

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМ. М.В.ЛОМОНОСОВА

ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ

На правах рукописи
УДК 551.465 551.23

ПАСТУХОВ ДМИТРИЙ ФЕЛИКСОВИЧ



ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ТЕРМИЧЕСКОГО РЕЖИМА
ГЕОТЕРМАЛЬНОГО ОЗЕРА ОТКРЫТОГО ТИПА

Специальность 04.00.23 - Физика атмосферы и гидросферы

Лист -

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

МОСКВА - 1996

Работа выполнена на кафедре физики моря и вод суши физического факультета Московского Государственного университета им. М.В.Ломоносова

Научный руководитель -
доктор физико-математических наук,
доцент Е.П.Анисимова

Официальные оппоненты -
доктор физико-математических наук,
профессор В.В.Алексеев
кандидат физико-математических наук
Е.Н.Долгополова

Ведущая организация -

Институт Океанологии РАН, г.Москва

Защита состоится "21" *марта* 1996 г. в 15⁰⁰
на заседании Специализированного Совета Д.053.05.81 по
геофизике в Московском Государственном университете им.
М.В.Ломоносова по адресу: 119899, г. Москва, Воробьевы
горы, МГУ, физический факультет, ауд. 5-18

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке физического факультета

Автореферат разослан "21" *февр.* 1996 г.

Ученый секретарь
Специализированного Совета
кандидат физико-математических наук


В.В.СМИРНОВ

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы: Работа посвящена изучению особенностей процессов теплообмена в геотермальном озере вулканического типа. Изучение процессов взаимодействия между гидросферой и атмосферой, а также между гидросферой и литосферой Земли является одной из приоритетных задач геофизики. Земля представляет собой единую систему, включающую в себя все внешние оболочки земного шара – твердую, жидкую и газообразную. При этом зона контакта между литосферой и гидросферой по площади занимает значительно большую часть земной поверхности, чем зона контакта между литосферой и атмосферой. В зоне взаимодействия литосферы и гидросферы особый интерес представляют области так называемого "активного дна", к которым принадлежат районы подводных землетрясений и геотермальных источников. Взаимодействие в зоне контакта твердой и жидкой оболочек Земли в областях "активного дна" легче исследовать на термальных озерах. Одной из немногих имеющихся на Земле активных геотермальных областей такого типа являются вулканические озера Камчатки (Карпов, 1986). Узон-Гейзерная система Камчатки – явление уникальное. Расположенные здесь озера представляют собой существенно незамкнутые термогидродинамические системы, тепловой режим и теплообмен в которых может значительно отличаться от теплового режима обычного вулканического озера закрытого типа. Представляется также, что система Узон-Гейзерной кальдеры близка к областям "активного дна" Мирового океана. Это обстоятельство повышает значимость изучения физических процессов в геотермальных озерах.

Настоящая работа посвящена изучению особенностей термического режима геотермального озера, принадлежащего Узон-Гейзерной гидротермальной системе.

Целью диссертационной работы явилось:

- проведение экспедиционных исследований физических характеристик геотермального озера открытого типа (оз.Банное на Камчатке);
- построение картин изотерм в озере и расчет тепловых потоков

в различных его областях;

- оценка мощности геотермальных источников в озере;
- построение картины линий тока в озере по данным о температурном поле в нем;

- выявление особенностей тепло- и массообмена вулканического озера открытого типа на основе данных натурных исследований.

Научная новизна и основные результаты работы. Впервые выполнено инструментальное исследование теплофизических характеристик вулканического геотермального озера открытого типа, включающее в себя измерения температуры в озере, распределения температуры и влажности в приводном слое атмосферы, скорости ветра, расхода и температуры воды в вытекающем из озера ручье, уровня воды в озере, расхода газа через его поверхность, и фоторегистрацию сульфидной пленки на поверхности озера. Рассчитаны составляющие теплового баланса на поверхности раздела вода - воздух, число Стентона и число Дальтона для условий геотермального озера. Оценена мощность наиболее интенсивного донного геотермального источника в озере. Модифицирована теория эквивалентной турбулентной конвективной струи (э.т.к.с.), что позволило учесть суммарное влияние всех донных геотермальных источников на формирование температурного поля в озере. Показано, что источник плавучести э.т.к.с. является протяженным и мощность его распределена по биномиальному закону. Определены параметры этого распределения. С привлечением фрактального анализа распределения пузырей на поверхности озера оценено изменение значения мощности источника плавучести э.т.к.с. в суточном цикле и показано, что оно не превышает 30%. Предложен метод качественной оценки поля линий тока в озере по температурному разрезу. Выявлена картина конвективных ячеек в озере и предложена модель её формирования. Сведен водный баланс озера, с учетом которого рассчитан тепловой баланс средней части его глубин. Показано, что через водную поверхность озера открытого типа теряется лишь ~ 10% от полного количества тепла, циркулирующего через него в результате взаимодействия с гидротермальной системой кальдеры Узон.

Научная и практическая значимость. Начаты работы по комплексному изучению процессов взаимодействия в системе трех обо-

лочек Земли – литосфера–гидросфера–атмосфера. Работа представляет собой первую попытку создания физической модели озера открытого типа с геотермальными источниками на дне. Значимость работы определяется также тем, что области "активного дна" являются как бы окнами, через которые можно заглянуть в недра Земли. Эти области в значительной степени определяют тепло- и массообмен между литосферой и гидросферой. Значительный интерес представляют количественные оценки, полученные в данной работе: мощность донных геотермальных источников и колебания её в суточном цикле; вертикальные конвективные скорости в озере; соотношение между потоком тепла, теряемым озером через открытую водную поверхность, и потоком тепла, циркулирующим через него в результате взаимодействия с гидротермальной системой кальдеры. Результаты, полученные в диссертации, могут быть использованы при построении общей теории взаимодействия в системе литосфера–гидросфера–атмосфера.

Апробация работы. Результаты работы докладывались на международной конференции "Геофизика и современный мир" (Москва, 1993), 4-ой конференции "Динамика и термика рек, водохранилищ, внутренних и окраинных морей" (Москва, 1994), международной конференции "Динамика океана и атмосферы" (Москва, 1995), а также на семинарах кафедры физики моря и вод суши физического факультета МГУ, на семинаре Лаборатории возобновляемых источников энергии географического факультета МГУ.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 3 печатных работ.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, выводов и списка литературы, содержащего 106 наименований. Работа содержит 128 страниц печатного текста, 30 рисунков, 4 таблицы.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность темы диссертации, формулируются основные цели исследования и излагается структура работы.

Первая глава посвящена обзору литературы. Объект исследования – геотермальное озеро Банное, как открытая термодинамическая система, сравнивается с подобными ему природными объектами (геотермальные активные области на дне Мирового океана).

Температурное поле озера имеет неустойчивую стратификацию по температуре и сформировано под действием нескольких конвективных струй. Поэтому обзор литературы содержит работы, посвященные описанию полей, порождаемых конвективной турбулентной струей, и коэффициентов обмена в активной области струи и вне её. Обзор содержит также работы о взаимодействии нескольких конвективных струй. Обычные геотермальные озера, в которых обмен массой с окружающей средой происходит только через свободную поверхность раздела, отличаются по некоторым важным показателям тепло-массообмена от озер открытого типа (в которых обмен массой происходит с общей геотермальной системой, а на испарение со свободной поверхности уходит менее 1% от потока массы через озеро и геотермальную систему).

Во второй главе даны основные характеристики тепло-массообмена исследуемого объекта, количество и характер экспериментальных данных, полученных автором в период экспедиционных работ (июль-август 1992 года) на Камчатском полуострове. Описана аппаратура и методика измерений при получении данных. Объект исследования - геотермальное озеро Банное - находится на границе первого термального поля Узон-Гейзерной долины в 20 километрах от побережья Тихого океана. Озеро представляет мини кратер потухшего вулкана, заполненный водой, на дне которого существует двухметровый слой расплавленной серы. Сгустки расплавленной серы выбрасываются в водные массы, и в результате фазовых переходов серы (расплав - кристаллическая сера) возникает большой поток тепла от дна озера к его поверхности ($2,9 \pm 0,3$ МВт). Это значение потока тепла более чем в 300 раз превышает значение потока, обусловленного молекулярной теплопроводностью. Объем воды в озере составляет $32,2 \cdot 10^3$ м³, глубина озера - 24 м, свободная поверхность имеет вид эллипса с отношением полуосей 0,8 и размером большой полуоси 20 м. Банное имеет ручей с активным ложем, как активно и дно озера, и температурой воды около 40 °С. Расход воды в ручье, вытекающем из озера, в период работ постепенно уменьшался от 30 л/с до 15 л/с. Уровень воды в озере заметно не изменялся.

На глубине 14 м неоднократно фиксировался холодный ручей с

температурой воды $11,2^{\circ}\text{C}$, компенсирующий расход воды в озере. Псток воды через озеро Банное возобновляет в нем воду за 6 суток. Это позволяет при описании состояний озера по отношению ко всей геотермальной системе, в которой оно является составным элементом, а также активной области турбулентной конвективной струи, в которую вносит холодные массы жидкости ручей, по отношению к остальным массам вод в озере, вне активной области применять принцип Пригожина и считать указанные выше термодинамические системы открытыми.

Во время экспедиционных работ было получено более 60 профилей температуры в тонком \pm односантиметровом слое от поверхности раздела вода-воздух. Рабочая часть градиентного датчика измеряла среднюю температуру с шагом измерений в $1,6$ мм и чувствительностью $0,02^{\circ}\text{C}/\text{деление}$ гальванометра. Также было получено более 60 профилей температуры и влажности в двухметровом приводном слое воздуха стандартной метеорологической аппаратурой, измерялась скорость ветра на высоте 2 м. от поверхности раздела.

Измерено около 20 разрезов температурного поля озера Банное в течение месяца за указанный выше период работ. Измерительная аппаратура с чувствительностью $0,05^{\circ}\text{C}/\text{деление}$ гальванометра соединялась кабелем с платиновым датчиком, который опускался в воду с лодки. Ошибка фиксации узлов измерительной сетки с шагом в 3 м по горизонтали и вертикали была ± 10 см. Во время работ измерялся расход газа в активной области конвективных струй, выходящих на поверхность, $0,5$ л/с и $0,7$ л/с, а также скорость воды в активной области струи (около 20 см/с). Получена фоторегистрация системы слоистых облаков над термальным полем и над всей кальдерой Узси в целом, которые образуются в ночное и утреннее время, препятствуя эффективному излучению в атмосферу, в утреннее и ночное время суток поверхность озера покрывается сульфидной пленкой, препятствующей испарению, получено около 100 снимков распределения пузырей на поверхности озера.

В третьей главе представлен графически экспериментальный материал - зависимости $t_a(z)$, $l(z)$, $p(z)$ в двухметровом привод-

ном слое воздуха. Данные зависимости имеют несколько инверсионных областей у поверхности воды. По профилям температуры в плюс-минус односантиметровом слое от поверхности раздела в предположении насыщенности водяного пара в данной области по диффузионным формулам рассчитаны составляющие теплового баланса, приведено 8 примеров такого расчета для профилей температуры, полученных в различное время суток: $\bar{Q}_a = 80 \text{ Вт/м}^2$, $\bar{Q}_e = 400 \text{ Вт/м}^2$, $\bar{Q}_w = 670 \text{ Вт/м}^2$, где \bar{Q}_a - молекулярный поток тепла в воздухе, \bar{Q}_e - скрытый поток тепла, \bar{Q}_w - молекулярный поток тепла в воде. Рассчитан поток тепла $\bar{Q}_r = 200 \text{ Вт/м}^2$. С точностью расчета в 5% по ошибкам экспериментальных данных тепловой баланс на поверхности озера сходится: $\bar{Q}_a + \bar{Q}_e + \bar{Q}_r = \bar{Q}_w$.

Значение числа Боуэна $Bo = 0,2$ показывает, что влажность оказывает существенное влияние на плотностную неустойчивость воздушных масс и её следует учитывать при расчете поля плотности.

Графический анализ профилей температуры в ± 1 см слое от поверхности раздела показал, что существует классификация профилей, которая является особенностью теплового режима геотермального озера. Оказалось, что за период измерений существуют четыре устойчивых равновесных профиля температуры, каждый из которых определяет свой класс. Более половины всех профилей попадают в малую окрестность этих 4 равновесных профилей. При этом принадлежность профиля одному из указанных выше классов не зависит от времени суток, когда был измерен профиль, не зависит от температуры воздуха на высоте 2 м, почти не зависит от скорости ветра (при $V < 4 \text{ м/с}$). Классификация осуществляется по температуре поверхности воды. Оказалось, что равновесные профили определяют устойчивые состояния озера со средней температурой водных масс, расположенных в узких диапазонах значений температуры, разделенных между собой большими интервалами. Данная классификация профилей показывает, что тепловой режим и тепло-массообмен геотермального озера открытого типа формирует прежде всего его обратная связь потоком массы с геотермальной системой. Состояние ат-

мосферы и обмен массой и теплом озера с воздушными массами играет лишь роль возмущения, в результате которого озеро может перейти из одного устойчивого состояния в другое.

Естественным образом введена классификация температурного поля на области: две изотермы поля принадлежат одной и той же области тогда и только тогда, если они близки на границе области, остаются близки по норме внутри неё. Обратное, существуют две изотермы, принадлежащие разным областям и близкие сколь угодно на границе температурного поля, расходятся внутри него. Оказалось, что через каждую из таких областей переносится тепловой поток со свойственным для данной области значением.

Предложен метод эквивалентной конвективной турбулентной струи для описания развитой турбулентной области температурного поля, порожденной взаимодействием нескольких конвективных струй, и расчета мощности источника плавучести эквивалентной струи. Средняя часть температурного поля геотермального озера может формироваться под воздействием 7 конвективных струй, и как показывает оценка, активные области струй начинают перекрываться. Расчет мощности источника плавучести методом эквивалентной т.к.с. учитывает суммарную мощность всех струй. Этот метод обобщает расчет мощности плавучести одной струи по температурному полю с однородным фоном на случай взаимодействия струй и сложной стратификации фона по температуре. Данный метод позволил свести тепловой баланс в средней части озера: средняя часть температурного поля формируется несколькими струями со значением суммарной мощности $2,9 \pm 0,3$ МВт (температура фона имеет градиент 3–4 град/м). Обычный метод позволяет рассчитать мощность плавучести для центральной струи только в нижней трети озера $Q = 0,8$ МВт (температура фона имеет значение градиента 0,4 град/м). Через верхнюю треть поля переносится поток тепла со значением $0,12 \pm 0,01$ МВт (со значением 0,1 град/м для температуры фона). Поток воды через озеро Банное имеет значение 25 л/с для температурного разреза температурного поля. Ручей, приносящий холодные воды в озеро с температурой воды $11,2$ °С, тонкой холодной

пленкой расплывается по дну, втягивается в систему конвективных струй. Ручей, покидающий озеро, имеет температуру водных масс 40°C . Поток массы через озеро уносит каждую секунду $3 \pm 0,1$ МДж избытка внутренней энергии, т.е. тепловой баланс внутри озера сходится с точностью до расчетной ошибки. К свободной поверхности геотермального озера Банное подводится не более 10 % значения потока тепла, вырабатываемого геотермальным источником тепла на дне. Это также подчеркивает, что озера подобного типа нужно рассматривать как открытые термодинамические системы. Втягиваемые холодные массы воды в активную область конвективной струи объясняют особенность её температурного поля - локальный максимум градиента температуры в активной области на высоте $\bar{z} = 12,5$ м от дна. Как следствие, данная особенность повторяется температурой фона на высоте $\bar{z} = 16$ м от дна, где активные области перекрываются и интенсивно взаимодействуют с окружающей средой.

В главе 3 рассмотрена также задача построения картины линий тока по разрезу температурного поля. Исходная задача:

$$\begin{cases} \vec{\nabla} \nabla T = \nabla(\epsilon_T \nabla T), & \vec{V} = (u, v, w), & T = T(x, y, z) \\ \operatorname{div} \vec{V} = 0, & T(x, 0, z) \\ \vec{V}_{n_0} = 0, & \vec{V}_0 = 0, & \vec{V}_{ax_0} = (0, 0, w) \end{cases} \quad (I)$$

с использованием шага численной сетки $d : R \gg d_2 \gg d \gg d_1$, где: R - вертикальный масштаб конвективной ячейки, d_2 - характерный размер деформации температурного поля, d_1 - размер активной области струи. При $d > d_1$ исключаются турбулентные области конвективных струй и рассматривается потенциальное движение жидкости. При $d \leq d_2$ выполняется условие локальной осевой симметрии температурного поля и поля скоростей. При $d \leq R$ коэффициент теплопроводности не зависит от высоты и приравнивается среднему его значению на масштабе конвективной ячейки. С учетом $\vec{\nabla} \nabla T = w dT/dz$ была решена численно задача:

II

$$\left\{ \begin{array}{l} \overset{*}{W} \frac{dT}{dz} = \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + 2 \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \right), \quad T(x, 0, z) \\ \frac{\partial \overset{*}{W}}{\partial x} + 2 \frac{\partial \overset{*}{u}}{\partial x} = 0, \quad \vec{V} = \vec{V}/\epsilon_{Te} = 1/\epsilon_{Te} (u, 0, W) \\ \overset{*}{V}_{ns} = 0, \quad \overset{*}{V}_G = 0, \quad U_{axe} = 0, \quad tg \alpha = \overset{*}{W}/\overset{*}{u} \end{array} \right. \quad (2)$$

Для построения картины поля линий тока с использованием системы уравнений (2) использовалась явная численная схема, ошибка в определении величины $tg \alpha = \overset{*}{W}/\overset{*}{u}$ составила 6 - 15%.

Чтобы проверить, насколько точно система уравнений (2) дает поле линий тока с учетом ошибки эксперимента разреза температурного поля был составлен качественный метод построения конвективных ячеек на основе теоремы о топологических свойствах векторного поля. Непрерывное касательное векторное поле, заданное на двумерной односвязной гладкой области, касательное к границе области и отличное от нуля на границе, имеет внутри данной области по крайней мере одну особую точку. Этот метод использует значение ΔT по всему температурному полю (множеству $D : \Delta T(D) = 0$ принадлежат центры конвективных ячеек, если конвективные ячейки существуют). Касательное поле изотерм к замкнутому контуру множества D определяет вертикальный размер конвективной ячейки либо пары конвективных ячеек, если она порождена конвективной струей). Получено хорошее согласие решения системы уравнений (2) и поля линий тока, построенного на основании топологической теоремы о векторном поле скоростей. Данный метод дает ошибку при построении в 3-5 %, что существенно ниже значения ошибки, упоминаемой ранее. Существенно лишь то, что нужно использовать разрез температурного поля, содержащего несколько конвективных струй (чтобы имело место условие о локальной осевой симметрии температурного поля).

Оказалось, что существует замкнутый контур множества D - "клапан", который отделяет нижнюю треть озера от остальной части и порождает две пары конвективных ячеек, которые в свою очередь отсасывают в активную область холодную жидкость. Поскольку анализ большей части разрезов температурного поля показал, что Q_0 мощность источника плавучести эквивалентной струи прямо пропорциональна значению потока масс воды через

озеро, то "клапан" обеспечивает отрицательную обратную связь между значением мощности геотермальных источников на дне озера и значением потока воды через всю геотермальную систему. Определение значения мощности и полей температуры и скорости, при которых указанная выше отрицательная обратная связь сменяется положительной, а озеро начинает закипать со свободной поверхности, возможно лишь при решении вариационной задачи минимизации скорости роста энтропии в активной области эквивалентной струи как открытой термодинамической системе.

В четвертой главе даны краткие сведения о фрактальных и мультифрактальных множествах, а также функциях, определяемых на них. С помощью метода эквивалентной т.к.с. и анализа распределения пузырей (зависимости числа пузырей от их радиуса) показано, что мера биномиального распределения с $P = 0,7$ на характерном масштабе плавучести (нижняя треть озера) как геометрическом носителе с точностью до ошибки экспериментальных данных правильно описывает пространственное распределение источника плавучести эквивалентной струи. Биномиальное распределение имеет самоподобный график, недифференцируемый ни в одной точке:

$$M(x) = \begin{cases} P M(2x) & , \quad 0 \leq x \leq 1/2 \\ P + (1-P) M(2x-1) & , \quad 1/2 \leq x \leq 1 \end{cases} \quad (3)$$

Было сделано простое предположение: объем пузыря на поверхности озера пропорционален объемной плотности источника плавучести в точке образования пузыря в нижней трети озера, а число пузырей одинакового радиуса (на гистограмме $N_i(R_i)$) пропорционально геометрической мере фрактального подмножества мультифрактала, все элементы которого имеют одну и ту же объемную плотность мощности источника плавучести:

$$R_i^3 \sim V_i \sim P^K (1-P)^{n-K}, \quad N_i(V_i) \sim C_n^K \quad (4)$$

Чтобы отличить меру, заданную на мультифрактальном множестве, и обычную меру на $[0, 1]$ (например, $M(x) = x^2$), была предложена параметризация:

$$\begin{cases} Y_{\bar{e}} = \frac{\sum_{i=0}^{\bar{e}} N_i V_i / \sum_{i=0}^{\bar{n}} N_i V_i}{X_{\bar{e}} = \frac{\sum_{i=0}^{\bar{e}} N_i / \sum_{i=0}^{\bar{n}} N_i} \end{cases} \quad 0 \leq \bar{e} \leq \bar{n} \quad (5)$$

$$\begin{cases} Y_e = \sum_{k=0}^e C_n^k p^k (1-p)^{n-k} \\ X_e = \sum_{k=0}^e C_n^k / 2^n \end{cases} \quad 0 \leq e \leq n \quad (6)$$

Параметризованная экспериментальная зависимость $Y_e(X_e)$ хорошо укладывается между кривыми $Y_e(X_e)$ для биномиального распределения $M(x)$ для $n = 6-7$. Диффузионная разрешимость (наименьший масштаб длиной $\delta_n = 2^{-n}$, которым делится характерный масштаб плавучести $\overset{\text{на}}{\text{число}}$ отрезков $N = 2^n$ равной длины) определяется турбулентными свойствами струи и зависит от Q_0 . Получена формула для определения мощности источника плавучести эквивалентной струи:

$$Q_0 = A S_a L_{xap} / \tau \exp(0,0823n), S_a = 30 \text{ м}^2 \quad (7)$$

где: $A = p \mu d / RT = 4,3 \cdot 10^6$ Дж/м³ - энергия, необходимая для образования 1 м³ насыщенного водяного пара при давлении 3 атм и температуре 343 К, L_{xap} - характерный масштаб плавучести ($L_{xap} = 7$ м), τ - время образования пузырей.

Для различных распределений пузырей на поверхности озера было определено $n = 5-7$ в период с 9 до 11 часов утра. Согласно формуле (7) при постоянных A , S_a , L_{xap} , τ было определено значение суточных колебаний величины Q_0 (30%). Такое значение суточных колебаний Q_0 хорошо согласуется со значением относительного изменения потока тепла Q_w , рассчитанного по диффузионным формулам у поверхности озера (30%).

Интегрируя двумерное уравнение теплопроводности по z с учетом объемной плотности источника плавучести $M(x)$ в нижней трети озера, было получено выражение для скорости в активной области:

$$W = \frac{Q_0}{c_p \rho} \left\{ \frac{2BA}{x^2 S_a (T_0 + A/2)^2} + \frac{S_a}{S_0 (T_0 + A/2)} \right\} \cdot \begin{cases} M(x), & 0 \leq x \leq 1 \\ 1, & x > 1 \end{cases} \quad (8)$$

$B = 70, \quad x = z / L_{xap}$

где: S_a - активная площадь эквивалентной струи, c_p и ρ - физические константы для воды, T_0 и $T_0 + A$ - экспериментальные зависимости температуры фона и температуры на оси струи. Формула (8) дает значение скорости с локальным максимумом в

30 см/с в нижней трети озера, протяженный минимум с 2 см/с в средней трети озера и 18 см/с на поверхности озера (измеренное значение составило 20 см/с).

В заключении коротко изложены полученные результаты:

1. Впервые выполнено инструментальное исследование теплофизических характеристик геотермального озера открытого типа, включающее в себя измерения поля температуры в озере, профили температуры и влажности в приводном слое воздуха, скорости ветра, расхода и температуры воды в вытекающем из озера ручье, уровня воды в озере, расхода газа и скорости воды в активной области струй, фоторегистрацию сульфидной пленки на поверхности озера.

2. Рассчитаны составляющие теплового баланса на поверхности раздела вода-воздух, число Стентона и число Дальтона для условий геотермального озера.

3. Обнаружена классификация профилей температуры в ± 1 см слое от поверхности раздела по температуре поверхности и показано, что на формирование теплового режима и тепло-массообмена геотермального озера открытого типа, в первую очередь оказывает влияние циркуляция водных масс через всю геотермальную систему, в которой такое озеро является составным элементом.

4. Предложен метод эквивалентной т.к.с., учитывающий взаимодействие нескольких конвективных струй и стратификацию фона по температуре. Значение мощности источника плавучести эквивалентной струи равно $2,9 \pm 0,3$ МВт для озера Банное. Более 90 % всей мощности идет на нагрев водных масс, циркулирующих через озеро, не более 10 % поступает к свободной поверхности.

5. Рассмотрена задача построения качественной картины поля линий тока по разрезу температурного поля с использованием условия локальной осевой симметрии температурного поля. Предложен метод построения конвективных ячеек с использованием симметрии температурного поля и топологических свойств векторного поля скоростей. Полученная система конвективных ячеек позволила объяснить отрицательную обратную связь между значениями мощности источника плавучести и потока водных масс че-

рез озеро.

6. С использованием фрактального анализа распределения пузырей на поверхности озера и анализа температурного поля методом эквивалентной т.к.с. показано, что пространственное распределение источника плавучести описывается мерой биномиально-го распределения с $P = 0,7$ на характерном масштабе плавучести в качестве геометрического носителя. Получена формула с использованием свойств мультифрактальной меры для расчета Q_0 , показано, что значение мощности источника плавучести испытывает суточные колебания с размахом 30 %.

7. Получены значения вертикальной компоненты скорости, жидкости в активной области конвективной струи. Уменьшение значения скорости до 2 см/с в средней части озера подтверждает предположение о вовлечении холодной жидкости из ручья в активную область струи.

По теме диссертации опубликовано 8 печатных работ:

1. Пастухов Д.Ф. Классификация профилей температуры в плюс-минус односантиметровом слое от поверхности раздела геотермального озера. Вестн. Моск.ун-та, Физ., Астрон. 1995, 36, №6, С.84-89.

2. Пастухов Д.Ф. Метод эквивалентной струи для описания развитой турбулентной области температурного поля, порожденной взаимодействием нескольких конвективных струй. Деп.ВИНИТИ №934-В94. М., 1994, 12с.

3. Пастухов Д.Ф. Простая мультифрактальная модель источника плавучести эквивалентной турбулентной конвективной струи и вариационная задача минимизации скорости роста энтропии в струе. Деп. ВИНИТИ № 2887-В94. М., 1994, 1, с.

4. Анисимова Е.П., Пастухов Д.Ф. Расчет поля линий тока в вулканическом озере с геотермальными источниками на дне. Вулканология и сейсмология, 1995.

5. Анисимова Е.П., Пастухов Д.Ф., Сперанская А.А., Фазлуллин С.М. Особенности термогидродинамического режима вулканического озера. Вулканология и сейсмология, 1992, №3, С.71-75.

6. Анисимова Е.П., Пастухов Д.Ф., Сперанская А.А. Температурный режим геотермального озера. Тез.докл. 4-я конф. "Ди-

намика и термика рек, водохранилищ, внутренних и окраинных морей". М., 1994, т.2, с.14-16.

7. Анисимова Е.П., Пастухов Д.Ф., Сперанская А.А., Сперанская О.А. О роли азрации в формировании термического режима геотермального озера. Изв. РАН, ФАО, 1996, т.32, №2.

8. Анисимова Е.П., Пастухов Д.Ф., Сперанская А.А., Фазлуллин С.М. Особенности термического режима геотермальных озер. Межд. конф. "Геофизика и современный мир". Тез. докл. М., 1993, В4, р.24.