

УДК 551.2+551.14+536.25
DOI: 10.21209/2227-9245-2021-27-9-12-22

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЛЮМА, ОБРАЗУЮЩЕГОСЯ В НАКЛОННОМ ПЛОСКОМ КОРОВОМ СЛОЕ СУБДУЦИРУЮЩЕЙ ОКЕАНИЧЕСКОЙ ПЛИТЫ

EXPERIMENTAL MODELING OF A PLUME FORMING IN AN INCLINED FLAT CRUSTAL LAYER OF A SUBDUCTING OCEANIC PLATE



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

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



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

A. Kirdyashkin,
V. S. 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



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

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



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

A. Borodin,
V. S. Sobolev Institute of Geology and
Mineralogy SB RAS, Novosibirsk

Представлены результаты экспериментальных исследований тепловой и гидродинамической структуры канала плюма, выплавляемого в плоском наклонном слое над локальным источником тепла. Для различных тепловых мощностей на подошве плюма представлены эволюция структуры канала плюма и выход плюма на поверхность. Установлено, что при мощности нагревателя $N = 5,6$ Вт и $N = 6,4$ Вт и относительной мощности $Ka = 1,18$ плюм не достигает поверхности наклонного слоя. При $N = 7,9$ Вт

($Ka = 1,42$) и $N = 8,9$ Вт ($Ka = 1,53$) плюм выходит на поверхность, и первая ячейка плюма (голова плюма) имеет грибообразную форму. В зависимости от величины критерия Ka (относительной тепловой мощности) изменяется структура верхней ячейки и режим выхода плюма на поверхность. Наблюдается подъемное течение у верхней ограничивающей поверхности наклонного слоя и опускающее по остальному периметру сечения канала плюма, а также продольные валиковые течения, оси которых ориентированы по направлению подъемного течения. Валиковые течения передают тепло от восходящего потока к нисходящему и уменьшают существующую в слое неустойчивую стратификацию. За счет этих течений увеличивается турбулентная вязкость расплава, что также уменьшает неустойчивую стратификацию. В области канала, где валиковые течения слабые, неустойчивая стратификация дополнительно компенсируется уширением канала плюма. Лабораторные эксперименты показали, что режим выхода плюма на поверхность в наклонном плоском слое зависит от величины критерия Ka , и эта закономерность отличается от закономерности выхода на поверхность плюмов, выплавляемых в сплошном твердом массиве

Ключевые слова: зона субдукции; термохимические плюмы; коровый слой; лабораторное моделирование; канал плюма; свободно-конвективные течения; тепловая мощность; грибообразная голова плюма; валиковые течения; неустойчивая стратификация

The results of experimental studies of the thermal and hydrodynamic structure of the plume conduit melted out in a flat inclined layer above a local heat source are presented. For different thermal powers on the plume base, the evolution of the plume conduit structure and the plume breakthrough on the surface are presented. It was found that for heater power $N = 5.6$ W and $N = 6.4$ W and relative power $Ka = 1.18$, the plume does not reach the surface of the inclined layer. For $N = 7.9$ W ($Ka = 1.42$) and $N = 8.9$ W ($Ka = 1.53$), the plume reaches the surface, and the first plume cell (plume head) has a mushroom shape. Depending on the value of the Ka criterion (relative thermal power), the upper cell structure and the regime of plume breakthrough on the surface change. There is an ascending flow at the upper bounding surface of the inclined layer and a descending flow along the rest of the perimeter of the plume conduit. Longitudinal roll flows are also observed. The roll axes are oriented in the direction of the ascending flow. The roll flows transfer heat from the ascending flow to the descending one and hence reduce the unstable stratification existing in the layer. Due to these flows, the turbulent viscosity of the melt increases, which also reduces unstable stratification. In the conduit portion, where the rolls are weak, unstable stratification is additionally compensated by the plume conduit widening. Laboratory experiments have shown that the regime of plume breakthrough on the surface of an inclined flat layer depends on the Ka criterion, and this dependence differs from that of plume breakthrough on the surface in an unbroken solid mass

Key words: subduction zone; thermochemical plumes; crustal layer; laboratory modeling; plume conduit; free convective flows; thermal power; mushroom-shaped plume head; convection rolls; unstable stratification

Введение. Движение океанической литосферы, опускающейся в зоне субдукции, определяется по расположению сейсмофокальных зон, по очагам землетрясений [2; 3]. Литосферная плита погружается в мантию при различных наклонах относительно направления вектора ускорения силы тяжести [2; 5; 6].

На основе имеющихся геофизических и геологических данных и данных об удельных тепловых потоках, распределения их на поверхности и по глубине верхней мантии,

анализ структуры течения и теплообмена показал, что источником тепла, порождающим вулканизм в зоне субдукции, является граница верхней-нижней мантии, расположенная на глубине 670 км¹ [1; 2]. Плюм зарождается в коровом слое океанической литосферной плиты как термохимический и поднимается (проплавляется) в наклонном плоском коровом слое до поверхности Земли. Плюм на поверхности проявляется в виде вулканической деятельности. Термохимический плюм зарождается в области понижения темпе-

¹ 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.

ратуры плавления в твердом коровом слое при наличии в нем химической добавки, понижающей температуру плавления. Подъем плюма происходит в плоском наклонном коровом слое, ограниченном с одной стороны океанической субдуцирующей литосферой, а с другой – массивом верхней мантии (в океаническом крыле зоны субдукции).

Объектом экспериментального исследования является структура плюма в плоском наклонном слое над локальным источником тепла. Такой плюм представляет собой модель термохимического плюма, формирующегося в зоне субдукции. Определяется тепловая мощность, отданная окружающему массиву каналом плюма, ее влияние на режимы выхода плюма на поверхность, а также структура канала плюма, гидродинамическая структура течения в расплаве канала в зависимости от тепловой мощности на подошве плюма.

Экспериментальная установка и методика эксперимента. Экспериментальные исследования проводились на установке, схема которой представлена на рис. 1. Экспериментальная установка выполнена на деревянной плите высотой 400 мм, шириной 240 мм, толщиной 40 мм, представляющей собой заднюю стенку. Передняя стенка – оргстеклянная прозрачная пластина высотой 400 мм, шириной 240 мм, толщиной 5 мм. Она укреплялась через уплотнительный фланец шириной и толщиной по 10 мм шурупами, так что рабочий объем, в котором находился парафин, был толщиной 11,5 мм. На дне установки в рабочем объеме закреплялся электронагреватель диаметром 8 мм, высотой 50 мм.

Нагреватель подключался к стабилизированному источнику постоянного тока DC Power Supply H43020E. Для охлаждения рабочего объема использовались силиконовые шланги, которые прижимались к оргстеклянной пластине по ее вертикальным торцам с помощью скоб. По трубкам прокачивалась термостатированная вода, трубки подключались к термостату УТ-4. Толщина рабочего слоя, который заполнялся парафином, – 11,5 мм, высота – 390 мм, ширина – 200 мм. Источник постоянной необходимой мощности включался после включения термостата и установления в рабочем объеме заданной температуры. Продолжительность экспериментальных исследований состав-

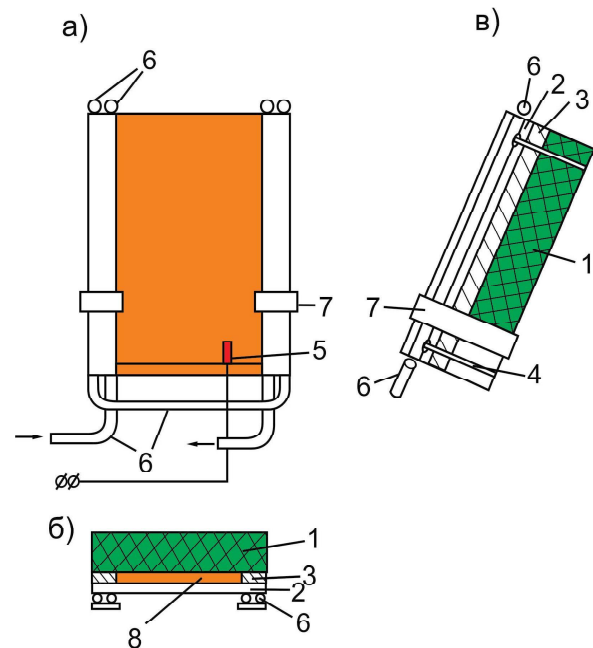


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: а – вид спереди; б – вид сверху; в – вид сбоку; 1 – задняя стенка слоя; 2 – оргстеклянная прозрачная пластина; 3 – уплотнительный фланец; 4 – шурупы; 5 – электронагреватель; 6 – силиконовые шланги; 7 – скоба / Fig. 1. The scheme of the experimental setup: а – front view; б – top view; в – side view; 1 – back wall of the layer; 2 – transparent plexiglas plate; 3 – sealing flange; 4 – screws; 5 – electric heater; 6 – silicone tubes; 7 – bracket

ляла 5...8 суток. Через определенные промежутки времени картину течения в канале плюма фотографировали. Визуализация течения осуществлялась помещенными в расплав алюминиевыми частицами размером 20...30 мкм.

Величина относительной тепловой мощности для модельных плюмов. Эксперименты выполнялись в течение 97 ... 153 ч. Теплообмен между каналом плюма и окружающим массивом происходит в условиях теплопроводности. В самом же канале плюма, представляющем собой расплав, гидродинамические и тепловые процессы совершаются в условиях свободной конвекции. Процесс теплообмена в наклонном слое парафина происходит в условиях нестационарной теплопроводности: как в период выплавления канала, так и в период перестройки структуры течения в канале расплава.

При кондуктивном теплообмене нестационарность количественно характеризуется критерием Фурье [1]: $Fo = at/L^2$, где a – коэффициент температуропроводности, t – время, L – характерный размер массива. В нашем случае $a = 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$, $L = 0,12 \text{ м}$ (половина ширины рабочего объема установки). Согласно размерности величин, входящих в критерий Fo , характерное время для нестационарного процесса теплообмена $t = L^2/a$. В нашем случае $t = 4 \text{ ч}$. Время проведения эксперимента должно быть значительно больше 4 ч.

Исследования структуры канала плюма выполнены при тепловой мощности на нагревателе 5,6 Вт; 6,4 Вт; 7,9 Вт; 8,9 Вт. В процессе выплавления плюма (подъема кровли плюма) тепловая мощность на подошве плюма N расходовалась на плавление у подошвы плюма ($N_{пл}$) и отдавалась от канала плюма в окружающий массив ($N_{м}$). В установившемся режиме, когда плюм достиг максимальной высоты при заданной мощности на его подошве и не вышел на поверхность парафинового слоя, тепловая мощность на подошве плюма равна тепловой мощности, отданной каналом плюма в окружающий массив. Особенность процесса кондуктивного теплопереноса от канала плюма в массив состоит в том, что из-за неустойчивости процесса свободно-конвективного теплообмена в канале плюма возникает нестационарный кондуктивный теплообмен в окружающем массиве.

Увеличение тепловой мощности, отданной каналом плюма в окружающий массив вследствие нестационарного кондуктивного теплообмена, составляет $0,15 N$ [4]. Поэтому в условиях стационарного кондуктивного теплообмена тепловая мощность, отданная в окружающий массив от канала плюма, будет $N_1 = N - 0,15N$, т. е. $N_1 = 0,85N$. Величина удельного расхода тепла на единицу длины канала плюма:

$$q_1 = N_1/H = 0,85N/H,$$

где H – длина выплавленного канала плюма.

При мощности $N = 5,6 \text{ Вт}$ высота выплавленного канала плюма равна 250 мм. В этом случае $q_1 = 19 \text{ Вт/м}$. При определении высоты плюма учитывается и линейный размер нагревателя, равный 50 мм. При мощности на подошве плюма $N = 6,4 \text{ Вт}$ плюм также не вышел на поверхность. Длина канала плюма

$H = 237 \text{ мм} + 50 \text{ мм} = 287 \text{ мм}$. Удельное количество тепла, отданное в окружающий массив от поверхности канала плюма, $q_1 = 19 \text{ Вт/м}$. Для различных значений N величина удельного теплового потока на единицу высоты канала одинаковая. При тепловой мощности на нагревателе $N = 5,6 \text{ Вт}$ и $N = 6,4 \text{ Вт}$ мощность, отданная каналом плюма в окружающий массив, равна соответственно $N_1 = 4,76 \text{ Вт}$ и $5,44 \text{ Вт}$. Относительная величина мощности $Ka = N/N_1$ для $N = 5,6 \text{ Вт}$ и $N = 6,4 \text{ Вт}$ равна $Ka_1 = 1,18$. Таким образом, при $Ka \leq 1,18$ плюм не выходит на поверхность слоя.

При тепловой мощности $N = 7,9 \text{ Вт}$ и $N = 8,9 \text{ Вт}$ длина выплавленного канала плюма равна $H = 292 \text{ мм}$ и 305 мм соответственно. Тепловая мощность, отданная каналом плюма, $N_1 = q_1 H$, и для $N = 7,9 \text{ Вт}$ и $N = 8,9 \text{ Вт}$ она равна $5,55 \text{ Вт}$ и $5,8 \text{ Вт}$ соответственно. Величина критерия $Ka = N/N_1 = 1,42$ для $N = 7,9 \text{ Вт}$ и $Ka = 1,53$ для $N = 8,9 \text{ Вт}$. При этих значениях Ka плюм выходит на поверхность и образует первую ячейку в виде грибообразной головы. В случае выплавления канала плюма в объеме твердого массива над локальным источником тепла грибообразная голова плюма образуется при $Ka > 1,9$ [6]. Величина критерия Ka характеризует режим выхода плюма на поверхность². При выходе плюма на поверхность тепловая мощность на подошве плюма расходуется на тепло, отданное каналом плюма в окружающий массив $N_{м}$, и тепло, отданное в атмосферу: $\Delta N_a = N - N_{м}$. Количество тепла, отданного в атмосферу, зависит от структуры кровли плюма, а значит, от структуры первой ячейки. Поэтому критерий Ka характеризует режим выхода плюма на поверхность и особенности проявления плюма на поверхности Земли.

Структура канала плюма и структура течения расплава в нем. Гидродинамические процессы в условиях свободной конвекции происходят в условиях неустойчивой стратификации в расплаве канала плюма: источник тепла у подошвы плюма, а охлаждение расплава в канале плюма происходит за счет отвода тепла от канала плюма в окружающий массив. Плотность расплава возрастает с высотой канала. В сплошном твердом массиве над локальным источником тепла выплавляется вертикальный канал плюма.

² 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.

Как показали экспериментальные исследования, структура канала в этих условиях ячеистая. В каждой ячейке увеличение давления, создающееся вследствие неустойчивой стратификации в области сужения канала, компенсируется на подошве ячейки увеличением динамического давления встречных потоков – опускного и подъемного [4]. В этой же области сужения подогревается охлажденный опускной поток встречным более горячим подъемным потоком, и происходит увеличение диаметра канала вниз от области сужения канала.

В наклонном плоском слое вектор силы тяжести можно представить в виде двух составляющих: нормальной составляющей к поверхности, ограничивающей слой (g_y), и составляющей, параллельной ограничивающим плоскостям (g_x) (рис. 2а). Соответственно, неустойчивая стратификация в слое имеет две составляющие. Увеличение давления из-за составляющей неустойчивой стратификации, нормальной к стенке, компенсируется ограничивающей нижней плоскостью. Продольная составляющая (в направлении g_x) может компенсироваться вследствие гидродинамических процессов в условиях свободной конвекции.

Экспериментальные исследования по изучению структуры канала и свободно-конвективных течений расплава в нем проведены при угле наклона слоя относительно вектора силы тяжести $\alpha = 23^\circ$ для различных значений тепловой мощности на подошве плюма. Для различных участков канала от его подошвы представлены фотографии течения. Для различных областей по длине канала получены видеозаписи картин течения расплава в канале, позволяющие понять сложную структуру свободно-конвективных течений.

На рис. 3а представлена фотография канала плюма, выплавленного при мощности нагревателя $N = 5,6$ Вт в эксперименте, продолжающемся 145,5 ч. В этом случае длина канала 250 мм. Нагретый расплав поднимается от нагревателя к верхней ограничивающей поверхности и движется вдоль нее до кровли плюма. Плюм не выходит на поверхность. Толщина непроплавленного твердого массива составляет 36 мм.

Далее приведем относительные размеры, представляющие отношения их к толщине плоского слоя $\delta = 11,5$ мм. Относительные величины удобны при рассмотрении объек-

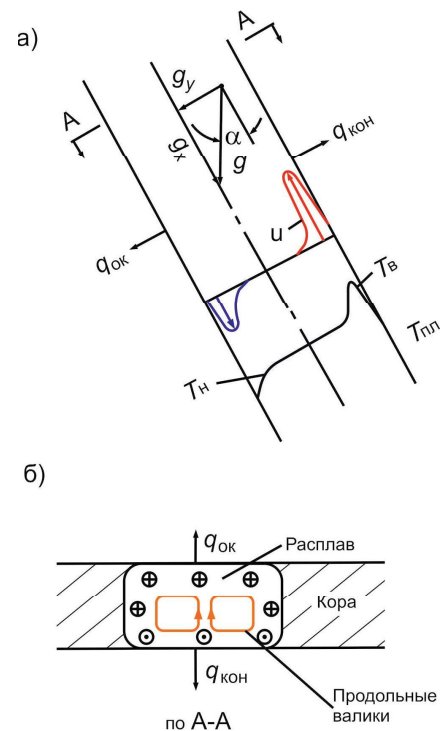


Рис. 2. Структура свободно-конвективных течений в канале плюма, образующегося над локальным источником тепла в наклонном плоском слое: а – профили скорости и температуры в канале плюма; б – структура течения в поперечном сечении канала плюма; точки – подъемный поток; крестики – опускной поток / Fig. 2. Free-convection flow structure in a plume conduit formed above local heat source in an inclined flat layer: а – velocity and temperature profiles in the plume conduit; б – flow structure in the cross section of the plume conduit; dots – ascending flow; crosses – descending flow

тов различных размеров. Наблюдаются три характерные области по высоте канала, относительная длина которого $H/\delta = 21,7$: голова плюма, высота которой 2,1 (от кровли плюма), вторая область от глубины 2,1 до 8,7 (100 мм), третья область – от нижней границы второй области до основания установки 22. Размеры этих областей соответственно следующие: 2,1; 6,6 и 13,2.

На рис. 3б представлена фотография головы плюма. Аллюминиевые чешуйки ориентированы по направлению потока, поэтому поток, уходящий от верхней ограничивающей поверхности, представлен более темным светом, чем продольный поток вдоль ограничивающей пластины. Границы головы плюма (расплава) представлены темным контуром. По вертикальной оси ячейки наблюдается по-

темнение, вызванное существованием двух симметричных конвективных валиков, границы которых – области потемнения, вызванные уходящим потоком от верхней ограничивающей стенки, как это показано на рис. 3б. Валиковые конвективные течения образуются вследствие охлаждения верхней поверхности наклонного слоя. В первой и второй областях по длине канала эти валиковые течения слабые.

Таким образом, структура течения представляет собой сочетание подъемного потока у верхней ограничивающей поверхности, опускного – у нижней и торцевых поверхностей канала плюма, и валиковых течений – у верхней ограничивающей поверхности, как это схематически показано на рис. 2б. Валиковые течения передают тепло от горячего восходящего потока к холодному нисходящему и уменьшают (компенсируют) существующую по высоте слоя неустойчивую стратификацию, вызванную повышением плотности с уменьшением глубины. Валиковые течения вызывают увеличение так называемой турбулентной вязкости в расплаве, что также спо-

собствует уменьшению неустойчивой стратификации.

Во второй области (ниже головы плюма) наблюдается увеличение ширины канала с глубиной от значения 1 до 2 на глубине 8,7. Это вызвано тем, что свободно-конвективный теплообмен, вызванный валиковыми течениями, не может подавить неустойчивую стратификацию на этом участке канала плюма из-за слабого охлаждения со стороны верхней ограничивающей поверхности, что порождает низкие скорости течения в валиках. Поэтому включается второй способ компенсации неустойчивой стратификации: увеличение ширины канала плюма, которое действует совместно с валиковым течением и компенсирует влияние неустойчивой стратификации.

В третьей области ширина слоя составляет 1,9 и слабо изменяется с увеличением глубины. Но в этой области существует активное валиковое течение, как следует из рис. 3в, которое и обеспечивает компенсацию неустойчивой стратификации на этом участке канала.

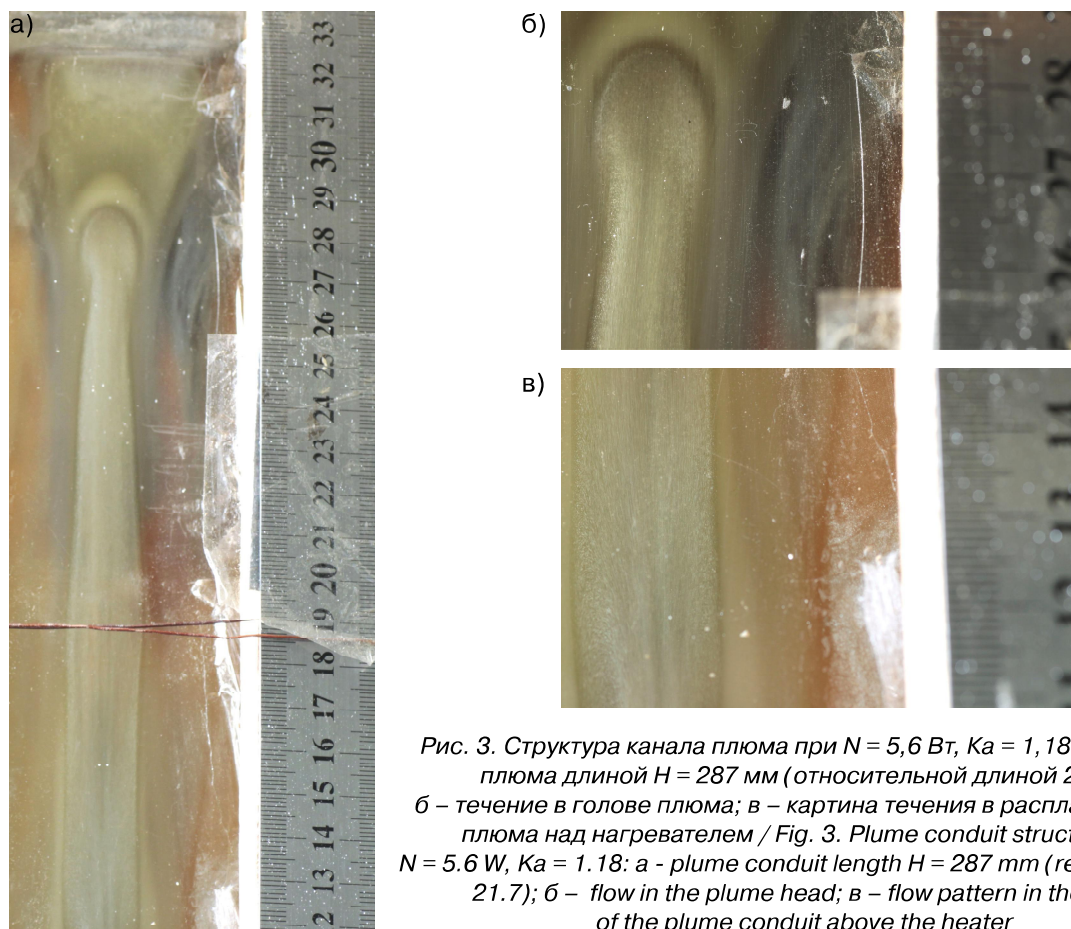


Рис. 3. Структура канала плюма при $N = 5,6$ Вт, $Ka = 1,18$: а – канал плюма длиной $H = 287$ мм (относительной длиной 21,7); б – течение в голове плюма; в – картина течения в расплаве канала плюма над нагревателем / Fig. 3. Plume conduit structure for $N = 5.6$ W, $Ka = 1.18$: а - plume conduit length $H = 287$ mm (relative length 21.7); б - flow in the plume head; в - flow pattern in the melt of the plume conduit above the heater

При тепловой мощности нагревателя $N = 6,4$ Вт плюм не выходит на поверхность (рис. 4а). Опыт был продолжительностью 96 ч 45 мин. Длина канала плюма, с учетом размера нагревателя, $H = 287$ мм (относительная длина 25). Длина верхней ячейки (головы плюма) равна 1,9 (22 мм). Наблюдается подъемное течение у верхней ограничивающей поверхности и опускное течение как у нижней ограничивающей поверхности, так и по границе канала у передней стенки, где наблюдается взаимодействие подъемного и опускного течений. Ниже глубины (отсчитываемой от кровли плюма) 1,9 (22 мм) и до 13,5 (155 мм) наблюдается монотонное

увеличение ширины канала от 1 (11,5 мм) до 1,7 (19 мм). В этой области канала дополнительно к компенсации неустойчивой стратификации путем интенсификации теплообмена валиковым течением включается и второй механизм – увеличение ширины ячейки с глубиной.

В области по высоте ячейки ниже 13,5 до основания плюма, т. е. до глубины 25 (287 мм) компенсация неустойчивой стратификации происходит с помощью интенсификации теплообмена продольными валиковыми течениями. Это видно из рис. 4б, где представлена фотография картины течения у основания плюма. Наблюдается уходящий поток у передней стенки. На фотографии по оси канала наблюдается потемнение, связанное с тем, что алюминиевые чешуйки ориентируются своей плоскостью по направлению потока, а в торце чешуйки отражение света слабое и возникает потемнение на фотографии. В этой области на высоте канала ширина ячейки составляет 17 мм (1,5) и слабо изменяется по высоте канала. Структура течения в этом случае имеет сложный характер и схематически представлена на рис. 2.

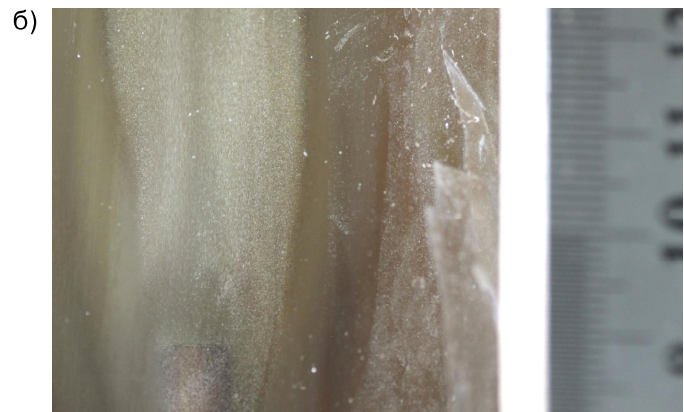
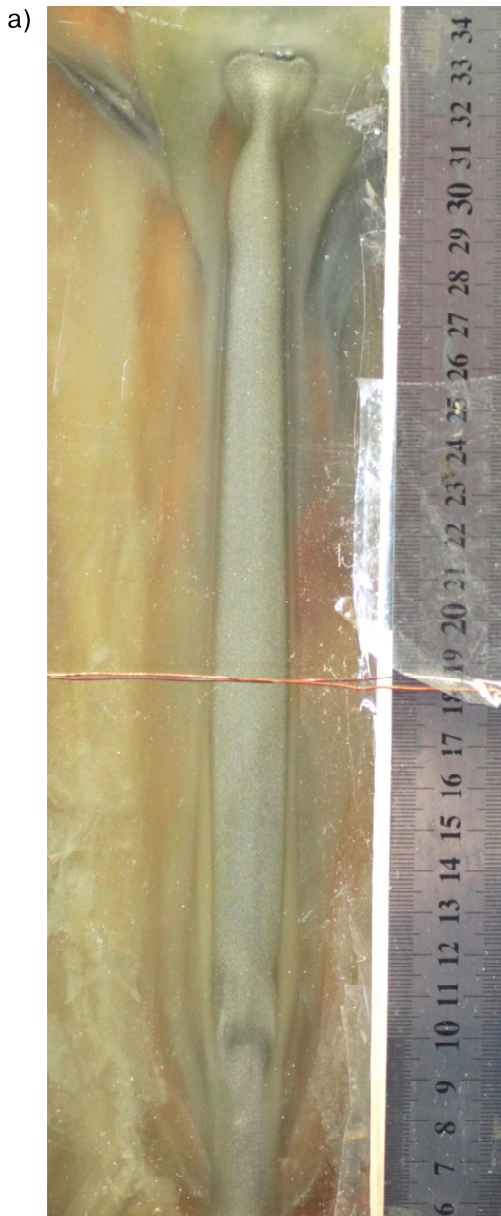


Рис. 4. Структура канала плюма при $N = 6,4$ Вт, $Ka = 1,18$: а – канал плюма длиной $H = 287$ мм (относительной длиной 25); б – фотография картины течения над нагревателем / Fig. 4. The structure of the plume conduit for $N = 6.4$ W, $Ka = 1.18$: а – the plume conduit with a length of $H = 287$ mm (relative length 25); б – the flow pattern above the heater

При мощности $N = 7,9$ Вт ($Ka = 1,42$) и $N = 8,9$ Вт ($Ka = 1,53$) плюм выходит на поверхность, и первая (верхняя) ячейка представляет собой грибовидную голову плюма. Подробно представим структуру канала плюма при $N = 8,9$ Вт (рис. 5). Длина канала соответствует длине плоского слоя парафина (рис. 5а): 305 мм (26,5). Верхняя ячейка (голова плюма) имеет вид воронки (гриба) высотой 60 мм (5,2). Ширина кровли плюма – 60 мм (5,2) и в области сопряжения с каналом – 25 мм (2,2).

На рис. 5б представлена картина течения в расплаве головы плюма у передней стенки слоя. По ширине канала ~ 20 мм наблюдается подъемный поток. Опускное течение контрастно показано в виде границы потемнения. Это означает, что возникает течение, нормальное к ограничивающей поверхности. Опускное течение существует по периметру ячейки, исключая область подъемного течения у передней стенки. По высоте канала наблюдается две области: от границы первой ячейки до глубины, отсчитываемой от кровли плюма, 105 мм (9,1) и от границы 105 мм до подошвы плюма 305 мм (26,5), разделенные смещением оси канала. Последнее указывает на возникновение неустойчивости подъемного потока у передней стенки и его влияние на более медленное по скорости опускное течение по остальному периметру сечения канала. Ширина ячейки незначительно изменяется по этим двум областям канала и составляет 20 мм (1,7).

С увеличением тепловой мощности на подошве плюма возникает усложнение течения в канале, связанное с интенсификацией теплообмена от стенки: количество продольных валиков по ширине канала возрастает и течение в них имеет неустойчивый характер, как это видно из рис. 5в.

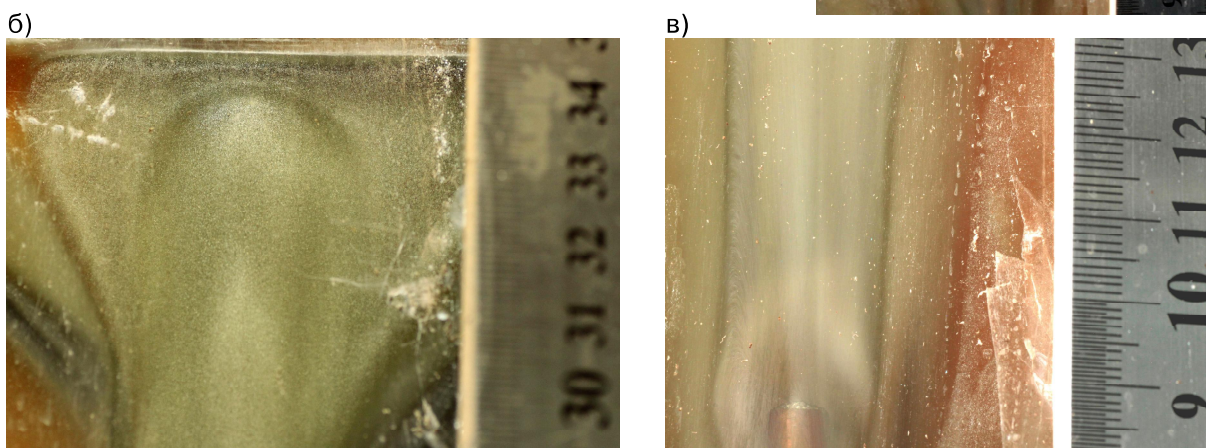


Рис. 5. Структура канала плюма в плоском слое при $N = 8,9$ Вт, $Ka = 1,53$: а – фотография канала плюма длиной $H = 305$ мм (относительной длиной 26,5); б – картина течения в грибовидной голове плюма; высота ячейки – 60 мм (5,3); в – картина течения над источником тепла / Fig. 5. The structure of the plume conduit in a flat layer for $N = 8.9$ W, $Ka = 1,53$: а – a photo of the plume conduit with a length of $H = 305$ mm (relative length 26,5); б – flow pattern in the mushroom-shaped plume; the cell height is 60 mm (5,3); в – flow pattern above the heat source

Заключение. Мантийные плюмы, зарождающиеся на границе ядро–мантия, развиваются и существуют в мантии в условиях тепловой гравитационной (свободной) конвекции, и канал плюма расположен усредненно вертикально. Температура расплава, усредненная по поперечному сечению канала плюма, понижается с высотой. Поэтому развитие свободно–конвективных течений в канале происходит в условиях неустойчивой стратификации. Вертикальный градиент средней по сечению температуры в канале направлен противоположно вектору силы тяжести. В этом случае неустойчивая стратификация компенсируется в сужениях конвективных ячеек. Структура канала ячеистая.

В зоне субдукции плюм зарождается на границе 670 км и выплавляется в коровом слое океанической субдуцирующей плиты, погружающейся с определенным углом наклона относительно вектора силы тяжести. Это плоский слой, ограниченный с одной стороны плитой, а с другой – мантией. В этом случае в расплаве канала существует градиент средней температуры как вдоль направления движения плиты, так и по горизонтали. Поэтому в наклонном слое течение расплава имеет более сложную структуру, чем в вертикальном канале.

Экспериментальные исследования в плоском наклонном слое, выполненные для различных тепловых мощностей на подошве плюма, показали следующее. Компенсация неустойчивой стратификации по высоте ка-

нала плюма происходит за счет продольных валиковых течений, возникающих вдоль верхней границы слоя. Оси валиков расположены по направлению подъемных течений у ограждающей верхней поверхности. Продольные валиковые течения интенсифицируют передачу тепла от более горячего подъемного течения к более холодному опускному течению и уменьшают вертикальный градиент температуры. Валиковые течения, направленные нормально к основным подъемным и опускным течениям, увеличивают эффективную (турбулентную) вязкость и также способствуют компенсации неустойчивой стратификации. При недостаточности компенсации указанными способами, существует и другой: увеличение ширины канала плюма с глубиной.

В зависимости от тепловой мощности на подошве плюма изменяется тепловая и гидродинамическая структура головы плюма. Применительно к субдукционной зоне, величина критерия Ka определяет режим излияния расплава из канала плюма, формирующегося в наклонном коровом слое субдуцирующей плиты. Результаты экспериментальных исследований показали, что режим выхода плюма на поверхность в наклонном плоском слое зависит от величины относительной тепловой мощности на подошве плюма Ka и по характеру закономерности отличается от закономерности выхода на поверхность плюмов, выплавляемых в сплошном твердом массиве.

Благодарности

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

Список литературы

1. Кутателадзе С. С., Боришанский В. М. Справочник по теплопередаче. М.; Л.: Госэнергоиздат, 1958. 414 с.
2. Хаин В. Е., Ломизе М. Г. Геотектоника с основами геодинамики. М.: КДУ, 2005. 560 с.
3. Barazangi M., Isacks B. L. Subduction of the Nazca plate beneath Peru: evidence from spatial distribution of earthquakes // *Geophysical Journal of Royal Astronomical Society*. 1979. Vol. 57. P. 537–555.
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. Gutscher M.-A., Malavieille J., Lallemand S., Collot J.-Y. Tectonic segmentation of the North Andean margin: impact of the Carnegie Ridge collision // *Earth and Planetary Science Letters*. 1999. Vol. 168. P. 255–270.
6. Jacob J., Dymant J., Ghosal D., Dewangan P. Strike-slip seismicity at the Andaman-Sumatra Subduction Zone: role of the fracture zones and age of the subducting lithosphere // *Tectonophysics*. 2021. Vol. 811. 228862. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2021.228862>.
7. Kukowski N. Wadati-Benioff-zone // *Encyclopedia of Marine Geosciences. Encyclopedia of Earth Sciences Series*. Dordrecht: Springer, 2016. P. 925–932. DOI: https://doi.org/10.1007/978-94-007-6238-1_108.

References

1. Kutateladze S. S., Borishansky V. M. *Spravochnik po teploperedache* (Handbook of heat transfer). Moscow, Leningrad: Gosenergoizdat, 1958. 414 p.
2. Hain V. E., Lomize M. G. *Geotektonika s osnovami geodinamiki* (Geotectonics with basics of geodynamics). Moscow: University Book House, 2005. 560 p.
3. Barazangi M., Isacks B. L. *Geophysical Journal of Royal Astronomical Society* (Geophysical Journal of Royal Astronomical Society), 1979, vol. 57, pp. 537–555.
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. Gutscher M.-A., Malavieille J., Lallemand S., Collot J.-Y. *Earth and Planetary Science Letters* (Earth and Planetary Science Letters), 1999, vol. 168, pp. 255–270.
6. Jacob J., Dymant J., Ghosal D., Dewangan P. *Tectonophysics* (Tectonophysics), 2021, vol. 811, 228862. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2021.228862>.
7. Kukowski N. *Encyclopedia of Marine Geosciences. Encyclopedia of Earth Sciences Series* (Encyclopedia of Marine Geosciences. Encyclopedia of Earth Sciences Series). Dordrecht: Springer, 2016, pp. 925–932. DOI: https://doi.org/10.1007/978-94-007-6238-1_108.

Информация об авторе

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

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

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

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

Бородин Андрей Васильевич, 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: экспериментальное моделирование геодинамических процессов borodin@igm.nsc.ru

Information about the author

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

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

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

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

Andrey Borodin, 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: experimental modeling of geodynamic processes

Для цитирования

Кирдяшкин А. Г., Кирдяшкин А. А., Гладков И. Н., Дистанов В. Э., Бородин А. В. Экспериментальное моделирование плюма, образующегося в наклонном плоском коровом слое субдуцирующей океанической плиты // Вестник Забайкальского государственного университета. 2021. Т. 27, № 9. С. 12–22. DOI: 10.21209/2227-9245-2021-27-9-12-22.

Kirbyashkin A., Kirbyashkin A., Gladkov I., Distanov V., Borodin A. Experimental modeling of a plume forming in an inclined flat crustal layer of a subducting oceanic plate // Transbaikal State University Journal, 2021, vol. 27, no. 9. pp. 12–22. DOI: 10.21209/2227-9245-2021-27-9-12-22.

Статья поступила в редакцию: 20.10.2021 г.

Статья принята к публикации: 29.10.2021 г.