



**Тринадцатая Международная научно-техническая конференция
«Оптические методы исследования потоков»
Москва, 29 июня— 03 июля 2015 г.**

УДК 555.3 : 536.42: 536.25

В.А. Арбузов^{1,2}, Э.В. Арбузов^{2,3}, В.С. Бердников^{1,2}, Ю.Н. Дубнищев^{1,2}, О.С. Мелёхина², Е.О. Шлапакова²

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе
Сибирского отделения Российской академии наук,
630090, г. Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева, 1.

²Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
«Новосибирский государственный технический университет»,
630092, г. Новосибирск, просп. К. Маркса, 20.

³Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт математики им. С.Л. Соболева
Сибирского отделения Российской академии наук,
630090, г. Новосибирск, просп. Академика Колтуга, 4.

E-mail: dubnistchev@itp.nsc.ru

**ОПТИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА ПОДЪЁМНЫХ ТЕЧЕНИЙ С РЕКОНСТРУКЦИЕЙ
ПРОСТРАНСТВЕННОЙ СТРУКТУРЫ ТЕПЛООВОГО ПОТОКА В ЗАДАЧАХ
ТЕРМОГРАВИТАЦИОННОЙ КОНВЕКЦИИ**

АННОТАЦИЯ

Методами гильберт-оптики и сдвиговой интерферометрии исследована структура плавучих струй, индуцированных в сильно вязкой жидкости внезапно включенным тепловым источником. Показана возможность реконструкции температурного поля струи в приближении плоской задачи. Приведены результаты сравнения сдвиговой интерферограммы, синтезированной из реконструированного температурного поля струи, с экспериментально полученной интерферограммой. Такие струи моделируют геодинамические процессы в мантии Земли на больших глубинах.

**ОПТИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА ПОТОКОВ, ГИЛЬБЕРТ–ОПТИКА,
ИНТЕРФЕРОМЕТРИЯ, ТЕРМОГРАВИТАЦИОННАЯ КОНВЕКЦИЯ, ПЛАВУЧИЕ СТРУИ.**

ВВЕДЕНИЕ

Термогравитационные струи (плюмы), индуцированные в сильно вязкой жидкости внезапно включенным тепловым источником, служат адекватной моделью течений, которые изучаются в задачах геодинамики, связанных с поведением мантии Земли на больших глубинах [1, 2]. Для экспериментального исследования динамической структуры таких струй необходимы не возмущающие технологии, реализуемые средствами оптики. В работе [3] методами гильберт-оптики и сдвиговой интерферометрии была визуализирована структура полей фазовой оптической плотности плюмов и показана возможность реконструкции температурного поля по распределению интерференционных полос. Достоверность проверялась путём гильберт-преобразования реконструированного температурного поля и сравнения восстановленного гильберт-образа с экспериментально полученным гильберт-

изображением плюма. Развитие и расширение сферы применения этих методов составляет мотивацию настоящей работы.

МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ И РЕЗУЛЬТАТЫ

Исследования термогравитационных струй выполнялись на экспериментальном комплексе, описанном в [3]. Объектом изучения являлись термогравитационные плавучие струи, которые индуцировались в слое сильно вязкой среды (полиэтилсилоксановая жидкость ПЭС–5) над внезапно включенным линейным источником тепла. Жидкость помещалась в кювете с прозрачными боковыми стенками оптического качества. Внутренние размеры полости $60 \times 190 \times 540$ мм. В центральном по длине полости сечении находится константановая проволока, ориентированная параллельно днищу и оптической оси системы визуализации. Расстояние между проволокой и дном 6,2 мм. Управляемый нагрев проволоки осуществляется постоянным током от стабилизированного источника питания. Система оптической диагностики была реализована на базе теневого прибора ИАБ–463М с модифицированным модулем осветительной системы, фильтрации и сдвигового интерферометра, выполненного по схеме интерферометра Маха–Цендера. В интерферометре настройка на полосы необходимой ширины и ориентации выполняются независимо от направления и величины сдвига между волновыми фронтами интерферирующих полей. Интерферограмма и гильберт-изображение фазовой структуры плюма регистрируются цифровой камерой.

На рис. 1 показан пример экспериментально полученной последовательности гильберт-изображений сдвиговых интерферограмм плюма, индуцированного внезапно включенным тепловым источником при токе 0,4 А.

На этом же рисунке представлена последовательность сдвиговых интерферограмм, иллюстрирующих эволюцию плюма при тех же режимах, что и гильберт-визуализация. Интерферометр сдвига был настроен на бесконечную полосу. Межкадровый интервал составляет 40 с. Температурное поле рассчитывалось по сдвиговой интерферограмме учётом известной линейной зависимости коэффициента преломления жидкости ПЭС–5 от температуры. Распределение интерференционных полос отображает распределение градиента оптической фазовой плотности. Опорное значение температуры определялось термопарой в невозмущённой зоне. Интерференционные полосы аппроксимировались полиномами Берштейна. Аналитическое задание кривых, скелетизирующих интерференционные полосы, позволяет определять их координаты в любом сечении интерферограммы. Для описания каждой линии достаточно 13 точек. Восстановление полей фазовой оптической плотности выполнялось в приближении плоской задачи, когда оптические фазовые возмущения в плюме усреднялись и интегрировались по толщине слоя жидкости, в котором индуцировалась термогравитационная струя. Восстановление фазовой функции и температурного плюма осуществлялось по интерферограмме с применением интерполяции сплайнами в среде *Matlab*.

На рис. 2 показано температурное поле плюма, реконструированное с применением описанной выше методики, экспериментально полученной сдвиговой интерферограмме, представленной на рис. 3. Достоверность полученного результата проверялась путём моделирования сдвиговой интерферограммы по реконструированному полю и сравнения её с экспериментально полученной.

Рис. 4 иллюстрирует синтезированную сдвиговую интерферограмму. Сравнение интерферограмм, представленных на рис. 3 и 4, иллюстрирует достоверность реконструированного температурного поля.

Разработанная методика может быть полезна для изучения плоских конвективных структур разнообразной физической природы. Примером такой структуры может быть конвективные течения, возникающие в пространстве между двумя теплообменниками, заполненном водой. Если температура верхнего теплообменника поддерживается на уровне ниже точки замерзания, а температура нижнего теплообменника выше нуля, в жидкости

возникают конвективные течения термогравитационной природы, имитирующие процессы в подводной части морского льда. Разработанная методика исследования конвективных структур и реконструкции температурных полей вполне адекватна этой задаче.

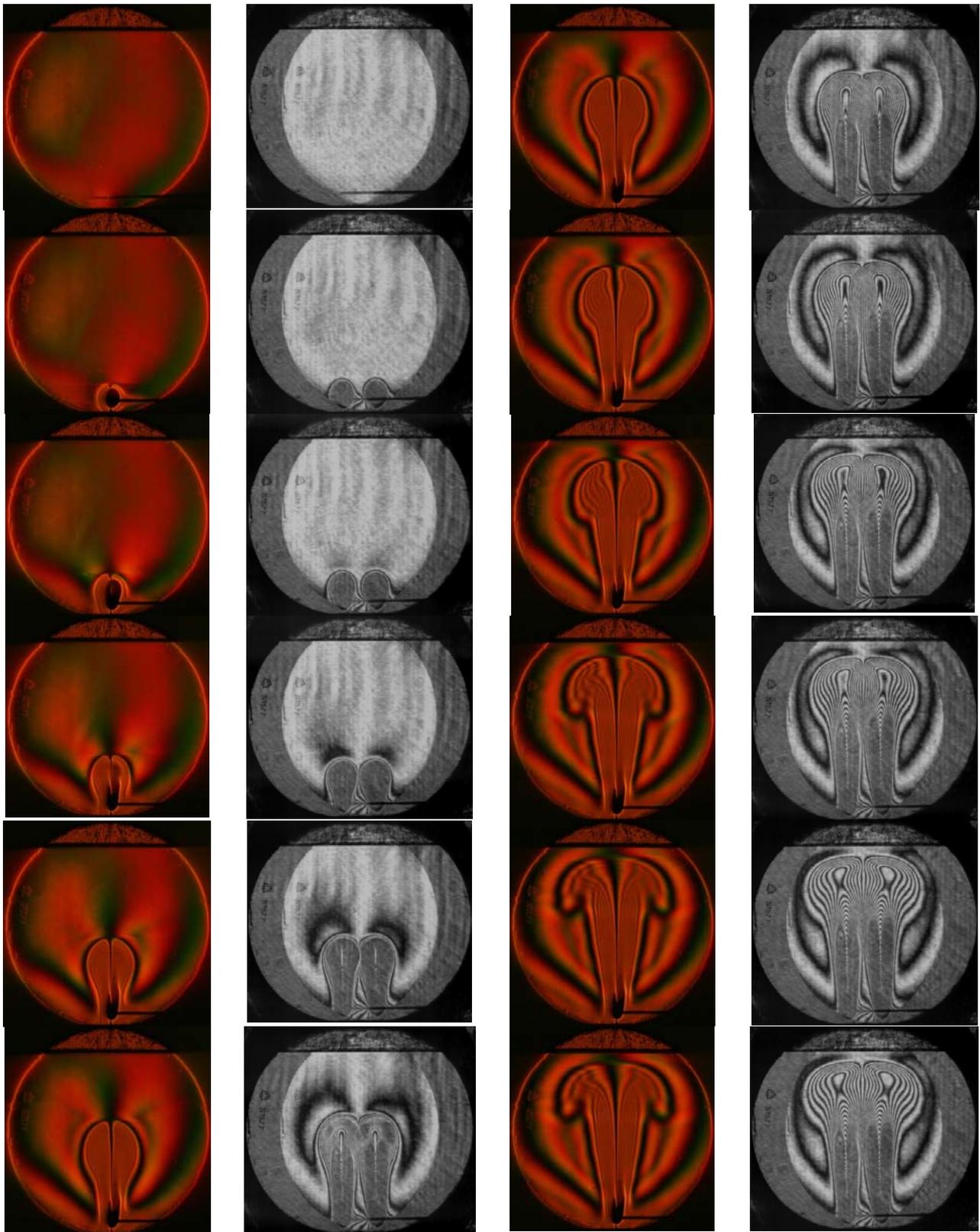
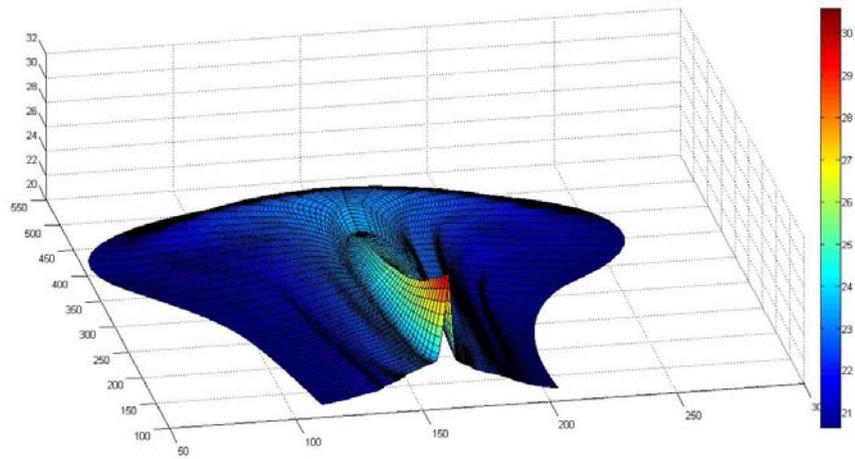
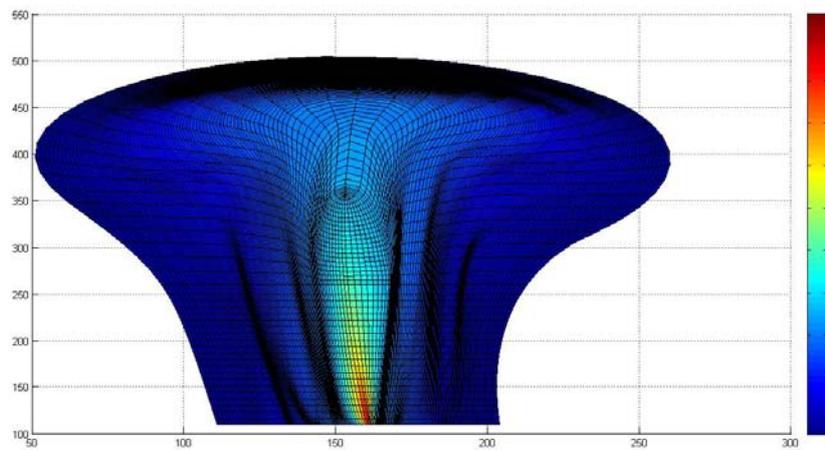


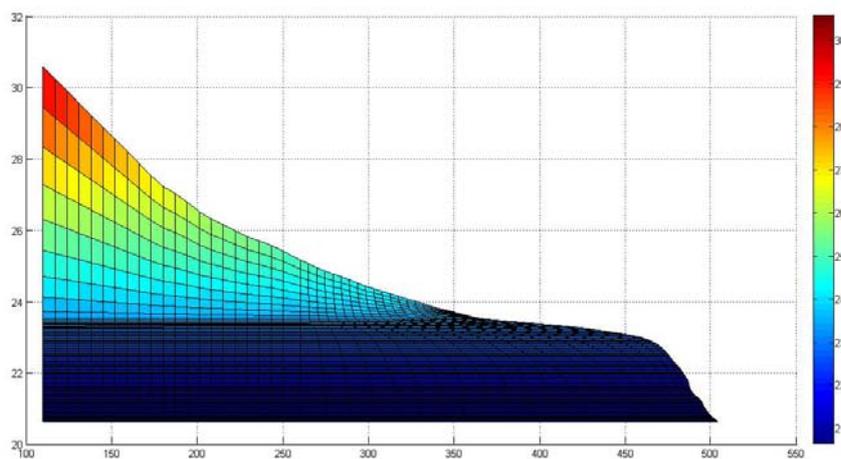
Рис. 1. Гильберт-изображения и сдвиговые интерферограммы



a



b



c

Рис. 2. Температурное поле плавучей струи: *a* – 3D-реконструкция; *b* – вид сверху; *c* – вид сбоку

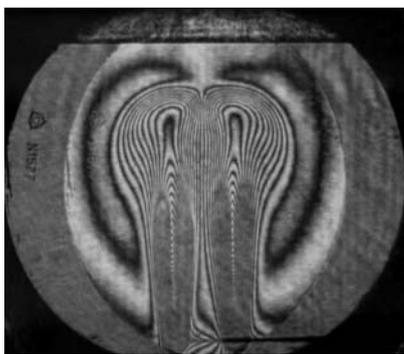


Рис. 3. Экспериментальная сдвиговая интерферограмма

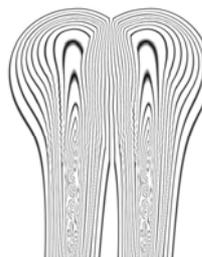


Рис. 4. Синтезированная сдвиговая интерферограмма

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработан метод исследования термогравитационных конвективных течений в приближении плоской задачи. Показана возможность визуализации распределения фазовой оптической плотности в таких структурах методами гильберт-оптики и сдвиговой интерферометрии. На примере термогравитационной струи, индуцированной внезапно включенным тепловым источником в сильно вязкой жидкости, показана возможность реконструкции теплового поля. Этот эксперимент моделирует геодинамические процессы в мантии Земли на больших глубинах. Обсуждается область применения разработанной методики.

Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ (проект № 14–08–00818).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Добрецов Н.Л., Кирдяшкин А.Г., Кирдяшкин А.А. Глубинная геодинамика. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2001, 409 с.
2. Ларра М. Thermal Convection: Patterns, Evolution and Stability. Hoboken, USA: John Wiley & Sons, 2010, 670 p.
3. Арбузов В.А., Арбузов Э.В., Бердников В.С., Буфетов Н.С., Дубнищев Ю.Н., Шлапакова Е.О. Оптическая диагностика структуры и эволюции плавучих струй в сильно вязкой жидкости // Автометрия. 2014. Т. 50, № 5. С. 47–50.

V.A. Arbuzov^{1,2}, E.V. Aprbuzov^{2,3}, V.S. Berdnikov^{1,2}, Yu.N. Dubnishchev^{1,2}, O.S. Melechina²,
E.O. Shlapakova²

¹ *Kutateladze Institute of Thermophysics,
Siberian Branch, Russian Academy of Sciences,
pr. Akademika Lavrent'eva, 1, Novosibirsk, 630090 Russia*

² *«Novosibirsk State Technical University»,
pr. K. Marksa, 20, Novosibirsk, 630092 Russia*

³ *Sobolev Institute of Mathematics,
Siberian Branch, Russian Academy of Sciences,
pr. Akademika Koptyuga, 4, Novosibirsk, 630090 Russia
630090, г. Новосибирск, просп. Академика Конюга, 4.*

E-mail: dubnistchev@itp.nsc.ru

OPTICAL DIAGNOSTICS OF UPWARD FLOWS WITH RECONSTRUCTION OF SPATIAL STRUCTURE OF HEAT FIELD AT THERMOGRAVITAL CONVECTION PROBLEMS

The buoyant jets induced in a highly viscous fluid by a heat source suddenly switched on are studied by methods of the Hilbert optics and shifting interferometry. Based on the fringes structure, reconstruction of the temperature field in the buoyant jet is performed. Shows the results of comparison of shear interferogram, synthesized from the reconstructed temperature field of the jet with the experimentally obtained interferogram. Such jets can be considered as a model of upward flows in the Earth's mantle at large depths.

**OPTICAL FLOW DIAGNOSTICS, HILBERT OPTICS, INTERFEROMETRY,
THERMOGRAVITAL CONVECTION, BUOYANT JETS**