

Поэтому можно предположить, что в структуре C14 среди 48 тетраэдрических позиций с окружением 2R, 2M ровно половина имеет окружение типа 2R, M(1), M(2), т.е. эти позиции характеризуются наличием в их окружении максимального количества атомов железа в положениях типа 2(a)—M(1). Примем во внимание, что в присутствии железа водород эти позиции занимает менее охотно, нежели позиции 2R, 2M(2), где железо отсутствует. Отсюда можно сделать вывод о том, что меньшее поглощение водорода фазой C14 в системе $Du(Mn_{0.95}Fe_{0.05})_2$ обусловлено упорядоченным размещением атомов железа в положениях 2(a), приводящим к образованию в сплаве локальных областей с повышенной концентрацией железа.

Работа выполнена в рамках Договора о межвузовском сотрудничестве между Московским Государственным университетом им. М. В. Ломоносова и Тринити Колледжем (г. Дублин, Ирландия).

Авторы выражают благодарность профессору физического факультета Тринити Колледжа М. Кою за предоставленную возможность проведения работ на установке ТРА.

ЛИТЕРАТУРА

1. Висволл Р. Хранение водорода в металлах//Водород в металлах. М., 1981. Т. 2. С. 240—289.
2. Физика и химия редкоземельных элементов: Справочник. М., 1982.
3. Авдеева И. А., Засимов В. С., Илюшин А. С. и др.//Тез. докл. Российской научн.-техн. конф. «Применение мёсбауэровской спектроскопии в материаловедении». Ижевск, 1993. С. 19.
4. Ilyushin A. S., Wallace W. E.//J. Solid State Chemistry. 1976. 17. P. 131.
5. Khvostantsev L. G., Vereshagin L. E., Novikov A. P.//High Temp. — High Pressure. 1977. 9, N 6. P. 637.
6. Ryan D. The magnetic properties of iron-based binary amorphous alloys hydrogen effects: Ph. D. Thesis Trinity College. Dublin, 1986.
7. Didisheim J. J., Yvon K., Shaltiel D., Fisher P.//Solid State Commun. 1979. 31. P. 47.
8. Shoemaker D. P., Shoemaker C. B.//J. Less-Common Met. 1979. 68. P. 43.
9. Burzo E., Chelkowski A., Kirchmayer H. R. Compounds Between Rare Earth Elements and 3d, 4d or 5d Elements: Landolt-Börnstein. Numerical Data and Functional Relationships in Science and Technology. V. 19.

Поступила в редакцию
03.03.95

ВЕСТН. МОСК. УН-ТА. СЕР. 3, ФИЗИКА. АСТРОНОМИЯ. 1995. Т. 36, № 6

ГЕОФИЗИКА

УДК 551.481.1

КЛАССИФИКАЦИЯ ПРОФИЛЕЙ ТЕМПЕРАТУРЫ В ПЛЮС-МИНУС ОДНОСАНТИМЕТРОВОМ СЛОЕ ОТ ПОВЕРХНОСТИ РАЗДЕЛА ГЕОТЕРМАЛЬНОГО ОЗЕРА

Д. Ф. Пастухов

(кафедра физики моря и вод суши)

Измерены профили температуры в плюс-минус односантиметровом слое от поверхности раздела геотермального озера. Обнаружено, что около половины всех профилей классифицируются по температуре поверхности воды. Определено число независимых параметров, характеризующих временной ряд температуры такого слоя и тепловое состояние озера. Предположено, что особенности внутренней энергии озе-

ра могут быть описаны элементарной функцией катастроф с одной переменной состояния и четырьмя независимыми управляющими параметрами.

Тепло- и массообмен геотермальных «озер», например озера Банного, расположенного на границе первого участка термального поля Узон-Гейзерной кальдеры Камчатки, невозможно рассматривать без учета сильной обратной связи с другими элементами термальных полей, окружающей средой и общей гидротермальной системой. Озеро Банное — миникратер потухшего вулкана с диаметром чаши около 40 м, на дне которого находится расплавленная сера, порождающая несколько конвективных струй, выходящих на поверхность озера. Озеро имеет активный «ручей» с расходом воды около 20 л/с и температурой воды 40 °С. «Ручей» является элементом системы термальных полей, так как его ложе изобилует фонтанчиками, выбрасывающими пар, окрашенную солями воду, грязь. Расход воды в озере пополняется за счет грунтовых вод окружающей термальные поля среды (по химическому составу близких к нейтральным [1]); формирование профилей влажности и температуры в приводном слое воздуха определяется тепловым состоянием озера в большей мере, чем состоянием атмосферы. В силу обратной связи тепловое состояние озера зависит от мощности геотермальных источников тепла на дне, расхода и прихода воды в озеро. Даже частотные спектры продольной составляющей скорости ветра над озером и температуру его поверхности нельзя считать взаимосвязанными (частотный спектр скорости ветра формирует также вся геотермальная система в целом). Необходимо принимать во внимание механизмы, защищающие от потерь тепла в атмосферу, т. е. принять некоторую независимость процессов тепло- и массообмена в озере от состояния атмосферы.

За август 1992 г. в различное время суток на озере Банном автором было получено около 60 профилей температуры в ± 1 см слое у границы раздела вода—воздух. Рабочая часть градиентного датчика с термодарами с точностью 0,03 °С усредняла температуру на масштабе 1 мм с шагом измерения в 1 мм.

В настоящей статье выявляется, какова доля влияния атмосферных условий и геотермальных источников на дне озера на его тепловой режим.

Все профили построены в одной системе координат. Для классификации профилей использовался следующий метод сравнения двух кривых: двум выбранным профилям сопоставлялось число 0, если при совмещении их координатных осей и начал координат профили не пересекали друг друга, в противном случае — число 1. Каждому профилю ставились в соответствие все профили, которых он не пересекает. Оказалось, что существуют кривые, имеющие больше половины одинаковых нулей (кривых).

Профили разделялись по классам: каждый профиль данного класса имеет более половины нулей, принадлежащих ему и нулям всего класса (нули класса есть объединение всех нулей, принадлежащих профилям данного класса). При построении кривых данного класса в одной системе координат оказалось, что они близки по норме друг к другу; как правило, две выделенные кривые одного класса пересекают друг друга несколько раз, а все семейство в целом напоминает спутанные нити.

Каждый профиль температуры (в ± 1 см слое у границы раздела) имеет линейные, примыкающие к границе раздела, части, по которым определяются диффузионные потоки тепла, и нелинейные, обусловленные не только молекулярными процессами теплопередачи. В силу не-

линейности профиля предполагалось, что профиль определяет температура воздуха на высоте двух метров, скорость ветра на той же высоте, температура воды вблизи поверхности раздела вода—воздух (эти характеристики являются стандартными в метеорологии, и измерения их проводились одновременно с измерением профиля температуры в ± 1 см слое).

Оказалось, что классификация профилей слабо зависит от суточных колебаний этих характеристик (все четыре класса содержат профили, полученные в различное время суток), от температуры воздуха и скорости ветра на высоте 2 м (пределы изменения для всех классов сильно перекрываются).

Классификация характеризуется температурой поверхности воды

T_{sur} :

- 1) $T_{sur} = (41,2 - 42,6)^\circ \text{C}$, $v_{wind} < 4$ м/с,
- 2) $T_{sur} = (38,8 - 41,6)^\circ \text{C}$, $v_{wind} = 1 - 8$ м/с,
- 3) $T_{sur} = (39,4 - 40,9)^\circ \text{C}$, $v_{wind} < 1,5$ м/с,
- 4) $T_{sur} = (42,3 - 43,6)^\circ \text{C}$, $v_{wind} < 2,5$ м/с.

(Отличие класса 2 от 3 заключается в большей скорости ветра.)

Классификация профилей существенным образом определяется тепловым состоянием озера (средней температурой воды в озере), эти состояния формируют четыре равновесных профиля температуры в ± 1 см слое. Принадлежность профиля к данному классу означает его близость по норме к равновесному профилю этого класса. Около половины профилей, не вошедших в 4 указанных выше класса, можно отнести к сильно неравновесным, через которые ± 1 см слой переходит от одного класса к другому под действием ветра, суточных колебаний температуры воздуха и т. д.

Было получено также около 20 разрезов поля температуры озера Банного в различных плоскостях (по два разреза в одной плоскости с промежутком времени около двух недель). Вычислялась величина $\delta = 2 |(T_i - T_j)| / (T_i + T_j)$, где T_i и T_j — средние температуры одного и того же разреза в различное время. Значения δ можно объединить в 6 отдельных групп (все значения приведены в процентах): 1,1; (1,8; 2,2; 2,5); 4; (5,3; 5,4; 5,6); (7,5; 9,9; 12,3); 18,9. Из четырех различных числовых величин можно составить 6 различных сочетаний. Небольшое изменение этих величин дает 6 узких областей δ . Следовательно, внутренняя энергия озера имеет четыре локальных минимума, что соответствует четырем группам классификации профилей ± 1 см слоя. Если классифицировать профили только по T_{sur} , то классы 2 и 3 неразличимы, разделение по группам также может быть иным, тогда имеем три локальных минимума внутренней энергии. Величина δ сравнивалась с $\delta' = 2 |T_n - T_m| / (T_n + T_m)$, где T_n и T_m — значения температуры поверхности воды из различных классов, $\delta' = 0 - 12$ (в процентах). Перекрывание значений δ и δ' подтверждает предположение о том, что классификация профилей определяется средней температурой озера в узких областях значений δ .

Модальность физической системы, т. е. наличие более одного локального минимума у потенциальной функции этой системы в некоторой области изменения управляющих параметров — один из «флагов» катастроф по терминологии Гилмора [2]. При некоторых значениях управляющих параметров, параметризующих потенциальную функцию, небольшое их изменение может привести к катастрофическому скачку

положения равновесия системы. В качестве физических параметров, управляющих поведением озера, можно взять: а) мощность геотермальных источников на дне, переносимую восходящими конвективными струями вверх; б) мощность теплопотерь в атмосферу со свободной поверхности, переносимую нисходящими струями и определяемую погодными условиями; в) расход и г) приход воды в озеро; д) выброс сульфидной пленки на поверхность озера, препятствующий испарению. Независимыми параметрами являются только четыре: первый, второй и пятый из перечисленных, а также атмосферное давление. (Мощность геотермальных источников рассчитывалась по температурным разрезам: она пропорциональна расходу воды, измерявшемуся экспериментально; уровень воды в озере значительно не изменялся → расход пропорционален приходу.)

Предположим, что озеро является физической системой общего положения, его внутренняя энергия имеет три локальных минимума и ограничена снизу. Тогда, выбирая одну переменную состояния и имея четыре независимых физических параметра, функцию катастроф системы можно описать простой катастрофой типа A_{+5} . В окрестности ростка катастрофы (его параметризует начало координат пространства управляющих параметров) A_{+5} имеет вид

$$F(x, a_1, a_2, a_3, a_4) = \frac{1}{6} x^6 + \frac{1}{4} a_1 x^4 + \frac{1}{3} a_2 x^3 + \frac{1}{2} a_3 x^2 + a_4 x,$$

где x — переменная состояния, в качестве которой можно выбрать величину $(T - T^*)/T^*$. Здесь T^* — некоторое значение средней температуры озера, при которой возможна максимальная кратность вырождения критических точек (равная пяти) и все четыре управляющих параметра (a_1, a_2, a_3, a_4) равны нулю. Четыре управляющих параметра a_1, a_2, a_3, a_4 являются функциями четырех указанных выше независимых физических параметров, следовательно, переход от физических параметров к переменным пространства управляющих параметров вполне корректен, а управляющие параметры независимы друг от друга. Поэтому в системе возможна катастрофа с пятикратным вырождением критических точек при $T = T^*$ (обращении в нуль всех управляющих параметров). Потенциальная функция нормируется, например, на значение внутренней энергии при $T = T^*$, а пространство управляющих параметров a_1, a_2, a_3, a_4 безразмерно.

Организация катастрофы A_{+5} следующая. Нульмерная компонента сепаратрисы состоит из одной точки, параметризующей росток катастрофы. Из начала координат пространства управляющих параметров выходят четыре одномерные компоненты: две из них параметризуют потенциальную функцию с 4-кратным вырождением критической точки; две другие имеют для соответствующей потенциальной функции в одной и той же точке переменной состояния сборку и складку. Имеется шесть двумерных и четыре трехмерных компоненты. Для двумерных существует сборка либо двойная складка в одной точке переменной состояния, либо две складки в двух различных точках (по одной в каждой) переменной состояния; для трехмерных компонент сепаратрисы имеется одна складка в некоторой точке переменной состояния.

На термодинамический потенциал (внутреннюю энергию озера) системы с тривиальной симметрией, т. е. системы общего положения (вода) накладывается условие глобальной минимальности, обеспечи-

вающее устойчивое состояние термодинамической системы в целом. Функция катастрофы A_{+5} имеет глобальный минимум в некоторой точке переменной состояния [3].

Применимость теории катастроф к описанию термодинамического потенциала (его внутренней энергии) такого объекта, как геотермальное озеро, можно объяснить следующим образом. Озеро обладает большой тепловой инерцией: при неизменном количестве воды в озере для подъема средней температуры на 1° требуется более суток (1° по порядку величины соответствует интервалу температур между группами профилей температуры при описанной выше классификации). Экспериментально наблюдалась смена класса профилей менее чем за 2 ч (чаще, чем через 2 ч, профили не измерялись). Как показано в работе, каждому классу профилей температуры соответствует определенное состояние озера (средняя температура воды и структура температурного поля).

Для термодинамического потенциала в теории катастроф принимается принцип Максвелла. В момент катастрофы начальное и конечное устойчивые состояния озера имеют почти равные значения термодинамического потенциала. Глобальный минимум потенциала переходит из начального в конечное состояние, время перехода значительно меньше времени тепловой реакции озера (необходимого для того, чтобы его средняя температура изменилась на 1°C за счет действия геотермальных источников тепла на дне при условии равенства потоков воды, поступающих в озеро и выходящих из него, что составляет около суток). Большие производные по времени потенциала физически не оправданны и применимость теории катастроф в этом случае очевидна. При изменении массы воды в озере и изменении управляющих параметров возможна вышеописанная катастрофа при неизменной внутренней энергии (начальное и конечное состояния различаются средней температурой воды, массой воды в озере, структурой температурного поля). Описание структуры температурного поля геотермального озера содержится в работе [5].

Число независимых физических величин, характеризующих среднюю температуру озера, а следовательно, его внутреннюю энергию, можно найти по оценке корреляционного показателя ν для временного ряда температуры поверхности озера $T_{\text{sur}}(t_i)$. По значениям температуры поверхности $T_{\text{sur}}(t_i)$, $t_{i+1} - t_i = \Delta t$ строится набор векторов в l -мерном фазовом пространстве (4):

$$\xi_k = (\xi_{k1}, \xi_{k+1}, \dots, \xi_{k+l-1}) T_{\text{sur}}(t_k) = \xi_k; \quad l = 1, 2, \dots$$

Определяется размерность множества (ξ_k) обычно по корреляционному показателю ν . Если размерность аттрактора конечна и равна ν , то при $l > 2\nu + 1$ значения ν не зависят от l и выборки временного ряда экспериментальной величины. Ниже показана таблица зависимости $\nu(l)$ для временного ряда $T_{\text{sur}}(t_k)$.

1	1	2	3	5	6
ν	0,8	1,1	1,6	2,7	2,7

Важно отметить, что при $l \geq 5$ значение ν не меняется с ростом l , т. е. не более чем пятимерное фазовое пространство физических величин определяет температуру поверхности озера и его среднюю темпе-

ратуру. Анализ многих конвективных течений показал, что турбулентный режим определяется аттрактором малой размерности ($2,5 < \nu < 6$) (4).

Полученные результаты позволяют также сделать вывод, что быстрые изменения состояния озера описываются его термодинамическим потенциалом с особенностью типа элементарной функции катастроф A_{+5} .

В результате проведенного анализа показано, что для озер рассматриваемого типа возможна классификация вертикальных профилей температуры, которая определяется тепловым состоянием озера. Эта классификация в озерах обычного типа (без геотермальных донных источников) необязательна. Выполненная работа подчеркивает, что ведущим звеном в формировании теплообмена в исследуемом озере является его связь с общей геотермальной системой Узон-Гейзерной кальдеры, а следовательно, геотермальные источники на дне озера формируют тепловой режим озера в большей степени, чем его взаимодействие с атмосферой.

Приведенная в статье классификация распределений $T(z)$ показывает, что состояние геотермального озера может быть описано с привлечением теории катастроф (для термодинамического потенциала озера может быть использована функция элементарной катастрофы A_{+5}).

ЛИТЕРАТУРА

1. Карпов Г. А. В кальдере вулкана. Новосибирск, 1980.
2. Гилмор Р. Прикладная теория катастроф. М., 1984. Т. 1, 2.
3. Павлов С. В. Методы теории катастроф в исследовании фазовых переходов. М., 1993.
4. Ахромеева Т. С., Курдюмов С. П., Малинецкий Г. Г., Самарский А. А. Нестационарные структуры и диффузионный хаос. М., 1992.
5. Пастухов Д. Ф. Метод эквивалентной струи для описания развитой турбулентной области температурного поля, порожденной взаимодействием нескольких конвективных струй: Деп. ВИНТИ № 934-В94. М., 1994.

Поступила в редакцию
17.03.95

ВЕСТН. МОСК. УН-ТА. СЕР. 3. ФИЗИКА. АСТРОНОМИЯ. 1995. Т. 36, № 6

АСТРОНОМИЯ

УДК 521.93; 551.24; 521.937

ДВИЖЕНИЕ ЛИТОСФЕРНЫХ ПЛИТ КАК МЕХАНИЗМ ВЕКОВЫХ ВАРИАЦИЙ КОЭФФИЦИЕНТОВ ГЕОПОТЕНЦИАЛА И ВРАЩЕНИЯ ЗЕМЛИ

Ю. В. Баркин

(ГАНШ)

На основе простой модели литосферных плит в виде неизменяемых, однородных и тонких сферических оболочек с заданной постоянной толщиной, абсолютное движение которых описывается кинематической теорией АМО-2, определены вековые вариации коэффициентов второй гармоники геопотенциала и вращения Земли. Показано, что вследствие перераспределения масс по конструктивным и деструктивным границам плит полюс оси вращения Земли смещается со скоростью $0,331''$ за век вдоль меридиана с западной долготой $32,073^\circ$.