local heat source. Distinctions in the thermal and hydrodynamic structure for a flat layer are observed due to the solid surfaces bounding the layer.

Key words: subduction zone; free-convective flows; thermochemical plumes; laboratory modeling; flat layer; plume conduit; plume head; thermal power; paraffin layer; cellular structure

Введение. Особенность геологических задач состоит в том, что известны граничные условия на поверхности Земли (граничные условия задачи), и нужно рассмотреть глубинные процессы, следствием которых являются поверхностные структуры. Это порождает множество гипотез о причинах, вызывающих различные структуры и обуславливающих составы пород этих структур. Указанные задачи относятся к классу обратных задач, которые имеют множество решений. Есть и другой метод решения геологических задач – моделирование. Для изучаемого процесса создается модель, построенная на основе геологических и геофизических данных, удовлетворяющая основным законам механики сплошной среды: законам сохранения массы, энергии и импульса. В этом

случае решается прямая корректная задача, для которой существует решение, но оно должно соответствовать граничным условиям – геологическим структурам на поверхности Земли.

Определение структуры течений в зоне субдукции и основных сил, действующих в ней, является одной из ключевых задач в науках о Земле. Экспериментальное и численное моделирование часто представлено моделированием опускания плиты под действием вынужденных сил, приложенных к субдукционной плите, но есть и работы, в которых используется так называемый внутренний подход, когда силы плавучести управляют движением плиты [6; 7]. В экспериментах [3; 5] субдукция инициируется погружением пластины в вязкую жидкость, затем пластина

погружается без воздействия внешних сил. Но природа сил в геодинамических процессах такова, что это, прежде всего, сила тяжести, вызванная изменением плотности с изменением температуры и при фазовых переходах. Моделирование должно выполняться в условиях тепловой гравитационной конвекции при выполнении законов сохранения массы, энергии и импульса [2].

Для зоны субдукции на основе геологических и геофизических данных, экспериментального моделирования в условиях тепловой гравитационной конвекции построена модель ее тепловой и гидродинамической структуры. Согласно этой модели, источником тепла, порождающим вулканическую деятельность в зоне субдукции, является граница верхней и нижней мантии на глубине 670 км¹. Плавление возникает в коровом слое субдуцирующей плиты, представляющей плоский слой, ограниченный, с одной стороны, погружающейся океанической литосферной плитой, а с другой стороны – верхней мантией, сопряженной с зоной субдукции. Экспериментальное и теоретическое моделирование показало, что в коровом слое образуются термохимические плюмы, поднимающиеся (выплавливающиеся) к поверхности Земли². Дальнейшая задача состоит в выяснении тепловой и гидродинамической структуры плюма, создающегося при плавлении корового слоя субдуцирующей плиты. Коровый слой представляет собой плоский слой, как на границе 670 км, так и на погружающейся литосфере.

Лабораторное моделирование термохимического плюма в зоне субдукции выполнено на модели, представляющей плоский слой парафина. Исследовался процесс плавления над локальным источником тепла.

Целью исследований является выяснение тепловой и гидродинамической структуры в канале плюма в плоском слое, определение влияния тепловой мощности плюма на режим его выхода плюма на поверхность, на структуру канала плюма и гидродинамическую структуру

свободно-конвективных потоков по высоте канала. Экспериментальное моделирование выполнено с целью изучения процессов вулканической деятельности плюмов в зоне субдукции.

Экспериментальная установка и методика эксперимента. Схема экспериментальной установки по исследованию тепловой и гидродинамической структуры течений, развивающихся при плавлении в наклонном слое, представлена на рис. 1. Задняя стенка установки (1) выполнена из дерева (сосны) и имеет высоту $H_{зс} = 400$ мм, ширину $X_{зс} = 240$ мм и толщину $Y_{зс} = 40$ мм. Уплотнитель (2) представляет собой деревянную пластину высотой 400 мм, шириной 20 мм и толщиной 10 мм, обернутый резиной. Деревянный уплотнитель дна установки имеет длину 200 мм, толщину и высоту по 10 мм. На дне закреплен электронагреватель (4) диаметром 8 мм, высотой 50 мм. В оргстекле просверлены отверстия под шурупы, которыми лицевая стенка, через уплотнители, крепится к задней стенке установки. Для охлаждения рабочего объема установки используются силиконовые шланги диаметром 14 мм (5), подключенные к термостату УТ-4. Силиконовые шланги крепятся к оргстеклу по периметру тонким фланцем (6) с помощью прижимающей скобы (7). Рабочий объем установки (8) заполнен твердым парафином, его толщина 11,5 мм, высота 390 мм, ширина 200 мм.

После включения термостата и установления в рабочем объеме заданной температуры охлаждающего контура включался источник постоянного тока на требуемой мощности. Структура выплавливаемого канала через определенные промежутки времени фотографируется. Продолжительность экспериментов составляла 5 ... 8 суток. Эксперименты проводились при малом наклоне рабочего слоя (8) от вектора силы тяжести (2°). Для визуализации картины течения в расплав канала плюма вводились частицы алюминиевой пудры.

¹ Кирдяшкин А. Г., Кирдяшкин А. А., Гладков И. Н., Дистанов В. Э. Тепловая и гидродинамическая структура и вулканизм в зоне субдукции // Вестник Забайкальского государственного университета. – 2019. – Т. 25, № 9. – С. 13–24. – DOI: 10.21209/2227-9245-2019-25-9-13-24.

² Кирдяшкин А. А., Кирдяшкин А. Г., Дистанов В. Э., Гладков И. Н. Об источнике тепла в зоне субдукции // Геодинамика и тектонофизика. – 2021. – Т. 12, № 3. – С. 471–484. – DOI: 10.5800/GT-2021-12-3-0534; Кирдяшкин А. Г., Кирдяшкин А. А., Гладков И. Н., Дистанов В. Э. Тепловая и гидродинамическая структура и вулканизм в зоне субдукции // Вестник Забайкальского государственного университета. – 2019. – Т. 25, № 9. – С. 13–24. – DOI: 10.21209/2227-9245-2019-25-9-13-24.

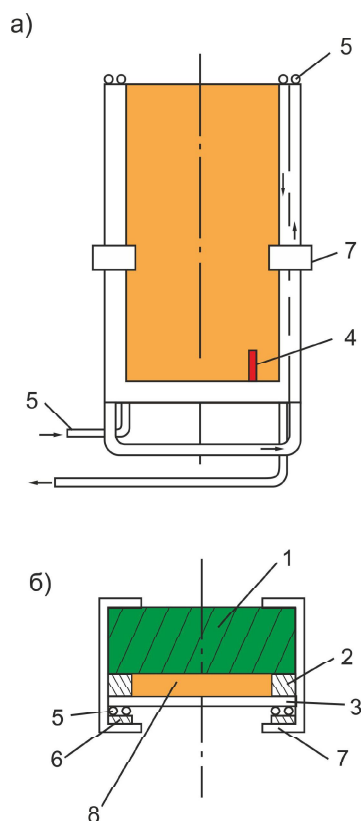


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: а – вид спереди; б – вид сверху; 1 – задняя стенка; 2 – уплотнитель; 3 – прозрачная оргстеклянная пластина; 4 – нагреватель; 5 – охлаждающие трубки; 6 – тонкий фланец; 7 – прижимающая скоба; 8 – слой парафина / Fig. 1. The scheme of the experimental setup: a – front view; б – top view; 1 – back wall; 2 – seal; 3 – transparent plexiglas plate; 4 – heater; 5 – cooling tubes; 6 – thin flange; 7 – clamp bracket; 8 – paraffin layer

Результаты экспериментального моделирования. Экспериментальные исследования показали, что над источником тепла выплавляется канал расплава сложной структуры. Прежде всего, необходимо было определить количество тепла, отдаваемого каналом плюма в окружающий массив. С этой целью найдена тепловая мощность источника, при которой плюм не выходит на поверхность парафинового слоя. При тепловой мощности нагревателя $N = 5,5$ Вт плюм не вышел на поверхность (рис. 2). Длина канала плюма, отдающего тепло окружающе-

му массиву, с учетом высоты нагревателя (50 мм) составляла $H = 255$ мм. Структура канала плюма – ячеистая. Ячейки перемежаются по высоте. Этим создается дополнительный тепловой поток при нестационарной теплопроводности в твердый окружающий массив. Величина теплового потока, обусловленного нестационарным режимом теплообмена, составляет $0,15N$, где N – тепловая мощность на нагревателе, как это было экспериментально установлено в работе [4]. Поэтому тепловая мощность, отдаваемая каналом плюма в окружающий массив, при стационарном процессе $N_1 = N - 0,15N$. В нашем случае $N_1 = 5,5 \times 0,85$ Вт = 4,68 Вт. Тогда тепловая мощность, передающаяся в окружающий массив на единицу высоты, $\Delta N_1 = N_1/H = 18,3$ Вт/м.

На рис. 2 представлена структура канала плюма, сфотографированная через 55 ч после начала эксперимента. Наблюдается ячеистая структура канала. Границы ячеек являются сужениями канала. Ячеистая структура возникает вследствие неустойчивой стратификации по высоте канала, т. е. из-за понижения температуры по мере удаления от подошвы плюма (от нагревателя).

Дальнейшая задача состояла в определении режима выхода модельного плюма на поверхность. В статьях³ было показано, что режим выхода плюма на поверхность определяется критерием $Ka = N/N_1$. При $N = 6,4$ Вт плюм выходит на поверхность и образует первую ячейку вида неразвитой грибовидной головы (рис. 3). Высота канала плюма $H = 307$ мм, поэтому тепловая мощность, отданная каналом плюма в режиме стационарной теплопроводности, $N_1 = H\Delta N_1 = 0,307 \times 18,3$ Вт = 5,6 Вт и $Ka = N/N_1 = 1,14$. При $N = 7,7$ Вт и $H = 316$ мм, $H\Delta N_1 = 5,78$ Вт и $Ka = N/N_1 = 1,33$. Как будет показано далее, при $N = 7,7$ Вт плюм выходит на поверхность массива и образует характерную грибовидную голову у кровли плюма. Итак, в плоском слое грибовидная голова образуется при $Ka > 1,14$. В то же время, экспериментальные исследования показывают, что в случае плавления в объеме твердого массива над локальным источником тепла грибовидная голова плюма образуется при $Ka > 1,9$ [4].

³ 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; 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.

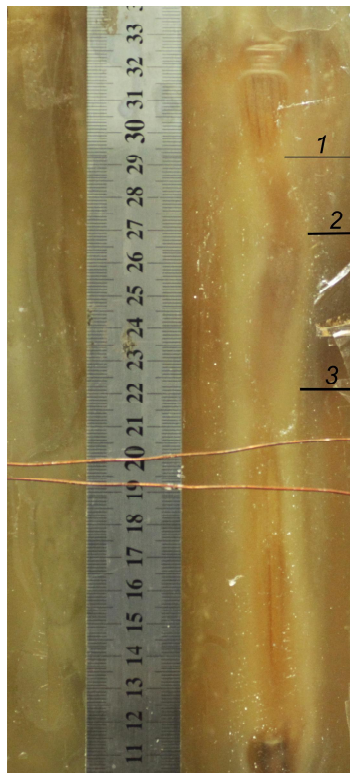


Рис. 2. Фотография канала плюма над локальным источником тепла в плоском слое парафина ($N = 5,5$ Вт, $H = 255$ мм). Границы ячеек 1 ... 3 отмечены на фотографии и обозначают места сужения канала / Fig. 2. Photograph of the plume conduit above a local heat source in a flat paraffin layer ($N = 5.5$ W, $H = 255$ mm). The cell boundaries 1 ... 3 indicate the narrowings of the conduit

Гидродинамическая структура течения в канале следующая: подъемный поток в виде струи, диаметр которой много меньше, чем площадь поперечного сечения канала. Опускное течение в пограничном слое у образующей поверхности канала. Происходит понижение температуры опускного течения по мере его опускания до температуры, близкой к температуре плавления, и образуется сужение канала. В месте сужения подъемный поток переходит на противоположную сторону канала и подогревает опускной поток. Поэтому ниже сужения увеличивается диаметр канала вследствие повышения температуры опускного потока.

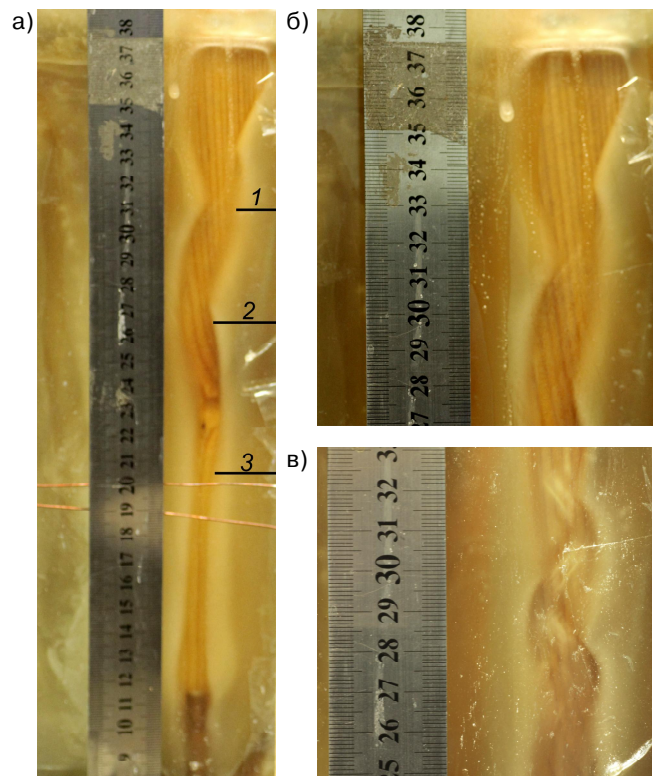


Рис. 3. Структура канала плюма при $N = 6,4$ Вт ($Ka = 1,14$, $H = 307$ мм): а – фотография канала плюма в момент времени 98 ч 50 мин после начала эксперимента; 1 ... 3 – границы ячеек; б – фотография головы плюма и 2-й ячейки; в – фотография течения ниже первой ячейки в момент времени 77,5 ч от начала эксперимента / Fig. 3. The structure of the plume conduit for $N = 6.4$ W ($Ka = 1.14$, $H = 307$ mm): а – a photograph of the plume conduit at the time of 98 hours 50 minutes from the beginning of the experiment; 1 ... 3 – cell boundaries; б – a photograph of the plume head and the second cell; в – a photograph of the flow below the first cell at a time of 77.5 hours from the beginning of the experiment

Как следует из рис. 2, наблюдается четыре ячейки по высоте канала. Представим размеры ячеек в виде отношения величины ячейки к толщине плоского слоя 11,5 мм. Относительная высота первой ячейки – 2,4, а ее наибольшая относительная ширина – 0,87, соответствующие размеры 2-й ячейки – 2,13 и 0,95, для 3-й ячейки – 5 и 1,1, для 4-й ячейки – 8,1 и 1,04. Ячейки медленно перемещаются вверх по мере перемещения сужений. Как следует из эксперимента, ширина слоя расплава незначительно отличается от толщины плоского парафинового слоя, в котором происходит плавление.

Рассмотрим структуру канала плюма при $N = 6,4$ Вт и $Ka = 1,14$, когда уже зарождается у кровли плюма грибообразная голова. На рис. 3а представлена фотография канала плюма в момент времени 98 ч 50 мин от начала эксперимента. Высота ячейки и максимальная ширина канала представлены в относительных размерах. Согласно рис. 3а, высота и ширина для ячеек следующие: для 1-й ячейки – 4,4 и 2,6; для 2-й – 4,6 и 1,5; для 3-й – 4,1 и 1,1; для 4-й – 9,2 и 0,83. При $Ka = 1,14$ и $N = 6,4$ Вт ширина канала плюма соизмерима с толщиной плоского слоя, в котором происходит образование плюма.

На рис. 3б представлена фотография двух верхних ячеек: головы плюма (1-й ячейки) и 2-й ячейки. Первая ячейка представляет собой начало зарождения грибообразной головы при $Ka = 1,14$. Структура течения канала ниже первой (верхней) ячейки изменяется во времени. На рис. 3в представлены ячейки ниже головы плюма, снятые в момент времени 77,5 ч после начала эксперимента. На расстоянии 65 мм по высоте канала образуются три ячейки. Средняя высота ячейки составляет 2, т.е. больше, чем толщина слоя, в два раза. Относительная ширина ячейки 1,1 ... 1,3.

При тепловой мощности на подошве плюма $N = 7,7$ Вт и $Ka = 1,33$ плюм выходит на поверхность и образует грибообразную голову, представляющую первую ячейку (рис. 4). Грибообразная голова плюма образуется при условии, когда N_1 – тепловая мощность, отдаваемая каналом плюма, меньше тепловой мощности на подошве плюма N . В этом случае тепловая мощность $\Delta N = N - N_1$ расходуется на плавление верхних слоев твердого массива. Ячеистая структура канала плюма изменяется: увеличивается высота ячеек, и ширина канала плюма уменьшается.

При $Ka = 1,33$ ($N = 7,7$ Вт) относительные размеры канала плюма следующие: размер кровли плюма – 5,1; высота 1-й ячейки – 4,5; высота 2-й ячейки – 3,5; наибольшая ширина ячейки – 0,97. Область ниже 2-й ячейки требует детального изучения. Для этой области характерным является уменьшение ширины канала до 0,83. Как следует из результатов

экспериментов, относительная мощность Ka есть критерий, характеризующий режим выхода плюма на поверхность. Этот критерий указывает на величину ΔN – количество тепловой энергии, проявляющейся в верхней ячейке, которая и наблюдается в природных условиях на поверхности Земли. Как показано в работах Geodynamic regimes of thermochemical mantle plumes и Parameters of thermochemical plumes responsible for the formation of batholiths: results of experimental simulation⁴, грибообразная голова плюма может являться причиной образования крупных интрузивных тел в земной коре – батолитов. В Андской зоне субдукции, согласно геологическим данным, наблюдается образование батолитов [1].

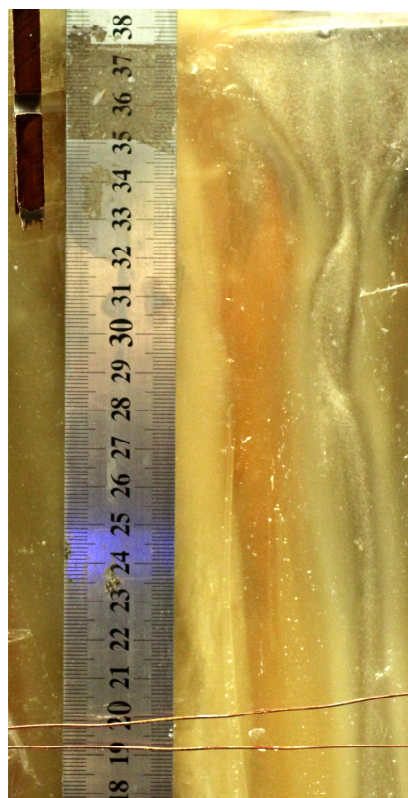


Рис. 4. Структура канала плюма в плоском слое при $N = 7,7$ Вт ($Ka = 1,33$, $H = 290$ мм) / Fig. 4. Structure of the plume conduit in a flat layer for $N = 7.7$ W ($Ka = 1.33$, $H = 290$ mm)

⁴ 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; Kirdyashkin A. A., Kirdyashkin A. G., Gurov V. V. Parameters of thermochemical plumes responsible for the formation of batholiths: results of experimental simulation // Geotectonics. – 2017. – Vol. 51, no 4. – P. 398–411.

Заключение. Экспериментальные исследования плюма в плоском слое твердого массива над локальным источником тепла, ограниченного стенками, имеющими более высокую температуру плавления, выполнены с целью моделирования термохимических плюмов, образующихся в коровом слое субдуцирующей океанической плиты. Экспериментальные исследования в плоском слое парафина показали, что над локальным источником тепла образуется канал плавления. Структура канала плюма ячеистая по высоте с локализованным (вида струйного течения) подъемным потоком и опускным потоком в пограничном слое по периметру канала. Ячейки ограничены местами сужения канала, где происходит переход подъемного потока на противоположную сторону и передача тепла встречному опускному потоку. Ширина канала плюма соизмерима с толщиной плоского слоя. Высота ячеек изменяется в зависимости от мощности на подошве плюма.

Определена мощность, передаваемая в окружающий массив в режиме стационарной теплопроводности от канала плюма, и относительная тепловая мощность на подошве плюма $Ka = N/N_1$. Режим выхода плюма на поверхность зависит от относительной мощности, и при $Ka > 1,14$ плюм выходит на поверхность с образованием грибообразной головы. Этот случай может соответствовать образованию батолитов в Андской зоне субдукции. Результаты исследований показали, что структура канала плюма в плоском слое соответствует структуре плюма, образующегося в сплошном твердом массиве, то есть, эта структура – ячеистая. Различия в гидродинамической и тепловой структуре наблюдаются из-за твердых ограничивающих слоев поверхностей. Угол наклона плоского слоя относительно вектора силы тяжести, равный 2° , не оказывает заметного влияния на структуру канала.

Работа выполнена по государственному заданию ИГМ СО РАН при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации

Список литературы

1. Аллисон А., Палмер Д. Геология. М.: Мир, 1984. 568 с.
2. Добрецов Н. Л., Кирдяшкин А. Г., Кирдяшкин А. А. Глубинная геодинамика. Новосибирск: Изд-во СО РАН: GEO, 2001. 408 с.
3. Funicello F., Moroni M., Piromallo C., Faccenna C., Cenedese A., Bui H. A. Mapping mantle flow during retreating subduction: laboratory models analyzed by feature tracking // *Journal of Geophysical Research*. 2006. Vol. 111, B03402. DOI: 10.1029/2005JB003792.
4. 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, pp. 433–447.
5. Király A., Funicello F., Capitanio F. A., Faccenna C. Dynamic interactions between subduction zones // *Global and Planetary Change*. 2021. Vol. 202, 103501. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2021.103501>.
6. Schellart W. P., Strak V. A review of analogue modelling of geodynamic processes: approaches, scaling, materials and quantification, with an application to subduction experiment // *Journal of Geodynamics*. 2016. Vol. 100. P. 7–32.
7. Schellart W. P., Strak V. Geodynamic models of short-lived, long-lived and periodic flat slab subduction // *Geophysical Journal International*. 2021. Vol. 226, no 3, pp. 1517–1541.

References

1. Allison A., Palmer D. *Geologiya* (Geology). Moscow: Mir, 1984. 568 p.
2. Dobretsov N. L., Kirdyashkin A. G., Kirdyashkin A. A. *Glubinnaya geodinamika* (Deep-level geodynamics). Novosibirsk: Publishing House of SB RAS: GEO, 2001. 409 p.
3. Funicello F., Moroni M., Piromallo C., Faccenna C., Cenedese A., Bui H. A. *Journal of Geophysical Research* (Journal of Geophysical Research), 2006, vol. 111, B03402. DOI: 10.1029/2005JB003792.
4. Gladkov I. N., Distanov V. E., Kirdyashkin A. A., Kirdyashkin A. G. *Fluid Dynamics* (Fluid Dynamics), 2012, vol. 47, no. 4, pp. 433–447.
5. Király A., Funicello F., Capitanio F. A., Faccenna C. *Global and Planetary Change* (Global and Planetary Change), 2021, vol. 202, 103501. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2021.103501>.

6. Schellart W. P., Strak V. *Journal of Geodynamics* (Journal of Geodynamics), 2016, vol. 100, pp. 7–32.

7. Schellart W. P., Strak V. *Geophysical Journal International* (Geophysical Journal International), 2021, vol. 226, no 3, pp. 1517–1541.

Информация об авторе

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, доцент кафедры общей и региональной геологии геолого-геофизического факультета, Новосибирский государственный университет, г. Новосибирск, Россия. Область научных интересов: лабораторное и теоретическое моделирование геодинамических процессов, тектонофизика, геотектоника
aak@igm.nsc.ru

Кирдяшкин Анатолий Григорьевич, д-р техн. наук, ведущий научный сотрудник лаборатории физического и химического моделирования геологических процессов, Институт геологии и минералогии им. В. С. Соболева СО РАН, заслуженный деятель науки РФ, лауреат Государственной премии РФ, г. Новосибирск, Россия. Область научных интересов: лабораторное и теоретическое моделирование геологических процессов, сочетание геодинамического и петрологического моделирования, использование законов и методов теплофизики в задачах геодинамики, рост кристаллов
agk@igm.nsc.ru

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. Область научных интересов: геодинамика, конвективный теплообмен, физическое моделирование, рост кристаллов
dist@igm.nsc.ru

Гладков Игорь Николаевич, научный сотрудник лаборатории физического и химического моделирования геологических процессов, Институт геологии и минералогии им. В. С. Соболева СО РАН, г. Новосибирск, Россия. Область научных интересов: геодинамика, лабораторное моделирование мантийных плюмов
kir@igm.nsc.ru

Непогодина Юлия Михайловна, инженер-исследователь лаборатории физического и химического моделирования геологических процессов, Институт геологии и минералогии им. В. С. Соболева СО РАН, г. Новосибирск, Россия. Область научных интересов: теплофизическое моделирование геодинамических процессов
nepogodina@igm.nsc.ru

Information about the author

Aleksey Kirdyashkin, doctor of geology and mineralogy sciences, professor of the 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, associate professor, General and Regional Geology Department, Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russia. Sphere of scientific interests: laboratory and theoretical modeling of geodynamic processes, tectonophysics, geotectonics

Anatoly Kirdyashkin, doctor of technical sciences, leading researcher, Laboratory of Physical and Chemical Modeling of Geological Processes, V. S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy SB RAS, honored scientist of the Russian Federation, State prize of the Russian Federation laureate, Novosibirsk, Russia. Sphere of scientific 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

Valery Distanov, senior researcher, Laboratory of Physical and Chemical Modelling of Geological Processes, V. S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy SB RAS, Novosibirsk, Russia. Sphere of scientific interests: geodynamics, convective heat transfer, physical modeling, crystal growth

Igor Gladkov, researcher, Laboratory of Physical and Chemical Modelling of Geological Processes, V. S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy SB RAS, Novosibirsk, Russia. Sphere of scientific interests: geodynamics, laboratory modeling of mantle plumes.

Yulia Nepogodina, research engineer, Laboratory of Physical and Chemical Modeling of Geological Processes, V. S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy SB RAS, Novosibirsk, Russia. Sphere of scientific interests: thermophysical modeling of geodynamic processes.

Для цитирования

Кирдяшкин А. А., Кирдяшкин А. Г., Дистанов В. Е., Гладков И. Н., Непогодина Ю. М. Структура канала плюма, формирующегося в плоском слое (моделирование плюма в зоне субдукции) // Вестник Забайкальского государственного университета. 2021. Т. 27, № 8. С. 26–34. DOI: 10.21209/2227-9245-2021-27-8-26-34.

Kirdyashkin A., Kirdyashkin A., Distanov V., Gladkov I., Nepogodina Yu. Structure of a plume conduit forming in a flat layer (modeling of a plume in a subduction zone) // Transbaikal State University Journal, 2021, vol. 27, no. 8, pp. 26–34. DOI: 10.21209/2227-9245-2021-27-8-26-34.

Статья поступила в редакцию: 14.10.2021 г.

Статья принята к публикации: 18.10.2021 г.