

Влияние внутренних волн на распределение хлорофилла-а в заливе

Б.И. Самолюбов, И.Н. Иванова*

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

В работе исследуются механизмы влияния внутренних волн на перенос хлорофилла-а. Выявлена структура поля скорости при наличии внутренних волн, взаимодействующих со струей в термоклине, дрейфовым течением и плотностным потоком. Показаны закономерности влияния внутренних волн на распределение хлорофилла-а. Получены зависимости концентрации хлорофилла-а в деятельном слое от высоты внутренней волны. Обнаружена и представлена аналитически зависимость концентрации хлорофилла-а от фазовой скорости внутренней волны и концентрации взвеси.

PACS: 92.10.Lq, 92.10.Wa, 92.40.-t, 92.40.Qj. УДК: 56.532.5.

Ключевые слова: внутренние волны, плотностные потоки, хлорофилл-а, концентрация взвеси.

ВВЕДЕНИЕ

Процессы развития внутренних волн в стратифицированных водохранилищах, озерах и морях представляют особый интерес для разработки методов прогноза энерго-массообмена и переноса примесей. С гидроэкологической точки зрения исключительно важен учет влияния гидрофизических эффектов, и прежде всего волновых, на перенос хлорофилла-а и, соответственно, фитопланктона. Расшифровка механизмов развития внутренних волн, стратифицированных струй и придонных плотностных потоков требует применения современных методов измерений, комплексного анализа результатов и специальных подходов при математическом моделировании потоков и переноса примесей. Таким исследованиям посвящена данная работа, цель которой — выявление механизмов и разработка методов учета влияния внутренних волн на перенос хлорофилла-а.

1. ОБЪЕКТ, АППАРАТУРА И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Анализируемые результаты получены экспедициями физического факультета МГУ в Петрозаводской губе Онежского озера 16.09.2007 и 8-10.07.2015 гг. Выполнялись исследования структур полей скорости течения, температуры воды, концентраций взвеси, хлорофилла-а и растворенных солей на разрезах и срочных станциях. Измерения велись с борта НИС «Эколог» ИВПС Кар НЦ РАН. Комплекс аппаратуры включал следующие приборы. Мультипараметрический зонд RCM 9 LW (Aanderaa) с доплеровским регистратором вектора скорости течения, датчиками температуры, электропроводности воды, концентраций кислорода и взвеси. Зонд использовался для получения профилей ука-

занных характеристик с шагом 1 м. Зонд STD90M (Sea-Sun), применявшийся для подробных регистраций профилей температуры воды, мутности, электропроводности и концентрации хлорофилла-а. Дискретность профильных измерений 0.1 м. Зонд YSI 600OMS (YSI Incorporated) с датчиками температуры, электропроводности и мутности воды. Дискретность та же. Одновременно с зондированиями (по всей глубине) измерялись метеорологические параметры.

2. ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ПОЛЕЙ СКОРОСТИ, ТЕМПЕРАТУРЫ И КОНЦЕНТРАЦИЙ ПРИМЕСЕЙ

На первом разрезе (2007) вдоль по губе от ее верхней части до выхода в открытое озеро зарегистрированы плотностной поток у дна, промежуточная струя и приповерхностное течение. На первой вертикали все потоки направлены к открытому озеру (рис. 1а), но лишь плотностное течение распространялось без существенных изменений направления на 13 км. На выходе из залива этот поток отрывался от дна и сливался с промежуточной струей. Скорость ветра не превышала 2.5 м/с при среднем значении 1.6 м/с. В поле температуры (рис. 1б), наблюдается холодный придонный слой с задним фронтом примерно в 1 км от начала разреза. Такое распределение температуры вызывает появление плотностного потока, сформированного, преимущественно, водами открытого озера, поступившими в губу ранее под влиянием циркуляций, вызванных ветром. Концентрация взвеси (рис. 1в) максимальна в этом потоке, из которого выбрасываются облака мутности к поверхности, что приводит к загрязнению вод в деятельном слое озера [1]. В облаках **мутности** отмечено повышение концентрации хлорофилла-а. Этот эффект по-видимому связан с поступлением в облаках питательных веществ (фосфора и др.) из придонного слоя в деятельный слой, которое сопровождается ростом продуктивности фитопланктона.

Вертикальные распределения скорости течения на рис. 2 построены по методике, предложенной в данной

*E-mail: ivair@yandex.ru

работе. Методика базируется на сочетании подходов, разработанных в [2] для внутренних волн сейшевого типа и в [3] для плотностного потока и струи. Как и в [4–6] применяется композиция профилей скорости для трёх мод внутренних сейш. Этим модам соответствуют периоды основных продольных внутренних сейш озера и губы. Для каждой моды распределение скорости по глубине, во времени и вдоль по потоку находилось по аналитическому решению из [2]. Фазовая скорость оценивалась по известной формуле для двухслойной жидкости по заданным толщинам слоев и разности плотностей вод в них [2]. Как следует из профилей U на рис. 2, такое аналитическое представление согласуется с данными измерений.

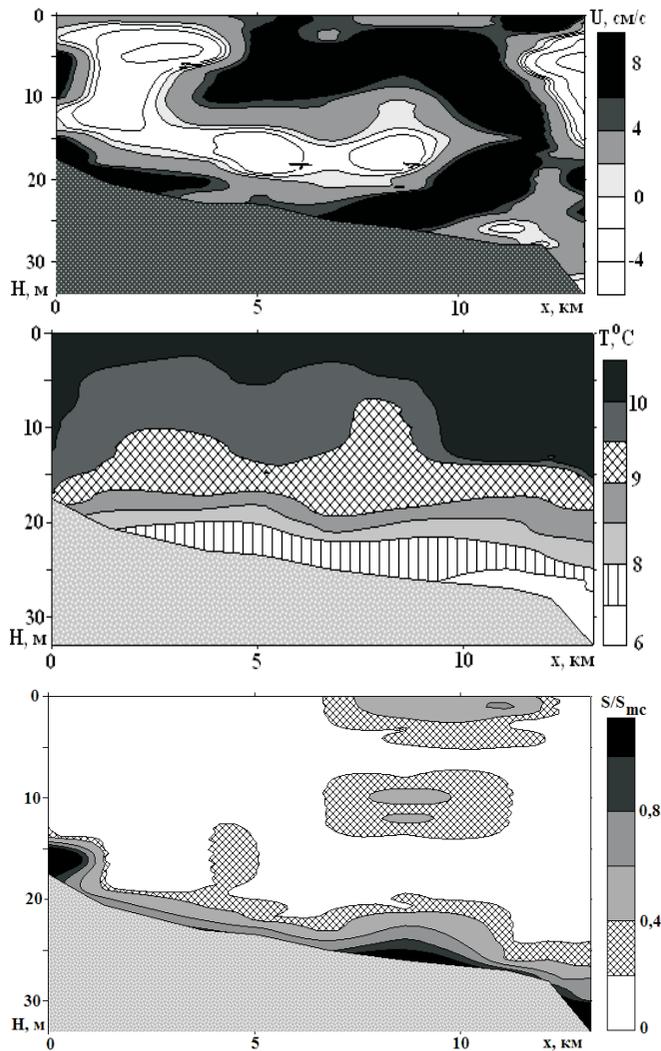


Рис. 1: Распределения скорости течения U , температуры T и мутности воды S/S_{mc} по глубине и вдоль по разрезу в Петрозаводской губе Онежского озера 16.09.2007 г.

На втором разрезе (2015) структура поля скорости также определялась главным образом течениями, вызванными внутренними волнами сейшевой природы, струей в термоклине, дрейфовым течением и плотност-

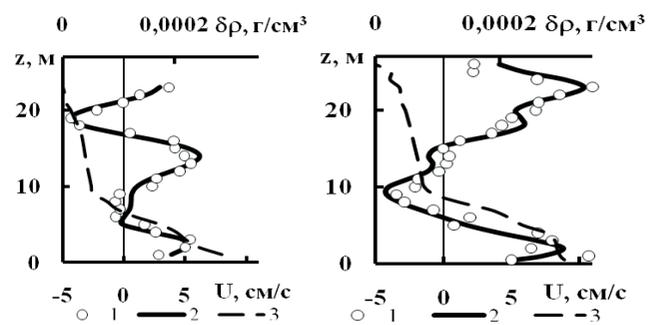


Рис. 2: Профили скорости течения U (1 — измеренные и 2 — теоретические) и 3 — изменения плотности воды с глубиной $\delta\rho$ (дискретность 0.5 м) при а — = 3.7 км, б — 8.7 км при разных знаках скорости струи над придонным плотностным потоком (Петрозаводская губа, 16.09. 2007).

ным потоком. Скорость ветра изменялась от 6 до 8 м/с. Скорость струи на уровне ее максимума составляла 5–20 см/с. Глубина, соответствующая этому максимуму, — 6–20 м. Толщина струи составляла 6–20 м. Число Ричардсона для струи изменялось от 11 в зоне ее формирования до 0.1 (до потери гидродинамической устойчивости) в конце разреза. Фазовая скорость основной моды внутренних волн составляла 0.15–0.2 м/с, высоты волн 1–5 м, период $11,4 \pm 1$ ч.

Концентрация хлорофилла-а убывала почти на порядок по глубине при переходе из эпилимниона в гиполимнион и примерно вдвое вдоль по разрезу в 10 км от его начала (рис. 3). Отдельные всплески удельного содержания хлорофилла-а у дна в первой половине разреза, по-видимому, обусловлены влиянием течений волновой природы переносящих воды из мелководной области в глубинные слои.

Концентрация хлорофилла-а в деятельном слое (в термоклине и над ним) пропорциональна высоте волны в первой половине дня и обратно пропорциональна во второй (рис. 4). Эффект нарастания по-видимому связан с усилением фотосинтеза при волновых подъемах вод в первой половине дня. Обратный эффект в вечерний и ночной периоды обусловлен убыванием и выравниванием концентрации по глубине. Практический интерес для разработки методов прогноза распределения хлорофилла-а представляет обнаруженная линейная зависимость его концентрации от произведения концентрации взвеси на фазовую скорость внутренней волны.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выявлена структура поля скорости при наличии внутренних волн, взаимодействующих со струей в термоклине, дрейфовым течением и плотностным потоком.

Выявлены закономерности влияния внутренних волн на распределение хлорофилла.

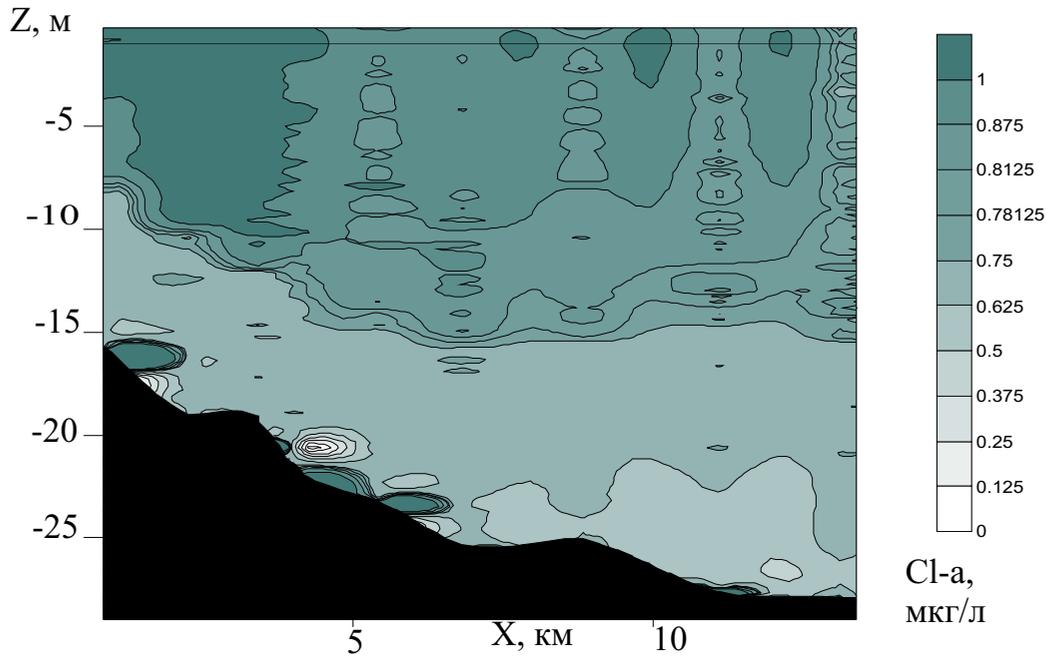


Рис. 3: Распределения концентрации хлорофилла-а по глубине и вдоль по разрезу в Петрозаводской губе Онежского озера 9.07.2015 г.

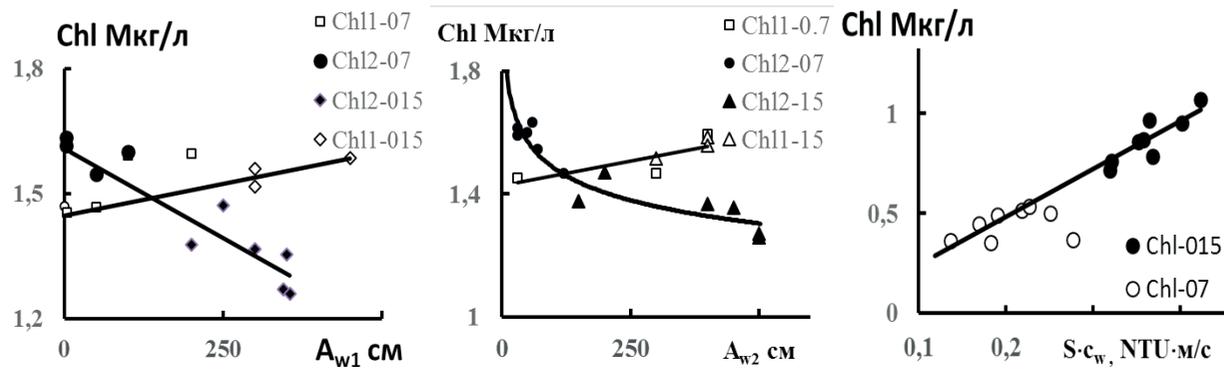


Рис. 4: Зависимости средней по глубине деятельного слоя концентрации хлорофилла-а Chl от высоты внутренней волны: а — A_{w1} с вертикальной длиной, определяющейся полной глубиной (от поверхности до дна), б — A_{w2} с вертикальной длиной, определяющейся глубиной термоклина, в — от произведения концентрации взвеси S (мутности в универсальных международных единицах NTU) на фазовую скорость внутренней волны c_w . Обозначения Chl1, Chl2 на рис. 4а, б соответствуют первой и второй половине дня

Получены зависимости концентрации хлорофилла-а в деятельном слое от высоты внутренней волны.

Обнаружена и представлена аналитически зависимость концентрации хлорофилла от фазовой скорости

внутренней волны и концентрации взвеси.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант 14-05-00822).

[1] Показеев К. В., Самолубов Б. И., Филатов Н. Н. Метеорология и гидрология. С. 83. (2012).
 [2] Прандтль Л. Гидроаэромеханика. Москва-Ижевск, 2000.
 [3] Самолубов Б. И. Плотностные течения и диффузия примесей. М.: Изд. URSS. 2007.
 [4] Dorostkar A., Voegman L. Limnol. Oceanogr. **58**, N 1.

P. 153. (2013).
 [5] Gomes-Giraldo A., Imberger J., Antenucci J. P., Yates P. S. Limnol. Oceanogr. **53**, N 1. 2008. P. 354. (2008).
 [6] Umlauf L., Lemmin U. Limnol. Oceanogr. **50**, N 5. P. 1601. (2005).

The effect of internal wave on the distribution chlorophyll-a in the bay

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

*Department of physics of sea and inland waters, Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University
Moscow 119991, Russia
E-mail: ^aivair@yandex.ru*

The work investigates the mechanisms of influence of internal waves on the transport of chlorophyll-a. Revealed the structure of the velocity field in the presence of internal waves interacting with the jet at the thermocline, the drift current and density flow. The regularities of influence of internal waves on the distribution of chlorophyll-a. The resulting dependence of the concentration of chlorophyll-a in an active layer of the height of the internal wave. Discovered and are presented analytically the dependence of the concentration of chlorophyll-a from the phase velocity of the internal wave and the concentration of suspended solids.

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

Keywords: internal wave, density flows, chlorophyll-a, the concentration of suspended solids.

Сведения об авторах

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