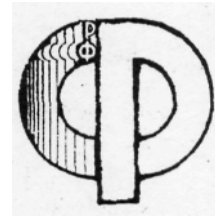


ISSN 0021—3462

ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИИ



Р А Д И О Ф И З И К А

1993

ТОМ 36

3-4

ИЗДАНИЕ НИЖЕГОРОДСКОГО УНИВЕРСИТЕТА
И НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО
РАДИОФИЗИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА

УДК 621.371:532.5

**РАДИОМЕТРИЯ ДИНАМИКИ ПРОФИЛЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ВОДНОЙ СРЕДЫ
ПРИ ПРОХОЖДЕНИИ ВНУТРЕННИХ ВОЛН***К. П. Гайкович, А. И. Резник, Р. В. Троицкий*

По измерениям теплового радиоизлучения на длинах волн 3, 9 и 30 см определяются вариации температурного распределения в поверхностном слое водной среды при возбуждении в ней внутренних волн.

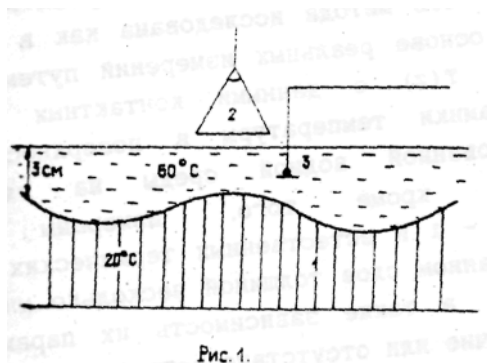
Многочастотные радиометрические измерения позволяют определять подповерхностный профиль температуры $T(z)$ различных сред [1-7]. Возможности радиометрического контроля температурной стратификации водной среды исследованы в [3]. Показано, в частности, что в пресной воде возможно восстановление распределения температуры в слое с глубиной до 5 - 10 см по яркостным температурам радиоизлучения, наблюдаемого в сантиметровом и дециметровом диапазонах. Для простых распределений $t(z)$ хорошее качество восстановления (погрешность не более ~ 20% от общего перепада температур) получается при использовании 3 - 4 длин волн, выбранных таким образом, чтобы соответствующие толщины скин-слоя перекрывали интервал восстановления по глубине. Эффективность метода исследована как в численных экспериментах, так и на основе реальных измерений путем сравнения восстановленных профилей $t(\Gamma)$ с данными контактных измерений. Выполнены измерения динамики температуры в поверхностном слое искусственно стратифицированной водной среды на глубине до нескольких сантиметров: кроме того, измерены перепады температуры величиной 0,5 - 1 К естественных термических пленок, возникающих в нетурбулизованном слое толщиной несколько миллиметров на границе вода - воздух, а также зависимость их параметров от состояния поверхности (наличие или отсутствие ветра).

Одним из процессов, приводящих к вариациям профиля температуры в поверхностном слое водной среды, может быть, в частности, распространение внутренних волн. Неоднородный температурный профиль

в водной среде приводит к неоднородному распределению ее плотности, что создает условие для возбуждения и распространения внутренних волн. Внутренняя волна приводит к периодическим вариациям исходного температурного распределения, эти вариации и могут быть определены радиометрическим методом. Достоинством метода является его неинвазивность, т.е. отсутствие влияния измерительного устройства на наблюдаемый процесс.

Возможность мониторинга внутренних волн важна для лабораторных исследований распространения внутренних волн в температурно-стратифицированной среде, в частности в океане. Для успешной реализации метода в лабораторных условиях (в отличие от естественных условий) имеется возможность создать значительный перепад температур на масштабе скин-слоя. Толщина скин-слоя в пресной воде существенно больше, чем в соленой, поэтому в лабораторном эксперименте целесообразно использовать пресную воду.

1. Методика измерения и решение обратной задачи. Измерения выполнялись в лабораторных условиях для искусственно стратифицированного поверхностного слоя воды толщиной 1 - 3 см при перепаде температур 10 - 40 К (горячая вода поверх холодной). Измерения проводились на длинах волн 3, 9 и 30 см, что обеспечивало глубину зондирования порядка 5 см. Для исключения влияния отражения от поверхности и достижения необходимого пространственного разрешения использовалась система контактных антенн [4, 8] с общим линейным размером - 5 см. На глубине 1 см выполнялись контрольные



измерения температуры с помощью контактного датчика. Схема измерений приведена на рис. 1 (1 - кювета с водой, 2 - антенная система, 3 - контактный датчик температуры). Первые результаты наблюдения периодических измерений яркостных температур при возбуждении внутренних волн представлены в [9].

Флуктуационный порог чувствительности радиометров был не хуже 0,1 К при постоянной времени 1 с. В процессе измерений в качестве калибровочного эталона использовалась сама исследуемая водная среда, что позволило практически устранить основные источники погрешностей, обычно сопутствующие абсолютным радиометрическим измерениям. При

калибровке использовались измерения яркостных температур для двух значений температуры равномерно прогретой воды в кювете. Одно из этих калибровочных измерений проводилось до создания горячего поверхностного слоя при температуре воды 20°C, а второе проводилось после измерения волнового процесса, когда горячая и холодная вода перемешивалась. Разница температуры двух калибровочных измерений составляла при этом $\Delta T \approx 2$ К. В диапазоне яркостных температур 20 - 22° С точность их измерения с учетом чувствительности радиометров составляет $\delta T_{я0} \approx 0.1 - 0.15$ К. Однако значения измеряемых яркостных температур существенно выходят за интервал калибровки, поэтому погрешность в этом случае возрастает пропорционально величине отклонения и может быть оценена как $\delta T_{я} = (T_{я} - 20) / \Delta T \cdot \delta T_{я0}$, что составляет 2 - 3 К для $\lambda = 3$ см, 1,5 - 2 К для $\lambda = 9$ см и около 1 К для $\lambda = 30$ см в начальные моменты времени. В конце измерений, когда амплитуда колебаний $T_{я}$ и сами значения $T_{я}$ уменьшаются, погрешность измерения пропорционально уменьшается.

Яркостная температура $T_{я}(\lambda)$ теплового радиоизлучения на длине волны λ выражается через глубинный профиль $T(z)$ как

$$T_{я}(\lambda) = \int_{-\infty}^0 T(z) \gamma(\lambda, T(z)) \exp\left[-\int_z^0 \gamma(\lambda, T(z')) dz'\right] dz, \quad (1)$$

$\gamma(\lambda)$ - коэффициент поглощения.

Уравнение (1) является уравнением первого рода, и для его решения необходимо, использовать дополнительную информацию об искомой функции $T(z)$. В данной работе применялась методика, основанная на принципе обобщенной невязки Тихонова [10] с использованием информации о квадратичной суммируемости или гладкости $T(z)$, а также положительной определенности последней. Подробное исследование метода для случая зондирования водной среды содержится в [3].

Специфика рассматриваемого случая состоит в том, что перепады температур велики и приводят через температурную зависимость $\gamma(T)$ к нелинейности уравнения (1).

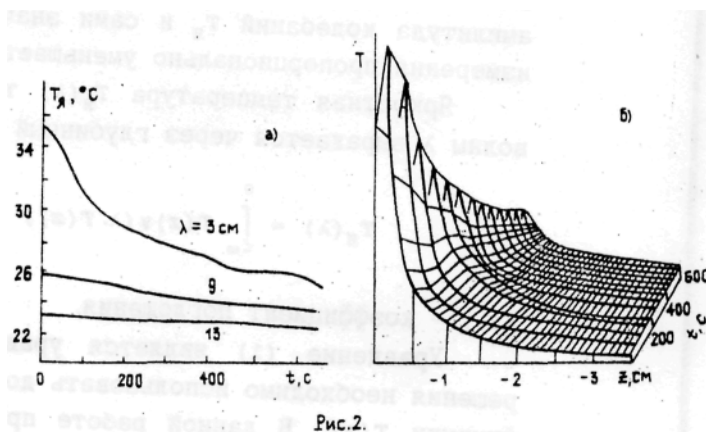
Поэтому для решения (1) применялся итерационный алгоритм

$$T_{я}(\lambda) = \int_{-\infty}^0 T^1(z) \gamma(\lambda, T^{1-1}(z)) \exp\left[-\int_z^0 \gamma(\lambda, T^{1-1}(z')) dz'\right] dz, \quad (2)$$

где при вычислений первого приближения $T^1(z)$ в ядро уравнения (2) подставлялось значение глубинной температуры, т.е. $T^0(z) = T(-\infty)$.

Решение искалось в виде отклонения $T^l(z)$ от $T(-\infty)$ с использованием априорной информации о положительной определенности этой величины [10].

Эффективность алгоритма исследовалась путем численного эксперимента по замкнутой схеме. Задавался исходный профиль $T(z)$, вычислялись значения $T_d(\lambda)$, добавлялась случайная погрешность со стандартным отклонением δT_d , решалась обратная задача (2), и восстановленный профиль сравнивался с исходным. Установлено, что для рассматриваемого класса распределений $T(z)$ достаточно второго приближения в итерационном процессе. При реализованной точности измерений погрешность восстановления составляет $\sim 20\%$ от перепада температур (по сравнению с глубиной).



2. Восстановление температурной структуры внутренней волны.

Следует отметить, что колебания температуры, обусловленные прохождением внутренней волны, не являются единственным процессом в слое с резкой искусственной температурной стратификацией. Этот процесс протекает на фоне охлаждения нагретого поверхностного слоя и диффузии тепла в более глубокие слои. Динамика температуры этих процессов исследовалась в [3]. Полученные экспериментальные данные использованы нами для построения трехмерной структуры этого процесса. На рис. 2а представлена динамика $T_d(t)$ на трех длинах волн, и на рис. 2б - соответствующая динамика восстановленного профиля температуры $T(z, t)$ за период времени 10 мин. Благодаря большей по сравнению с [3] размерности сетки по временной переменной можно видеть, что этот процесс не является совершенно монотонным, что, по-видимому, связано с опусканием термика с

охлаждающейся поверхности при $t \approx 200$ с.

Приведенный пример показывает, что процессы, связанные с охлаждением стратифицированного слоя, являются существенно более медленными по сравнению с волновыми. На рис.3а представлен пример квазипериодических вариаций $T_A(t)$ после движения волнопродуктора в момент $t = 0$ в стратифицированном слое толщиной ~ 3 см. Период вариаций составляет $\tau = 10-15$ с, а их амплитуда меняется от ~ 10 К (~ 3 К на $\lambda = 30$ см), постепенно затухая с характерным временным масштабом $\tau_3 \approx 30-40$ с.

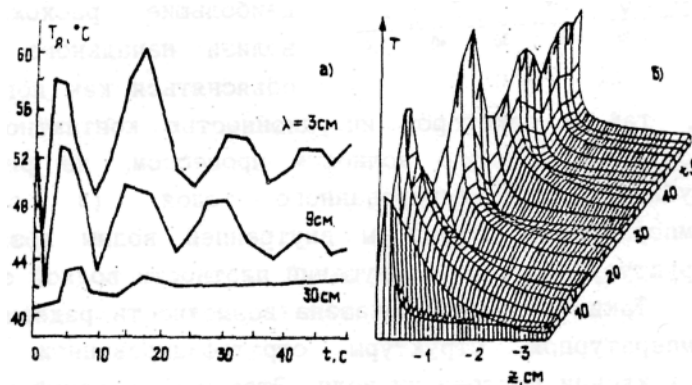


Рис.3.

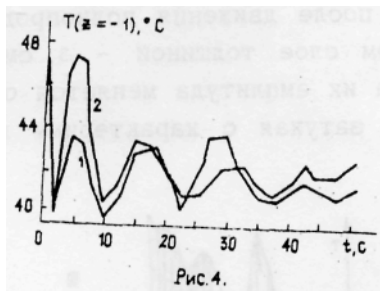
Известно, что период внутренних волн должен удовлетворять условию $\tau \geq \tau_B$, где τ_B - период, соответствующий частоте Брента-Вайсяля

$$\omega_B = \sqrt{\frac{g}{\rho} \frac{d\rho}{dz}}. \quad (3)$$

g - ускорение свободного падения, ρ - плотность среды. Оценки показывают, что $\tau_B = 3-5$ с, т.е. наблюдаемый процесс удовлетворяет необходимому условию. Можно видеть, что период колебаний постепенно возрастает, что объясняется постепенным уменьшением градиента плотности при выравнивании температуры.

На рис.3б представлена восстановленная из решения (2) по данным рис.3а динамика температурного профиля $T(z, t)$ при прохождении внутренней волны. Структура температурной волны такова, что максимум амплитуды достигается на глубине $z \approx -0,2$ см. Это можно объяснить влиянием поверхности, но нельзя исключить и артефакта. Для более детального исследования структуры волны на толщинах, характерных для естественных термических пленок, и уверенной регистрации соответствующих особенностей целесообразно использовать в наборе длин волн $\lambda = 0,5-1$ см.

В процессе измерений T_d одновременно выполнялись также измерения температуры на глубине $z = -1$ см с помощью контактного датчика. На рис. 4 представлены для сравнения данные восстановленной



из решения (2) (кривая 1) и измеренной датчиком (кривая 2) температуры $T(z=-1)$ см). Точность контактных измерений $\pm 0,1$ К. Можно сделать вывод, что глубинная структура волны восстанавливается достаточно хорошо. Наибольшие расхождения имеют место вблизи начального момента, что может объясняться как погрешностями измерения

T_d , так и некоторой инерционностью контактного датчика. Глубина слоя, захваченного волновым процессом, на рис.3б соответствует глубине стратифицированного слоя (3 см). Восстановление температурной структуры внутренней волны позволяет определять и структуру волновых возмущений плотности водной среды.

Таким образом, показана возможность радиометрического контроля температурной структуры стратифицированной водной среды при прохождении внутренних волн. Этот неинвазивный метод открывает новые возможности исследований в гидрофизических приложениях. В частности, перспективным представляется исследование конвекции и других динамических процессов в термически неоднородной жидкости, приводящих к вариациям температуры поверхностного слоя.

Следует отметить, что в естественных средах, особенно в морской воде, регистрация внутренних волн весьма проблематична из-за малого градиента температур и трудностей измерения при наличии волнения, модулирующего коэффициент отражения. Представляют, однако, интерес попытки радиометрического обнаружения влияния внутренних волн на параметры термической пленки в тонком нетурбулизованном поверхностном слое воды, где градиент температуры резко возрастает. Вместе с тем, учитывая, что возможный эффект не может превышать долей градуса, эту задачу на первом этапе также целесообразно решать в лабораторных условиях, где уже отработана методика радиометрического контроля профиля температуры в термических пленках [3].

ЛИТЕРАТУРА

1. Тихонова Т.В., Троицкий В.С. //Изв. вузов. Радиофизика. 1970. Т.13. N 9. С. 1273.

2. Кондратьев К.Я., Шульгина В.М. //ДАН СССР. 1971. т. 200. н 1. с. 88.
3. Гайкович К. П. , Резник А. Н. , Сумин М. И. , Троицкий Р. В. //Изв. АН СССР. Сер. ФАО. 1987. Т. 23. N 7. С. 761.
4. Гайкович К. П. , Сумин М. И., Троицкий Р. В. //Изв. вузов. Радио физика. 1988. Т. 31. N 9. С.1104.
5. Гайкович К. П. , Резник А. Н.//Изв. вузов. Радиофизика. 1989. Т. 32. N 11. С. 1343.
6. Гайкович К. П., Резник А.Н., Троицкий Р. В.//Изв. вузов. Радио- физика. 1989. Т. 32. N 12. С. 1467.
7. Гайкович К. П.//Исследование Земли из космоса. 1990. N 6. с.71.
8. Троицкий В.С., Аранжереев В.А., Густов А. В. и др. //Изв. вузов. Радиофизика. 1986. т. 29. н 1. с. 62.
9. Гайкович К.П., Резник А. Н. , Троицкий Р. В.//Тезисы докл. 3 Всесоюзн. школы-семинара "Методы гидрофизических исследований".- Калининград, 1989. Ч. 2. С. 27.
10. Тихонов А. Н. , Гончаровский А. В. , Степанов В. В.,- Ягола А.Г. Регуляризирующие алгоритмы и априорная информация. - М.: Наука, 1983.

Научно-исследовательский
радиофизический институт

Поступила в редакцию
8 августа 1991 г.

RADIOMETRY OF DYNAMICS OF WATER MEDIUM TEMPERATURE
PROFILE AT INTERNAL WAVE TRANSIT

K.P. Gaikovich, A.N.Reznik, R.V.Troitsky

By measurements of the thermal radio emission at wavelengths of 3, 9 and 30 cm the variations of the temperature distribution are defined in the surface layer of water medium at excitation of internal waves in it.