

## ГЕОФИЗИКА

УДК 532.529.2:551.481.1

## ЛАБОРАТОРНАЯ МОДЕЛЬ ВЕСЕННЕГО ТЕРМИЧЕСКОГО БАРА

Д. А. Соловьев, Н. С. Блохина, А. Е. Орданович

(кафедра физики моря и вод суши)

E-mail: blokhina@phys.msu.ru

Описывается лабораторная установка, позволяющая моделировать термический бар, и приводятся результаты экспериментального исследования механизмов возникновения и динамики развития термического бара. Проводится сравнение полученных результатов с данными натурных наблюдений, показывается принципиальная возможность лабораторных экспериментов по воспроизведению термического бара, наблюдаемого в природных водоемах.

Термический бар представляет собой фронтальный раздел с температурой  $4^{\circ}\text{C}$  от поверхности до дна, который обычно возникает в пресных и слабосоленых водоемах ( $S \leq 24.7\text{‰}$ ) средних широт в периоды весеннего прогрева и осеннего охлаждения [1]. Его возникновение связано с аномальной зависимостью плотности воды от температуры в районе  $4^{\circ}\text{C}$ . Термический бар, возникая около берега, перемещается к центру водоема, как правило, параллельно береговой линии. В течение всего периода существования термобара в водоемах наблюдаются своеобразные термогидродинамические процессы, связанные с этим явлением, к изучению которых проявляется значительный интерес. Современное состояние исследований термического бара характеризуется достаточным количеством данных натурных измерений, немногочисленностью лабораторных экспериментов [2–4] и математических моделей, в достаточной мере адекватных реальным процессам; неполнотой разработок прикладных аспектов.

Настоящая работа посвящена лабораторному моделированию термобара на созданной установке, позволяющей провести экспериментальное исследование механизмов возникновения и динамики развития термического бара с учетом воздействия ветра на водную поверхность.

Лабораторная установка схематично показана на рис. 1. Она представляет собой прямоугольный бассейн из стекла длиной  $l = 1.5$  м и шириной  $n = 0.4$  м. Дно бассейна в продольном направлении имеет наклон, угол  $\alpha$  которого можно изменять в пределах  $0-15^{\circ}$ . Заливаемая в бассейн вода при фиксированном наклоне дна образовывала клин. Для предотвращения теплоотдачи дно и стенки бассейна изолировались пенопластом. Поток тепла  $Q$  на водную поверхность создавался электрическими лампами ИКЗ-250 в диапазоне

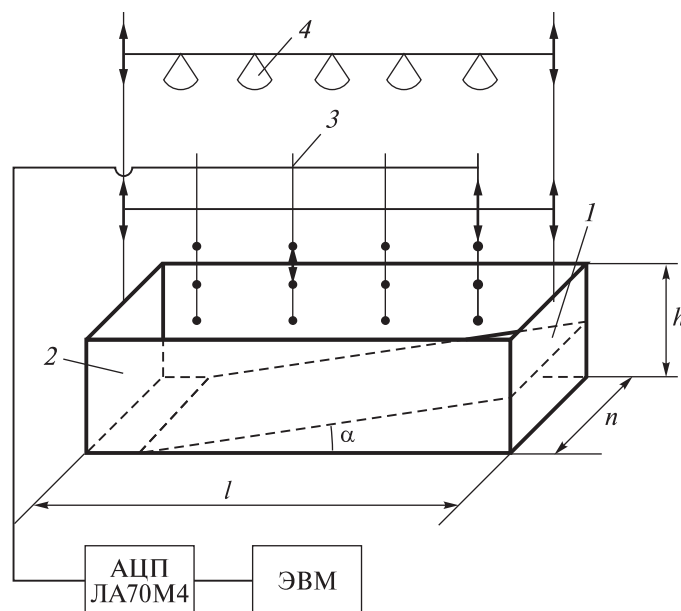


Рис. 1. Схема лабораторной установки. Обозначения:  $l$  — длина основания бассейна,  $\alpha$  — угол наклона дна,  $n$  — ширина бассейна,  $h$  — глубина бассейна, 1 — наклонное дно (клин), 2 — прозрачная наблюдательная стенка, 3 — вертикальные зонды с термодатчиками, 4 — электролампы накапливания

$1 \cdot 10^{-3} - 5 \cdot 10^{-3}$  кал/см<sup>2</sup>·с. Для измерения потока тепла использовался цифровой люксметр AZ 8561, позволяющий получать их значения с точностью до  $\pm 2\%$ . Температура воды измерялась с помощью четырех вертикальных зондов с закрепленными на них полупроводниковыми интегральными микросхемами К1019ЕМ1 (датчиками температуры) и регистрировалась платой АЦП ЛА70М4. Тарированные термодатчики соединялись с персональным компьютером, в котором накапливались временные ряды массивов значений температуры в различных точках

водной среды. Отдельный датчик был установлен над поверхностью воды для регистрации температуры воздуха. Абсолютная погрешность измерения температуры составляла не более  $0.15^\circ\text{C}$ . Параллельно с измерением температуры проводилась видеосъемка циркуляционных движений в воде. По трекам перемещений частиц воды определялись скорости циркуляционных движений в вихрях. В качестве трассеров использовались кристаллы марганцовокислого калия.

Также имеется возможность исследовать на установке влияние ветра на динамику развития термобара. Ее конструкция позволяет установить ветрогенератор, создающий поток воздуха над водной поверхностью.

Перед началом каждого опыта бассейн наполнялся водопроводной водой и льдом, по мере таяния которого температура воды понижалась до величины  $T_0 < T_m$  ( $T_m = 4^\circ\text{C}$ ). Для выравнивания температурных неоднородностей вода в бассейне перемешивалась, а перед началом прогрева несколько минут отстаивалась. Измерения проводились на продольном разрезе, проходящем посередине бассейна. Расстояние между соседними точками, в которых выполнялись измерения, могло изменяться от 0.5 до 20 см.

Была проведена серия экспериментов по моделированию термобара.

После начала прогрева поверхностных вод и достижения ими в мелководной части бассейна температуры  $T$ , большей, чем температура придонных вод ( $T_0 < T \leq T_m$ ), по траектории следов трассеров отчетливо прослеживалось формирование двух циркуляционных ячеек, между которыми располагался фронтальный раздел, связанный с возникновением термобара. Горизонтальные оси замкнутых циркуляционных ячеек ориентировались вдоль линии термобара. Анализ результатов измерений скорости движения трассеров показал, что горизонтальный перенос водных масс через гидрофронт отсутствовал, о чем свидетельствовало наличие практически не искривленных течениями вертикальных следов трассеров около фронтального раздела. Ширина переходной зоны между циркуляционными ячейками составляла 4–8 см. По мере увеличения размера теплой мелководной области фронтальный раздел, сдвигаясь в глубокую часть бассейна, принимал наклонное положение и искривлялся. Приблизительно через 60 мин термобар проходил через весь бассейн. В результате выполненных опытов были выявлены две фазы, которые характеризовались различной скоростью смещения термобара в наклонной области бассейна — первая, «быстрая» (10–30 мин после начала наблюдений) и вторая, «медленная» (30–60 мин). Так как поток тепла через свободную поверхность воды в лабораторной установке не менялся в пределах одного опыта, нелинейный характер скорости движения термобара свидетельствует

о значительной роли горизонтальной адвекции тепла, связанной с изменением объемов теплой и холодной воды по разные стороны от гидрофронта по мере его смещения. Смена двух фаз характеризуется искривлением в вертикальной плоскости фронтального раздела между циркуляционными ячейками, наполнением языка теплой приповерхностной воды на нижний холодный слой и усилением S-образности эпюр скорости течения в области около термобара. Данный факт в выполненных ранее натурных наблюдениях не отмечался.

Полученные в лабораторных экспериментах результаты динамики изменения термической структуры водной среды и течений были сопоставлены с данными натурных наблюдений [5, 6], что дало качественное совпадение результатов (рис. 2). По результатам сравнительного анализа сделан вывод о том, что нелинейный характер пространственно-временного изменения средней скорости смещения термического бара в лабораторной модели подтверждается спутниковыми ИК-наблюдениями за природным термобаром [6]. Результаты, полученные на лабораторной установке, позволяют провести верификацию математической модели, разработанной авторами [7, 8].

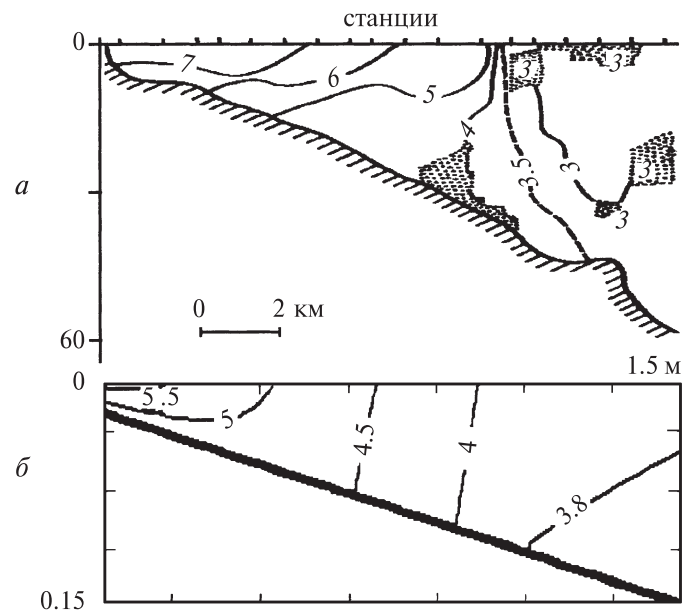


Рис. 2. Поля распределения температуры воды: (а) южной части озера Онтарио в период существования в нем термобара (по [5]), (б) данные лабораторного моделирования

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (гранты 06-05-64911-а, 05-05-64870-а).

#### Литература

1. Тихомиров А.И. // Изв. Всесоюз. геогр. об-ва. 1959. **91**, № 5. С. 424.
2. Зилитинкевич С.С., Крейман К.Д. // Океанология. 1990. **30**, № 5. С. 750.

3. *Elliott G.H., Elliott J.A.* // Proc. 13th Conf. Great Lakes Res., Int. Assoc. Great Lakes Res. June 2–6, 1970. Buffalo; N.Y., 1970. P. 413.
4. *Гриценко В.А., Демченко Н.Ю., Руденко А.И., Чубаренко И.П.* // Сб. тр. науч. конф. «Физические проблемы экологии (Экологическая физика)». Москва, 22–24 июня 2004. № 12. С. 12.
5. *Rodgers O.K.* // Proc. 11th Conf. Great Lakes Res., Internal. Milwaukee, Wisconsin, April 18–20, 1968. P. 480.
6. *Бычкова И.А., Викторов С.В., Демина М.Д.* // Океанология. 1989. **XXIX**, № 5. С. 551.
7. *Блохина Н.С., Овчинникова А.В., Орданович А.Е.* // Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. 2002. № 2. С. 60 (Moscow University Phys. Bull. 2002. N 2. P. 73).
8. *Блохина Н.С., Соловьев Д.А.* // Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. 2006. № 3. С. 59.

Поступила в редакцию  
22.11.06