

Роль внутренних волн в процессах развития интрузий в термоклине и апвеллинга

Б. И. Самолюбов,* И. Н. Иванова†

¹Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова,
физический факультет, кафедра физики моря и вод суши
Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2

Представлены результаты исследований механизмов и разработки математической модели взаимодействия внутренних волн и течений. Обнаружено, что на фоне апвеллинга развивались внутренние волны, под влиянием которых формировались струи, приводившие к колебаниям скорости интрузии. Предложены механизм и математическая модель этого процесса.

PACS: 92.10.Lq, 92.10.Wa, 92.40.-t, 92.40.Ni. УДК: 556.532.5.

Ключевые слова: внутренние волны, стратифицированные течения, интрузия, апвеллинг, гидродинамическая устойчивость, турбулентный обмен.

Внутренние волны в стратифицированных водохранилищах, озерах и морях могут не только серьезно влиять на динамику струй и апвеллингов, но и порождать эти течения. Поэтому исследования таких процессов и их воздействия на энерго- и массообмен активно развиваются [1–6]. Расшифровка механизмов развития систем течений с внутренними волнами, стратифицированными струями и апвеллингом требует применения современных методов измерений, комплексного анализа результатов и специальных подходов при математическом моделировании потоков и переноса примесей. Таким исследованиям, проводившимся на ряде полигонов, посвящена данная работа, цель которой – выявление механизмов и разработка методов математического моделирования взаимодействия внутренних волн и течений.

Анализируемые результаты получены экспедициями кафедры физики моря и вод суши физического факультета МГУ на Ивановском водохранилище и озерах Телецком, Ладожском и Онежском (1999–2013). Рассматриваются структуры течений и распределения параметров состава воды на восьми продольно-осевых разрезах.

В ходе измерений одновременно регистрировались профили скорости течения U , температуры воды T , концентрации взвеси S , растворенных солей C , кислорода O_2 , а также скорость ветра U_w . Применялись следующие приборы: доплеровский профилограф скорости RDSP600 (Aanderaa Instruments), зонды RCM 9 LW (Aanderaa Instruments) и CTD90M (Sea-Sun), фотоэлектрический прозрачномер с датчиком температуры (МГУ), регистраторы электропроводности и концентрации O_2 «Эксперт».

Контуры апвеллинга на распределениях температуры воды, концентрации взвеси и хлорофилла-а по глубине и длине залива на разрезе от устья р. Волхов (рис. 1) колеблются под влиянием второй моды внутренней волны сейшевой природы, типичной для оз. Ла-

дожского. Из анализа структур полей T, S, C, O_2 следует, что в заливе существует приток теплых вод с повышенными концентрациями взвеси и хлорофилла-а из р. Волхов (слева на рис. 1), а с другой стороны, поступление холодных придонных вод с пониженными концентрациями примесей из озера (справа).

В поле температуры зарегистрировано глубокое вторжение холодных озерных вод в залив (почти на 90 % его длины) за счет апвеллинга. В поле концентрации взвеси наблюдается ее спад за счет седиментации взвеси, поступающей из р. Волхов, особенно быстрый во второй половине полной длины залива. Волновые прогибы изолиний концентраций взвеси и хлорофилла-а при $x = 15–20$ и $30–35$ км сопровождаются ростом удельных содержаний этих субстанций в области термоклина, а для хлорофилла-а (на первом из указанных участков) даже в придонном слое на 30 %.

Исследования показали, что в систему течений, наряду с апвеллингом и затопленной струей речных вод, входят струя над термоклинном из озера в губу и приповерхностное течение (рис. 2).

Обнаруженная струя из озера в губу обусловлена развитием крупномасштабной внутренней волны с длиной порядка 56 км, т. е. близкой к четверти длины озера. Для анализа влияния внутренней волны на форму профиля плотности было исследовано изменение фактора формы профиля от фазовой скорости волны.

Фактор формы — отношение среднего по вертикали значения разности плотностей жидкости в струе и над ней в зоне действия струйного течения к максимальному значению.

Установлено, что при числах Ричардсона, меньших порогового, равного 4, увеличение фазовой скорости внутренней волны приводит к увеличению фактора формы (рис. 4). Это может быть объяснено перемещением вод под влиянием внутренней волны. При числах Ричардсона, больших критического, то есть при большой гидродинамической устойчивости, увеличение фазовой скорости внутренней волны приводит к уменьшению фактора формы. То есть внутренняя волна способствует росту неоднородностей в профиле плотности.

Этот процесс может быть объяснен перемещением

*E-mail: samolyubov@phys.msu.ru

†E-mail: ivair@yandex.ru

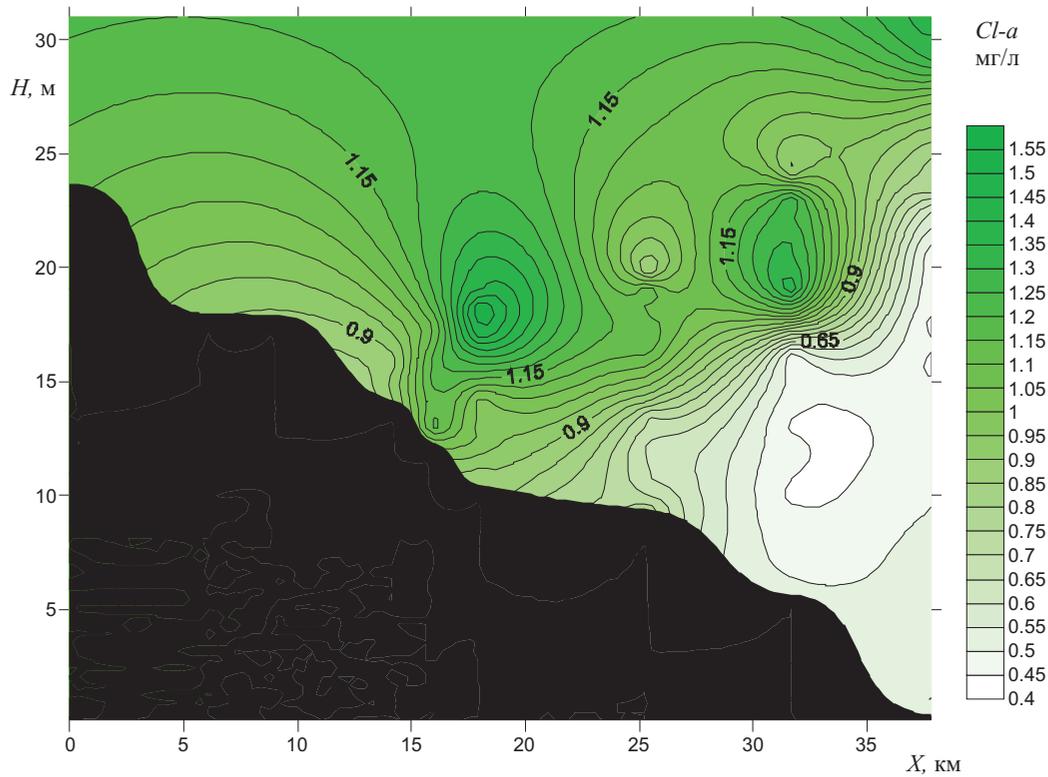


Рис. 1: Зависимость концентрации хлорофилла-а от расстояния от устья р. Волхов. (оз. Ладожское, 15.08.2012 г.)

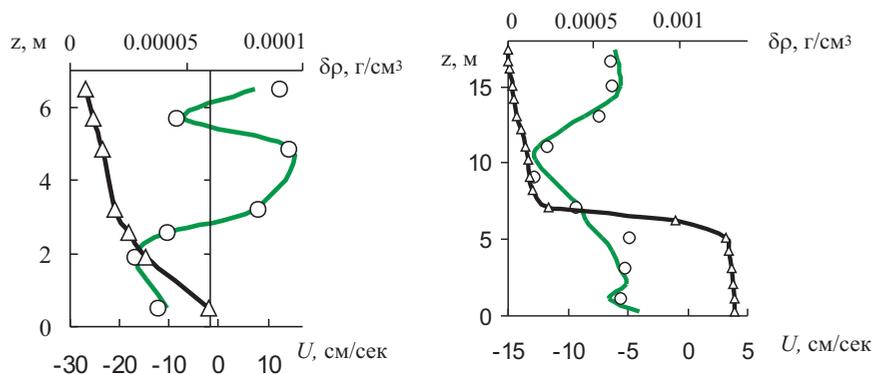


Рис. 2: Структура течений с апвеллингом и внутренней волной (август 2012 г.). Профили скорости U и изменения плотности $\delta\rho$ с глубиной а — на стадии развития речной струи протяженностью до 9 км, б — в зоне доминанты волнового течения и апвеллинга в центре залива

струи под действием внутренней волны без размыва ее границ. На основе полученных результатов был предложен механизм взаимодействия струйных течений с внутренней волной за счет деформации распределения поля плотности волной для случаев с гидродинамической устойчивостью, меньшей пороговой ($R_{ij} < 7,5$).

К такому режиму относится большинство рассмот-

ренных течений.

Основные этапы этого механизма сводятся к следующим.

1. Реверсивное волновое течение деформирует профиль плотности в зоне действия струи, образуя квазиступенчатую структуру.
2. Струя в слое между максимумами градиента

плотности меняет траекторию за счет волновых колебаний термоклина. Ее скорость в определенных фазах возрастает (иногда почти вдвое) под действием силы тяжести и бароклинного градиента давления, затем спадает до начальных значений из-за асимметрии волны на течении и влияния стратификации на его устойчивость и, соответственно, динамику.

3. Развитие струи ведет к снижению устойчивости ее границ из-за сглаживания плотностных неоднородностей.
4. Затем волновое течение вновь деформирует профиль плотности, образуя ступенчатую структуру и меняя траекторию струи, и процесс циклически повторяется.

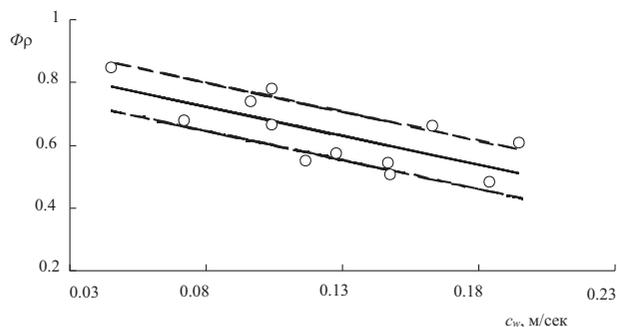


Рис. 3: График зависимости фактора формы профиля плотности от фазовой скорости внутренней волны на Иваньковском водохранилище 13–14. 07.1999 г.

При $R_{ij} > (R_{ij})_{cr}$ реверсивное волновое течение выравнивает профиль плотности, разрушая квазиступенчатую структуру. Струя в слое между максимумами градиента плотности ослабляется из-за уменьшения градиента давления. Это ведет к повышению устойчивости ее границ и образованию квазиступенчатой структуры. Затем волновое течение вновь выравнивает профиль плотности, и процесс циклически повторяется.

Предложенная математическая модель рассмотренных процессов основана на системе уравнений Рейнольдса. Для распределения волновой компоненты скорости использовалось решение из [7], а для скорости струи — из [2]. В систему добавлены полученные в данной работе выражения для градиента давления за счет волнового потока, а так же для толщи-

ны и траектории струи. Входные параметры модели — уклон дна is , распределение скорости на первой вертикали $U_0(z)$ и распределение плотности на разрезе $\rho(x, z)$. В результате получается распределение скорости $U(x, z)$.

Как видно из примера на рис. 4, теоретическое распределение удовлетворительно согласуется с экспериментальным. Стандартное отклонение в среднем по семи разрезам — 25%. Абсолютное отклонение на 20% меньше, чем в модели, в которой не учитывалось влияние внутренней волны. Причины разброса обусловлены приближениями квазистационарности, плоской задачи, отсутствием учета влияния притоков, а также отклонениями точек на разрезах от линий максимальных глубин.

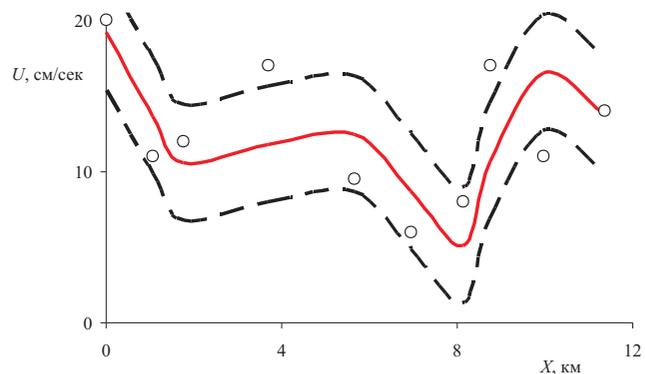


Рис. 4: Теоретические и измеренные распределения скорости струи (оз. Телецкое 27.07.2004)

Обнаружено, что на фоне апвеллинга развивались внутренние волны, под влиянием которых формировались струи к вершине залива, приводившие к колебаниям скорости затопленной струи.

Выявлены закономерности влияния внутренних волн на струйные течения. Предложен механизм этого процесса с учетом изменений структуры поля плотности.

Получены выражения для траектории струи и для фактора формы профиля плотности воды в виде их зависимостей от фазовой скорости внутренней волны, скорости ветра и устойчивости течения. Учтен противоположный характер этих зависимостей при числах Ричардсона для струи, меньших и больших найденного порогового значения.

Предложена и проверена для восьми систем течений математическая модель с учетом влияния внутренней волны на траекторию струи.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 14-05-00822).

[1] Дружинин О.А. Известия РАН. Физика атмосферы и океана. **39**, № 5, С. 697. (2003).

[2] Самолубов Б. И. Плотностные течения и диффузия

- примесей. М.: Изд. URSS. 2007. 352 с. (2007).
- [3] Терлецкая Е. Прикладная гидромеханика, **13**. (2011).
- [4] Dorostkar A., Voegman L. Limnol. Oceanogr. **58**(1), С. 153. (2013).
- [5] Gomes-Giraldo A. Limnol. Oceanogr. **53**(1), С. 354. (2008).
- [6] Umlauf L., Lemmin U. Limnol. Oceanogr. **50**(5), С. 1601. (2005).
- [7] Прандтль Л. Гидроаэромеханика. (Москва — Ижевск, 2000). 572 с.

Role of Internal Waves in Processes of Development of Intrusions in Thermocline and of Upwelling

B. I. Samolyubov^a, I. N. Ivanova^b

*Department of physics of sea and inland waters, Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University,
Moscow 119991, Russia*

E-mail: ^asamolyubov@phys.msu.ru, ^bivair@yandex.ru

The results of researches and elaboration of mathematical model of the interaction of internal waves and currents are presented. It was discovered that against the background of upwelling the internal waves were developed. Under the influence of waves there were formed jets, leading to the fluctuations of the velocity of intrusion. There were proposed mechanism and mathematical model of this process.

PACS: 92.10.Lq, 92.10.Wa, 92.40.-t, 92.40.Ni.

Keywords: internal waves, stratified currents, intrusion, upwelling, hydrodynamical stability, turbulent exchange.

Сведения об авторах

1. Самолюбов Борис Исаевич — докт. физ.-мат. наук, профессор, главный научный сотрудник; тел.: (495) 939-10-46, e-mail: samolyubov@phys.msu.ru.
2. Иванова Ирина Николаевна — канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник; тел.: (495) 939-10-46, e-mail: ivair@yandex.ru.