

## ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ НАЗЕМНОЙ МИКРОВОЛНОВОЙ ЛИНИИ ПЕРЕДАЧИ ЭНЕРГИИ

В.Л. Саввин, Ю.А. Пирогов, Г.М. Казарян, Д.А. Михеев

*Физический факультет МГУ имени М.В.Ломоносова*

Проведен анализ современного состояния исследований в развивающейся области СВЧ энергетики – микроволновой передачи энергии. Обсуждаются проблемы снижения уровня фонового излучения и переизлучения кратных гармоник рабочей частоты. Анализируются перспективы наземной микроволновой передачи энергии.

### 1. Введение

Идея передачи энергии с помощью электромагнитного излучения была впервые высказана выдающимся электротехником Николой Тесла в начале XX века. Развитие радиолокации и интенсивные работы по освоению дециметровых и сантиметровых диапазонов микроволн заложили основу для широкого использования СВЧ энергетики и вызвали растущий интерес к беспроводной передаче энергии с помощью направленного микроволнового излучения [1-2]. Микроволновый диапазон (2,4-5,8 ГГц) дает возможность существенно уменьшить размеры передающих и приемных антенн и отличается высоким уровнем эффективности устройств генерации и преобразования энергии электромагнитного излучения.

Идея широкомасштабной микроволновой передачи энергии, вырабатываемой космическими солнечными электростанциями, наземным потребителям принадлежит П. Глезеру [3] и интенсивно прорабатывалась в 70-х годах прошедшего столетия. Проблемам солнечных космических электростанций и микроволновой передачи энергии посвящен ряд публикаций в отечественной научной печати [4,5]. В последние годы ряд перспективных проектов микроволновой передачи энергии наземного и космического базирования, рассчитанных на меньшую мощность, разрабатываются в США, Японии и ЕС.

Целью настоящей публикации является обсуждение экологических и физических проблем микроволновой передачи энергии, а также перспектив развития микроволновых систем передачи энергии наземного назначения.

### 2. Обратное преобразование микроволн в постоянный ток

Наиболее распространенным типом преобразователя микроволн в постоянный электрический ток является ректенна с полупроводниковым диодом Шоттки (см. рис.1). Наивысшее значение КПД преобразования ректенны было достигнуто в лабораторных условиях – 91,4% при входной мощности микроволн до 10 Вт на единичном экземпляре диода Шоттки (см. рис. 2) для рабочей частоты 2,45 ГГц [6]. На частоте 5,8 ГГц КПД преобразования ректенн с диодами Шоттки достигает 82% при входной мощности 50 мВт [7].

Плотность мощности падающего излучения может заметно изменяться на апертуре приемного комплекса микроволновой линии передачи (до 10 дБ). Для крупномасштабных проектов солнечной энергетики плотность мощности уменьшается от  $230 \text{ Вт/м}^2$  в центре приемного комплекса до  $23 \text{ Вт/м}^2$  на краю ректенны (для проекта NASA). При оптимальных значениях плотности диполей ( $150\text{-}200 \text{ диполей/м}^2$ ) нагрузка на один диод в центре приемной ректенны будет близка к номинальной мощности диодов Шоттки (1-2 Вт), при которой реализуется максимальный КПД преобразования микроволн в постоянный ток.

Однако уменьшение уровня входной мощности приводит к росту потерь на диоде и значительному снижению КПД преобразования. Так при значениях  $P_{\text{вх}}$  100 мВт и ниже КПД преобразования не превышает 60% (см. рис. 2). Таким образом, использование однотипных ректенн на всей площади приемного комплекса приведет к заметному уменьшению КПД всей системы.

Наиболее рациональным решением для поддержания уровня входной мощности ректенны, близкого к номинальной мощности диода, может быть использование ректенн с многодипольными антеннами. В таких ректеннах мощность микроволн, принятых каждым диполем, суммируется и направляется на один общий диод. Суммирование мощности даст возможность реализовать оптимальный режим работы диода Шоттки с высоким КПД преобразования.

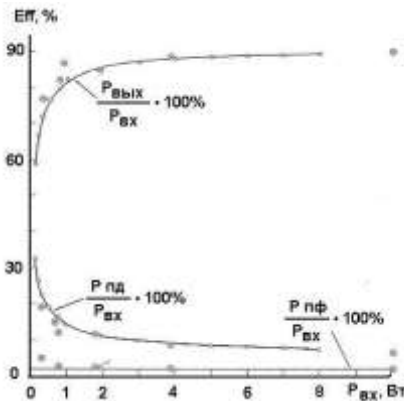


Рис. 2. Зависимость КПД ректенны ( $P_{\text{вых}}/P_{\text{вх}}$ ), потерь на диоде ( $P_{\text{нд}}/P_{\text{вх}}$ ) и потерь в фильтре от уровня входной мощности ( $P_{\text{вх}}$ ) для экспериментального образца ректенны с диодом Шоттки

Альтернативным типом устройства для обратного преобразования микроволн в постоянный ток могут быть различные вакуумные приборы, работающие в обращенном режиме (клистроны, магне-

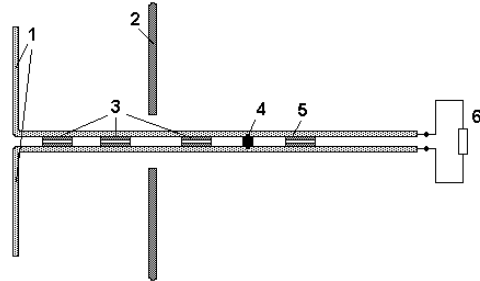


Рис. 1. Ректенный элемент с диодом Шоттки, 1- полуволновой диполь, 2- отражающая поверхность, 3- фильтр нижних частот, 4- диод Шоттки, 5- выходной фильтр, 6- нагрузка.

троны и др.). Следует особо выделить циклотронный преобразователь с эффективностью до 83%, входной мощностью микроволн 10 кВт на частоте 2,45 ГГц и выходным напряжением 15-20 кВ [8].

Мощные вакуумные преобразователи с высоким выходным напряжением легче могут быть интегрированы в существующие энергосистемы по сравнению с низковольтными ректеннами, которые придется коммутировать в большое число последовательно- параллельных цепочек.

#### 4. Экологические проблемы микроволновой передачи

Среди основных требований к микроволновой передаче энергии следует выделить достижение высокой эффективности при одновременном обеспечении безопасности, экологической чистоты и электромагнитной совместимости системы. Уровень фонового излучения и боковых лепестков передающих антенных систем на основной частоте должны соответствовать требованиям стандартов безопасности. Особое внимание следует уделять проблеме переизлучения микроволн приемной системой с полупроводниковыми преобразователями (ректеннами) на кратных гармониках рабочей частоты.

Эксперименты по применению ректенн с полуволновыми диполями показали достаточно высокую эффективность – до 80-90%. Однако дипольная антенна способна переизлучать значительную долю высших кратных гармоник частоты  $f_0$  принимаемого микроволнового излучения, которые возникают при его выпрямлении полупроводниковым диодом. Относительный уровень мощности высших кратных гармоник может достигать нескольких процентов (2-5% на удвоенной частоте) и уменьшается с номером гармоники. Однако при высоком уровне передаваемой мощности и без принятия специальных мер по подавлению высших гармоник приемные наземные системы микроволновых линий передачи энергии могут создавать серьезные помехи существующим системам передачи информации и радиосвязи. С этой целью в конструкцию полуволнового ректенного элемента вводят фильтры низких частот, предназначенные для уменьшения уровня высших кратных гармоник рабочей частоты, излучаемых ректенной (см. рис. 1).

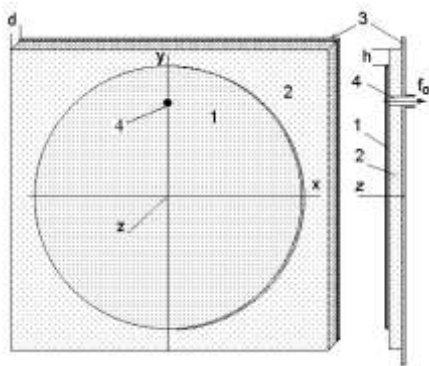


Рис. 3. Дисктовая микрополосковая антенна (вид спереди и сбоку), 1- металлический диск, 2- диэлектрическая подложка, 3- металлический отражатель, 4- коаксиальный вывод.

Помимо полуволновых диполей в ректенных элементах предложено использовать дисковые микрополосковые антенны. Микрополосковые антенны имеют ряд привлекательных свойств, таких как малый профильный размер, малый вес, компактная и простая конструкция, сравнительная легкость интеграции с твердотельными устройствами, возможность использования техники фотолитографии для промышленного изготовления и

др. Применение круглых дисковых микрополосковых антенн дает также дополнительные возможности решения проблемы переизлучения высших кратных гармоник рабочей частоты.

Дисковая микрополосковая антенна (ДМА) представляет собой двухслойную композицию круглой формы из тонкого металлического диска и диэлектрической подложки, нанесенную на плоскую металлическую поверхность (см. рис. 3).

Радиус диска выбирается из условия резонанса для основной моды  $TM_{11}$  на рабочей частоте. При этом резонансные частоты круглой ДМА для других мод не совпадают с частотами кратных гармоник рабочей частоты, возникающих в процессе выпрямления на диоде. Поэтому интенсивность переизлучения на частотах кратных гармоник у ректенн с ДМА будет существенно ниже, чем у ректенн с полуволновыми диполями. При достаточно узких резонансах подавление кратных гармоник может быть настолько эффективным, что ректенный элемент с ДМА может и не содержать дополнительных фильтров низкой частоты.

### 5. Проект наземной системы микроволновой передачи энергии

Среди разнообразных предложений по использованию микроволновой передачи энергии следует выделить проект, разрабатывавшийся в последние годы с участием сотрудников МГУ. Это – проект энергоснабжения населенного пункта, расположенного в труднодоступном районе острова Реюньон (Франция). Этот проект предполагает снабжение электроэнергией небольшой деревни, расположенной в глубоком кратере потухшего вулкана, где монтаж обычных силовых кабелей затруднен из-за сложности рельефа и высокой стоимости работ [9].

Крайне важно, чтобы уровень фонового излучения за пределами приемно-преобразующего комплекса наземной микроволновой линии передачи не превышал экологически безопасного уровня. По западным стандартам микроволновое излучение считается безопасным в течение рабочего дня при плотности мощности менее  $100 \text{ Вт/м}^2$ . Этот уровень фонового излучения может быть достигнут путем реализации оптимальных амплитудно-фазовых распределений поля на поверхности передающей антенны.

Передающую антенну наиболее рационально заменить фазированной решеткой стандартных излучателей в виде  $N$  концентрических колец. Амплитудное распределение будет иметь вид:

$$E_A(r) = \begin{cases} E_n, & r_{n-1} < r < r_n, \quad n = 1, 2, \dots, N, \\ 0, & r > r_N = R_1, \end{cases} \quad (1)$$

где  $E_n$  и  $r_n$  – амплитуда и радиус  $n$ -ой ступеньки;  $N$  – число ступенек дискретного амплитудного распределения;  $E_{N+1} = 0$ ;  $r_0 = 0$ . Тогда распределение поля в плоскости приема принимает вид:

$$E_R(r) = E_{max} \frac{k R_1^2}{2 D} \sum_{n=1}^N \Delta \varepsilon_n x_n^2 A_J(2 \tau x_n r / R_2), \quad (2)$$

где  $E_{max} = \max\{E_n\}$ ;  $\Delta\varepsilon_n = \varepsilon_n - \varepsilon_{n-1}$ ;  $\varepsilon_n = E_n / E_{max}$  и  $x_n = r_n / R_1$  - относительные амплитуда и радиус n-ой ступеньки, где  $A_n(z)$  - лямбда-функция первого рода 1-го порядка.

КПД микроволновой передачи энергии зависит от величины волнового параметра  $\tau = \pi R_1 R_2 (\lambda D)^{-1}$ , где  $\lambda$  - длина волны, на которой ведется передача энергии,  $R_1$  и  $R_2$  - радиусы передающей и приемной антенны,  $D$  - расстояние между антеннами.

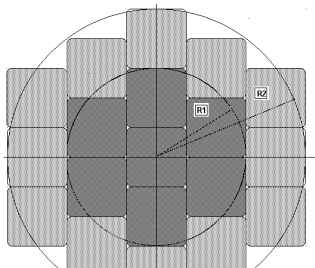


Рис. 4. Передающая антенна из 19 квадратных модулей с двухступенчатым амплитудным распределением

Методом численного моделирования найдено оптимизированное двухступенчатое амплитудное распределение на передающей антенне, при котором линия имеет высокий КПД и низкий уровень фона. Мощность излучения передающей антенны составляла около 14 кВт при фиксированном расстоянии между антеннами  $D=700$ м и радиусе передающей антенны  $R_1=2,4$ м.

Основные результаты проведенных расчетов для анализируемой линии передачи представлены в таблице 1. Как видно, оптимизированное двухступенчатое распределение характеризуется высоким КПД и низким уровнем фонового излучения, незначительно уступающим варианту с оптимальным Гауссовым распределением, и выгодно отличается от него простотой конструкции

передающей антенны, которую можно представить в виде системы однотипных излучающих блоков (см. рис. 4).

Таблица 1. Характеристики микроволновой линии передачи энергии

Вид амплитудного распределения	Равномерное	Гауссово 10-ступенчатое	Оптимизир. 2-ступенчатое
КПД передачи	81.25 %	88.22 %	86.5 %
Уровень 1-го бокового лепестка	0.29 Вт/м <sup>2</sup> (-17.5дБ)	0.07 Вт/м <sup>2</sup> (-23.3дБ)	0.11 Вт/м <sup>2</sup> (-21.2дБ)
Радиус 1-го бокового лепестка	29.3 м	31.9 м	31.1 м

Как видно из табл. 1 фоновое излучение за пределами зоны центрального лепестка для проанализированного варианта наземной микроволновой линии передачи может быть доведено до уровня, соответствующего требованиям стандарта РФ (0.1 Вт/м<sup>2</sup>). С точки зрения западных стандартов микроволновая линия передачи энергии такого масштаба является абсолютно безопасной даже в области центрального лепестка.

### 6. Заключение

Выбор оптимальных параметров наземной микроволновой линии передачи энергии (уровня передаваемой мощности, профиля поля на передающей антенне, параметра передачи  $\tau$  и др.) даст возможность обеспечить эффективную (с КПД 70% и более) и экологически безопасную передачу энергии направленным микроволновым излучением.

При низких значениях плотности потока микроволнового излучения и его значительной неоднородности в плоскости приема наиболее рационально использовать ректенны с многодипольными антеннами, обеспечивающие оптимальный уровень входной мощности на диоде Шоттки.

Применение ректенн с дисковой микрополосковой антенной (ДМА) снижает опасность переизлучения кратных гармоник рабочей частоты, возникающих на полупроводниковом диоде в процессе выпрямления, из-за несовпадения их частот с резонансными частотами круглой ДМА.

### Литература

1. Mankins J. Space-Based Solar Power. Inexhaustible Energy from Orbit //Ad. Astra, №1, 2008
2. Диденко А. Н. СВЧ-энергетика.- М.: Наука, 2003.
3. Glaser P.E. Power from the Sun: its future//Science, 162, p.857, 1968.
4. Ванке В.А., Лопухин В.М., Саввин В.Л. Проблемы солнечных космических электростанций//УФН, т.104, №4, с.879, 1977.
5. Грихилес В.А., Орлов П.П., Попов Л.Б. Солнечная космическая энергетика.- М.: Наука, 1984.
6. Brown W. History of Power Transmission by Radio Waves//IEEE Trans., v. MTT-32, No.9, 1984.
7. McSpadden J., Fan L., Chang K. High Conversion Efficiency 5,8 GHz Rectenna//IEEE MTT Digest, p.547, 1997.
8. Vanke V., Savvin V. Cyclotron-Wave Converter For SPS Energy Transmission System//Proc. SPS-91, Paris, p.515, 1991.
9. Celeste A., Jeanty P., Pignolet G. Case study in Reunion Island //ACTA Astronautica, № 2004-54, p. 253, 2004.

РОЛЬ ВОЛНОВЫХ ПОТОКОВ В СИСТЕМЕ СТРАТИФИЦИРОВАННЫХ  
ТЕЧЕНИЙ

Б.И. Самолюбов, Д.С. Шлычков

*Физический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова*

Выполнен анализ систем стратифицированных течений с волновыми потоками на двух полигонах: Ивановском водохранилище и Волховской губе Ладожского озера. Выявлена связь волновой и струйной компонент скорости течений. Предложен механизм их взаимодействия. Получены выражения для траекторий струй в зависимости от продольного распределения средней по глубине температуры и рельефа дна. Разработана и проверена математическая модель течений.

## Введение

Изучение стратифицированных потоков, которые, взаимодействуя между собой, образуют системы течений, в последнее время ведется с нарастающей интенсивностью. Это обусловлено необходимостью учета систем течений при разработке методов экологических прогнозов распространения примесей в природных водоемах и в программах по использованию энергетических и сырьевых ресурсов морей, озер и водохранилищ [5, 6, 7, 9, 12]. Несмотря на активные исследования, данные структурных гидрофизических измерений параметров систем градиентных стратифицированных течений в высокопроточных бассейнах, в том числе в проливах и долинных водохранилищах, уникальны. Результаты исследований эволюции такого течения в Ивановском водохранилище приведены в данной статье. По параметрам течения интересна аналогия с морскими проливами, в которых могут существовать градиентные стратифицированные потоки, подверженные влиянию внутренних волн [11]. Наряду с течениями Ивановского водохранилища рассматривается система течений с волновыми потоками в Волховской губе Ладожского озера. Исследования течений в подобных заливах крупных озер и морей дают возможность получения данных о процессах обмена, в значительной степени определяющих распределения параметров состава воды. По результатам измерений на выявляются закономерности развития течений и проверяется предлагаемая модель, учитывающая влияние волновых потоков на стратифицированные струи. Объекты и методика исследований.

Обсуждаемые результаты получены экспедициями физического факультета МГУ при изучении структуры и динамики стратифицированных течений в Ивановском водохранилище на р. Волга в июле 1999 г и в Волховской губе Ладожского озера в августе 2011 г.

Стратифицированное течение в Ивановском водохранилище характеризуется протяженностью до 70 км при толщине до 18 м со скоростью – 6–15 см/с. Длина водохранилища по фарватеру – 100 км, глубина – до 20 м, максимальная ширина – 4 км. Средний уклон дна –  $\alpha = 4 \cdot 10^{-4}$ . Коэффициент водообмена – 8 год<sup>-1</sup>. Плотностное расслоение вод обеспечивалось

преимущественно термической стратификацией [6]. Исследования проводились на разрезах по всей области действия течения и в сериях зондирований на срочных станциях. В ходе измерений одновременно регистрировались детальные профили скорости потока, температуры воды, концентрации взвеси, а также скорость ветра на высоте 2 м над поверхностью воды.

Ладожское озеро ( Ленинградская область, Карелия) - крупнейшее пресноводное в Европе, а Волховская губа – самая большая эстуарная бухта этого озера. Важнейшее свойство губы – ее открытость в сторону озера и мощная техногенная нагрузка за счет промышленных стоков [2]. В Волховскую губу впадают один из самых мощных притоков озера - р. Волхов. Период условного водообмена Волховской губы – 4,5 месяца. Динамика и структура циркуляционных, струйных, плотностных течений и апвеллинга изучалась в ходе выполнения плановых съемок, разрезов и срочных станций [1, 8].

В исследованиях на Иваньковском водохранилище применялся специально сконструированный комплекс аппаратуры для градиентных измерений в режимах донных постановок и непрерывного зондирования [4, 5]. В комплекс входили погружаемые системы, оснащенные роторными измерителями скорости течения  $U$  для её синхронной регистрации одновременно на 4-6 уровнях, полупроводниковыми датчиками температуры  $T$  и фотоэлектрическими прозрачномерами, по показаниям которых (на основании калибровки) определялась концентрация взвеси  $C_s$ . Калибровки и интеркалибровки датчиков проводились непосредственно в изучаемых течениях. Погрешности измерений  $C_s$  и  $U$  в характерных для данного полигона (в период исследований) диапазонах изменения этих параметров составляли  $2 \cdot 10^{-6}$  г/см<sup>3</sup> при  $C_s = (6 - 30) \cdot 10^{-6}$  г/см<sup>3</sup>,  $0,02^\circ\text{C}$  при  $1 \text{ см/с}$  при  $U$  до  $20 \text{ см/с}$ .

В Волховской губе регистрировались профили вектора скорости течения  $U$ , температуры  $T$ , электропроводности воды  $S$  и концентрации взвеси  $C_s$ . Применялся зонд RCM 9 (Aanderaa) с доплеровским регистратором скорости, датчиками  $T$ ,  $C_s$  и  $S$ . Точности измерений  $U$ ,  $T$ ,  $C_s$  и  $S$ :  $0,5 \text{ см/с}$ ,  $0,02^\circ\text{C}$ ,  $0,02 \text{ мСм/см}$ , и  $0,4 \text{ NTU}$ . При  $C_s < 10 \text{ NTU}$  допустим анализ распределения  $C_s$  в безразмерном виде  $C_s / C_{\text{mc}}$  с по-грешностью 1%, где  $C_{\text{mc}}$  - максимум  $C_s$  в данной серии зондирований.

Структуры течений и распределений плотности воды

Как следует из распределений скорости течения и температуры воды рис. 1, в Иваньковском водохранилище в период исследований существовало струйное течение, которое имело квазиволновую структуру. Верхняя и нижняя границы этого потока колеблются в противофазе. Поле температуры также имеет квазиволновую структуру с колебаниями изотерм в противофазе с верхней границей течения.

Природа наблюдающейся волны может определяться, как классическими свободно развивающимися внутренними сейшами, так и инерционными эффектами. Такой вывод следует из оценки радиуса Россби  $a_1 = c_p / f$ , который составляет в данном случае 550 м при средней на разрезе ширине водоема  $Y$ , равной 3 км. Здесь  $c_p = N_s H_s / \pi$  - фазовая скорость 1-ой моды внутренней волны;  $N_s$  - частота плавучести, средняя в столбе жидкости с высотой  $H_s$ , равной средней глубине водоема;  $f$  – инерционная частота. Для изучаемого бассейна в период измерений значения  $c_p$ ,



$N_s$ ,  $N_s$  и  $f$  были равны  $5,5 \text{ см/с}$ ,  $0,03 \text{ с}^{-1}$ ,  $5 \text{ м}$  и  $1,6 \cdot 10^{-4} \text{ с}^{-1}$ . При  $a_1 \ll Y$ , наряду с простыми внутренними сейшами, могут существовать волны Кельвина и Пуанкаре.

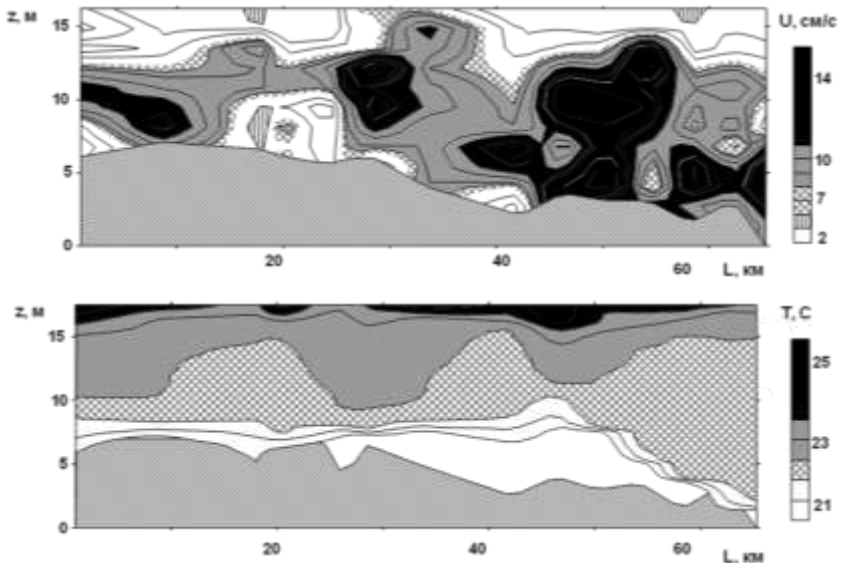


Рис.1. Распределения полей скорости  $U$  и температуры воды  $T$  по длине и высоте над уровнем дна на продольно-осевом разрезе водохранилища (Иваньковское водохранилище, 13,14.07.1999). Косой штриховкой выделен профиль дна на разрезе.

В таблице 1 приведены оценки периодов низших мод указанных волн  $t_w$  и соответствующие выражения  $t_w$  [10].

По представленным в таблице периодам  $t_w$  оцениваются длины волн  $\lambda_x = t_w c_p$ . Значения  $\lambda_x$  для волн Кельвина и Пуанкаре составляют 18 и 3 км соответственно. Длины волн Пуанкаре существенно меньше величин  $\lambda_x$ , зарегистрированных на разрезе по ходу изолиний  $T$ ,  $S$ . Таким образом, наблюдающиеся колебания изотерм на рис. 1 могут быть обусловлены развитием внутренних волн Кельвина (1-ой моды) и классических внутренних сейш ( $L_x$  для 2-ой моды на квазипрямолинейных участках водоема). С меньшей вероятностью они могут соответствовать проявлениям старших мод сейш, периоды которых определяются полной длиной водоема. Преобразования структур термогидродинамических полей по глубине и во времени, выявленные по данным серии зондирований данного потока на срочной станции в работе [5], свидетельствуют о возд

Таблица 1

№	Тип внутренней волны	Расчетная формула для периода	$t_w$ , ч
1	Волна Кельвина	$2\pi Y / a_1 f$	95
2	Волна Пуанкаре	$2\pi / f(1 + \pi^2 a_1^2 / Y^2)^{1/2}$	15
3	Внутренняя сейша в сезонном и суточном термоклинах	$2L_x / \left( g \Delta \rho_T (H - h_1) h_1 / \rho H \right)^{1/2}$	53 37
4	Внутренняя сейша, распространяющаяся по всей глубине	$2L_x / \left( g \overline{\Delta \rho_H} H \right)^{1/2}$	33

В таблице  $L_x \cong 15$  км – длина квази-прямолинейного отрезка пути течения между поворотами траектории потока, найденная для данного разреза, как средняя по четырем участкам.

ействии внутренней волны на течение по всей глубине бассейна.

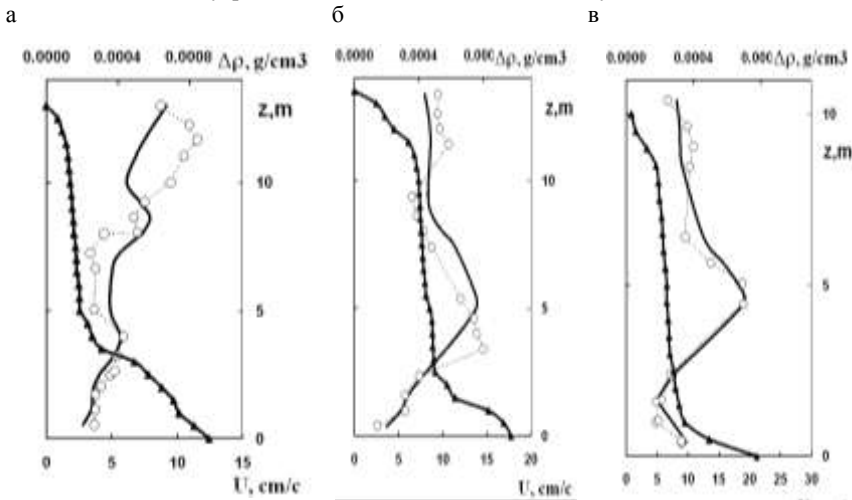


Рис.2. Профили скорости  $U$  и разности плотностей  $\Delta\rho$  со значениями фактора формы распределения плотности  $\Phi$ , а -  $\Phi=0,3$ ; б -  $\Phi=0,75$ ; в -  $\Phi=0,64$ .

Из приведенных на рис. 2 примеров профилей скорости течений с ярко выраженными струями, но без обычных сопутствующих четких ступенчатых структур на профилях плотности воды, следует, вывод об отсутствии традиционно наблюдающейся локализации струи в слоях между максимумами вертикального

градиента плотности. При однородном распределении  $\delta\rho(z)$  струя должна размываться, чего не наблюдается на некоторых вертикалях. Здесь  $\delta\rho$  – изменение плотности воды  $\rho$  с глубиной относительно приповерхностного значения  $\rho$ .

Представленные графики с различной структурой вертикальных распределений скорости и плотности воды отличаются также значением фактора формы профиля плотности. Фактор формы  $\Phi_\rho$  – это отношение величины  $\delta\rho$ , средней по всей глубине, исключая придонный поток, к максимальному значению  $\delta\rho$ , которое соответствует верхней границе придонного потока  $\Phi_\rho = \delta\rho|_{z>z_w} / \delta\rho_{\max}$ . Фактор формы – величина, характеризующая вертикальную неоднородность поля плотности. Чем выше однородность, тем больше значение фактора формы.

На первом графике (рис. 2) видно относительно однородное распределение плотности, которому соответствует сравнительно малое значение фактора формы 0,3 и отсутствие какой-либо струи. На втором графике «ступенька» в распределении поля плотности выражена достаточно ярко, фактор формы достигает достаточно большого значения 0,75 и четко прослеживается струя. Эти явления неплохо описываются механизмом, изложенным ранее. А вот на третьем графике наблюдается совсем другая картина. «Ступенька» поля плотности выражена не так ярко, значение фактора формы среднее – 0,64, а струя по своему значению значительно превосходит струю на второй вертикали. Объяснению механизма этого явления и посвящена данная статья. Распределение скорости было представлено в виде осредненной и волновой составляющих [1].

Волновая составляющая содержит первую и вторую моды порожденные внутренней сейшей (см. также раздел Математическая модель течения). После расчета волновых составляющих скорости, находились их средние по глубине

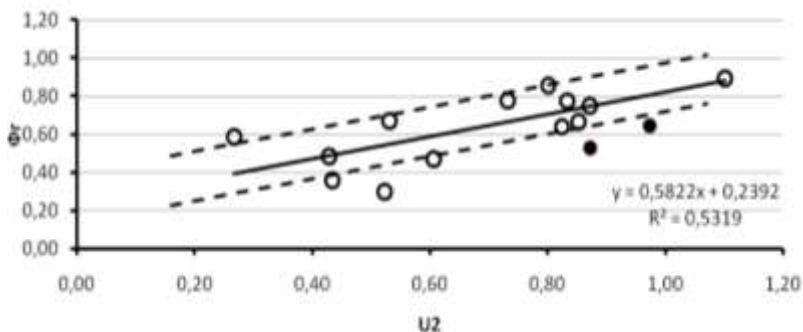


Рис.3 Зависимость фактора формы профиля плотности от нормированной волновой составляющей скорости. Пунктир – границы стандартного отклонения.

значения и проводился анализ этих величин с параметрами течений и распределения плотности воды.

Зависимость значения фактора формы от волновой составляющей скорости, нормированной на ее величину, среднюю по длине течения позволяет сделать вывод о положительной корреляции этих величин (рис. 3). Фактор формы линейно (в рамках показанного пунктиром стандартного отклонения) возрастает при увеличении волновой скорости, то есть волновой поток можно рассматривать

как причину деформации распределения поля плотности.

Связи скорости струйного течения со скоростями волнового потока для первой и второй мод оказались существенно разными (рис.4, 5). Причем указанная зависимость для второй моды (рис. 5) явно неоднозначна.

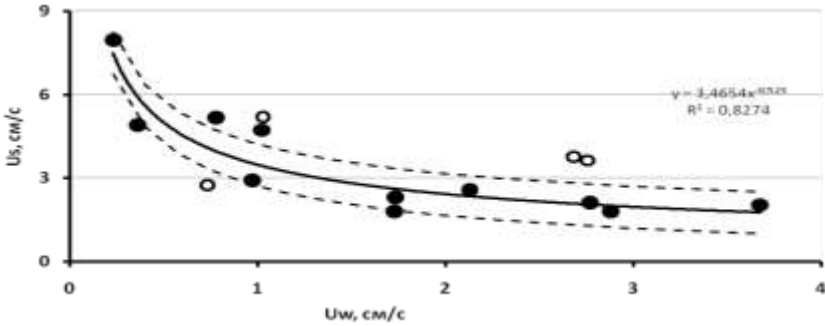


Рис.4. Зависимость струйной компоненты скорости от смещенной волновой (1-я мода). Пунктир – границы стандартного отклонения.

Для первой моды скорость струи обратно пропорциональна волновой скорости. На основании такой зависимости можно заключить, что существует энергопередача от волнового потока к струе.

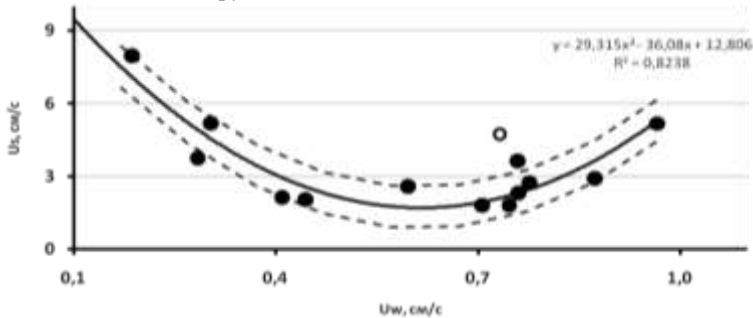


Рис.5. Зависимость струйной компоненты скорости от смещенной волновой (2-я мода). Пунктир – границы стандартного отклонения.

В этом случае скорость струи увеличивается за счет уменьшения энергии волнового движения. Для второй моды аналогичная зависимость также наблюдается, но только при относительно небольших значениях волновой скорости. При достижении значения скорости волнового потока 0,5-0,6 см/с, спадающая ветвь кривой на рис. 5 сменяется восходящей, то есть и волновой поток и струя одновременно ускоряются за счет каких-то третьих факторов.

Влияние волновых потоков на приповерхностное течение и прибрежный апвеллинг проводилось в Волховской губе Ладожского озера, где измерения выполнялись в августе 2011 г [1, 8]. Как следует из полученной зависимости скоростей приповерхностного течения и придонного потока от модуля первой моды волновой скорости, воздействие волнового потока на апвеллинг носит более сложный характер, чем на приповерхностное течение (рис.6).

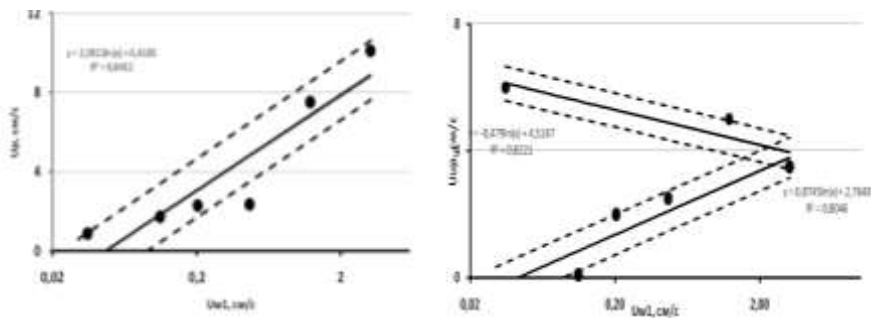


Рис.6. Зависимости скоростей приповерхностного течения и апвеллинга от волнового потока в Волховской губе оз. Ладжского (август, 2011). Пунктир – границы стандартного отклонения.

Приповерхностное течение усиливается одновременно с волновым потоком. Таким образом, существует передача энергии от волнового потока к приповерхностному течению, но потери волнового потока меньше внешнего притока энергии, так как сам он при этом тоже усиливается. Для придонного потока (апвеллинга) аналогичная ситуация наблюдается лишь при скоростях волнового потока, больших скорости апвеллинга. При усилении придонного потока зависимость сменяется на обратную, так как энергия может передаваться лишь от потоков с большей энергией.

На основе обнаруженных связей параметров струи и волнового потока был предложен механизм их взаимодействия за счет преобразования распределения поля плотности воды. Механизм включает в себя следующие этапы.

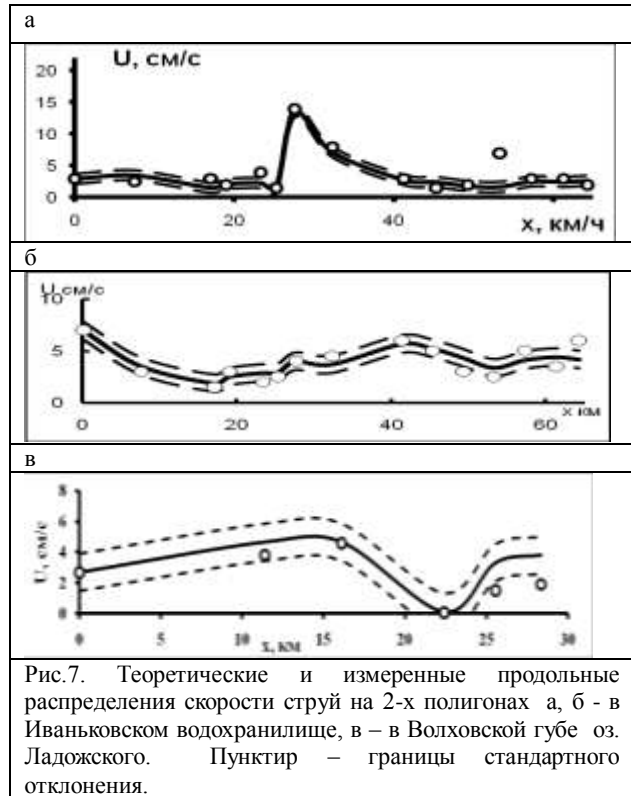
1. Волновое течение деформирует профиль плотности воды, образуя квазиступенчатую структуру.
2. В слое между максимумами градиента плотности появляется струя, которая движется под действием тангенциальной составляющей силы тяжести и градиента давления.
3. Развитие струи ведет к снижению устойчивости ее границ из-за сглаживания плотностных неоднородностей.
4. Волновое течение вновь деформирует профиль плотности воды, образуя квазиступенчатую структуру, и процесс циклически повторяется.

Математическая модель течения

Для описания рассмотренных процессов была предложена математическая модель на основе системы уравнений Рейнольдса для стратифицированного потока.

$$\begin{cases} U \frac{\partial U}{\partial x} + W \frac{\partial U}{\partial z} = \frac{\Delta \rho}{\rho} g i_x - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \tau}{\partial z} \\ 0 = -\Delta \rho g - \frac{\partial P}{\partial z} \\ \frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial W}{\partial z} = 0 \end{cases}$$

Первые два уравнения - проекции уравнения Рейнольдса на оси X, Z. Третье - уравнение неразрывности. Здесь  $\rho$ , U, W - средние значения плотности воды, продольной и вертикальной компонент скорости; ось x направлена по течению, а ордината z - к открытой поверхности;  $\Delta \rho$  - разность плотностей воды в потоке и над его верхней границей, g - ускорение свободного падения,  $i_x$  - уклон дна для придонного потока или осевой линии течения для струи; p - давление;  $\tau$  - турбулентное напряжение.



Из этой системы, после ее интегрирования от нижней до верхней границы течения, получается одномерное уравнение динамики, которое дополняется выражениями ключевых параметров модели. В итоге получается следующая система уравнений.

$$\partial_x \bar{U}^2 = g \frac{2\Delta\rho}{\rho} \cdot i_s - \alpha_p \frac{2g}{z_u \rho} \partial_x \left( \frac{\Delta\rho \cdot z_u^2}{2} \right) - \alpha_\eta \partial_x \eta + \alpha_w \partial_x U_w^2 + \frac{C_D \bar{U}^2}{z_u}$$

$$\Delta z_j = \Delta z_{j0} + 0.3 \cdot \int_0^x i_{sj} dx$$

$$(z_{mj})_1 = 5 \cdot (z_{mj})_0 \left( 1, 2 \left( \bar{T}_H / \bar{T}_{H0} \right) - 1 \right)$$

$$(z_{mj})_2 = 0.67 \cdot (z_{mj})_0 \left( 1 - 0.5 \left( \bar{T}_H / \bar{T}_{H0} \right) \right) (1 + 2 \cdot (H / H_0))$$

$$C_D = 2,5 \cdot 10^{-3} + 3 \cdot 10^{-4} Ri_u$$

Градиент давления в уравнении динамики представлен несколькими слагаемыми, связанными с различными факторами: уклоном дна, неоднородностью поля плотности, уклоном поверхности воды, изменением скорости волнового потока  $\alpha_w \partial_x U_w^2$ . Дополнительные выражения получены для траекторий струй  $(z_{mj})_1$ ,  $(z_{mj})_2$ . Здесь  $(z_{mj})_0$  – ордината максимума струи на первой вертикали разреза,  $T_{H0}$  и  $T_H(x)$  – средние по глубине температуры на первой и текущей вертикалях. Для волновой компоненты скорости использовалось выражение, полученное в работе [3], а для струи – решение из [4].

$$U(z)_w = A \exp\left(\frac{\gamma}{2} z\right) \cdot \cos k_x (x + x_0) \cdot \left( \frac{\gamma}{2k_x} \cos k_z z - \frac{k_z}{k_x} \sin k_z z \right) \cdot (-\omega \sin(\omega t + \varphi_0))$$

$$U_j(z) = U_{mj} f_u(\xi),$$

Обозначения более подробно поясняются в [1, 8]. Здесь  $f_u(\xi) = 1 - 3\xi^2 + 2\xi^3$ , где  $\xi = |z - z_m| / \Delta z_m$  – безразмерная ордината для слоя смешения.

Входными параметрами модели являются уклон дна  $i_s$ , уклон поверхности воды  $\partial_x \eta$ , распределение скорости на первом разрезе  $U_0(z) \equiv U(0, z)$  и распределение плотности во всем водоеме  $\rho(x, z)$ . На выходе получается распределение скорости на разрезе  $U(x, z)$ .

Проверка математической модели

Построенная математическая модель применена к данным, полученным на Иваньковском водохранилище и Ладожском озере. Теоретические продольные распределения средней скорости сопоставлены с измеренными на рис. 7. Как видно из графиков, теоретические расчеты удовлетворительно согласуются с экспериментальными данными. Разработанная математическая модель (по сравнению с предшествующими [5]) повышает точность расчета скорости струи в среднем на 20%, а на некоторых участках, например, на первой половине разреза в Волховской губе Ладожского озера, качество описания улучшается в два раза.

Из приведенной зависимости ординаты максимума второй струи в

Иваньковском водохранилище от волновой составляющей скорости (рис. 8) следует, что струя приподнимается при увеличении модуля скорости волнового потока, то есть волновой поток не только деформирует распределение плотности, но и изменяет траекторию струи, что также влияет на продольное распределение ее скорости, и это воздействие сильнее, чем влияние волнового градиента давления.

Основные результаты

1. Выявлено взаимодействие волновых потоков и струй и предложен механизм этого процесса, основанный на возникновении градиента давления под действием волнового потока.
2. Обнаружено, что волной поток оказывает сильное влияние на струи, изменяя их траектории с ростом модуля волновой скорости, и это воздействие сильнее влияния волнового градиента давления.
3. Предложена и проверена для двух систем течений математическая модель струй с учетом их взаимодействия с волновыми потоками.

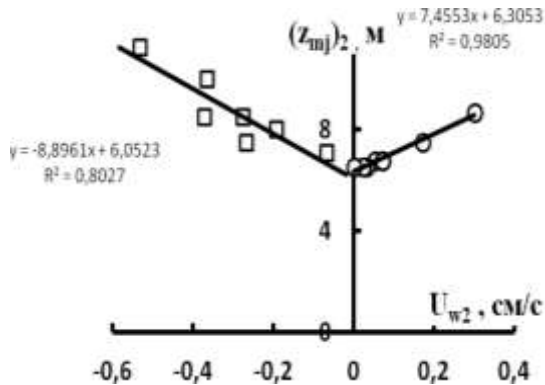


Рис.8. Зависимость ординаты максимума скорости второй струи в Иваньковском водохранилище от волновой составляющей скорости.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант 11-05-01146).

### Литература

1. Авилкин И.А., Самолюбов Б.И., Иванова И.Н., Будников А.А., Барбанова Е.С. Эволюция структур полей течений и концентраций примесей в Волховской губе Ладожского озера. Физические проблемы экологии. М.: МАКС ПРЕСС. 2011. № 18. С. 15–20.
2. Науменко М.А., Авинский В.А., Барбашова М.А. и др. Современное экологическое состояние Волховской губы Ладожского озера // Экол. химия. 2000. Т. 9. Вып. 2. С. 90–105.
3. Прандтль Л. Гидроаэромеханика // Москва-Ижевск: НИЦ "Регулярная и хаотическая динамика", 2002, 572 с.
4. Самолюбов Б.И. Придонные стратифицированные течения // М. «Научный мир», 1999. 464с.
5. Самолюбов Б. И. Плотностные течения и диффузия примесей. М.: Изд. ЛКИ. (УРСС). 2007. 352 с.
6. Самолюбов Б.И. Динамика систем стратифицированных течений в озерах и водохранилищах // Тр. VII конференции «Динамика и термика рек, водохранилищ и прибрежной зоны морей». М.: ИВП РАН, РУДН, 23-25. 11. 2009. С. 97 - 103.



7. Филатов Н.Н. Динамика озер. Л.: Гидрометиздат, 1983. 187 с.
8. Шейнкман Е.Л., Самолубов Б.И., Иванова И.Н., Перескок Н.А., Григорьев И.О., Шлычков Д.С. Распределения скорости течения и параметров состава воды при развитии циркуляций в заливе. Физические проблемы экологии. М.: МАКС ПРЕСС. 2011. № 18. С. 415–420.
9. Appt J., Imberger J., Kobus H. Basin-scale motion in stratified Upper Lake Constance // *Limnol. Oceanogr.* 2004. V. 49. № 4. P. 919–933.
10. Crawford G. B., Collier R. W. Observations of a deep-mixing event in Crater Lake, Oregon // *Limnol. Oceanogr.*, 1997, 42(2), P. 299-306.
11. Kanarska Y.I., Maderich V. A nonhydrostatic numerical modeling of exchange flows // XXX IAHN Congress. AUTH. Thessaloniki. Greece. 24-29 August 2003. V.1.THEME A: Stratification and Water Quality. P. 203-210.
12. Umlauf L., Lemmin U. Interbasin exchange and mixing in the hypolimnion of a large lake: The role of long internal waves. // *Limnol. Oceanogr.*, 2005, 50(5), P. 1601–1611.

## РАЗВИТИЕ ОБЛАКОВ МУТНОСТИ В СИСТЕМАХ ТЕЧЕНИЙ

Б.И. Самолюбов, Н.А. Перескок

*Физический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова*

Выполнен статистический анализ характеристик облаков мутности и математическое моделирование их развития в 13 озерах и водохранилищах. Получены распределения характеристик 80 облаков. Выделены диапазоны наиболее вероятных значений размеров облаков и устойчивостей переносящих их течений. Предложена и проверена версия математической модели диффузии взвеси в системе стратифицированных течений с учетом вихревой природы облаков мутности.

### Введение

Данная работа является продолжением нашей предшествующей публикации об облаках мутности, которые представляют собой широко распространенное явление, часто наблюдаемое в системах стратифицированных течений в морях, озерах и водохранилищах [10]. Под системой стратифицированных течений понимается совокупность потоков, развивающихся на разных глубинах от поверхности до дна и взаимодействующих между собой (рис. 1).

Среди важнейших прикладных задач исследований облаков мутности выделяется разработка методов прогноза формирования качества воды. Параметры качества воды в облаках, как правило, существенно отличаются от аналогичных характеристик окружающих вод. Тем не менее теория этого явления пока недостаточно совершенна из-за неясности его механизма [1,8,9,10]. Решение данной проблемы возможно лишь при сочетании натуральных исследований, статистического анализа результатов измерений и математического моделирования. В связи с этим

цели данной работы были сформулированы следующим образом: расширение базы данных о формировании и развитии облаков мутности в системах стратифицированных течений; анализ природы облаков и разработка версии математической модели их развития.

### Виды и диапазоны наиболее вероятнейших значений параметров облаков

Параметры облаков определялись и статистически обрабатывались по результатам измерений на продольно-осевых разрезах по всей глубине и длине 13 водоемов. К опорным полигонам относятся водохранилища Можайское (июль 1996, 1997), Ивановское (июль 1998, 1999), Нурекское (август 1980, 1982), Истринское (2000, 2002), Рузское (2000) и озера Телецкое (2003, 2004, 2006) и Имандра.

На основании анализа этих данных выявлено 80 облаков мутности в различных системах стратифицированных течений по данным комплексных исследований распределений термогидродинамических параметров и характеристик состава воды.

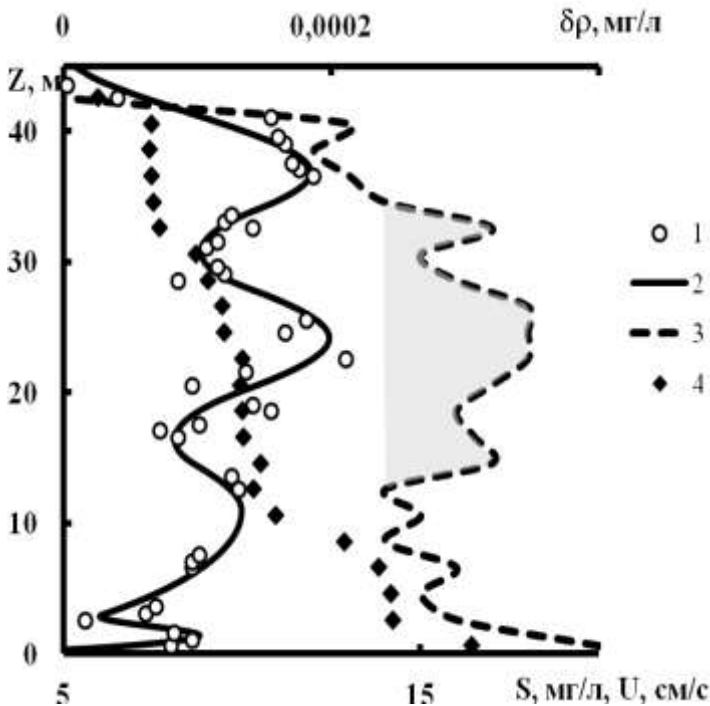


Рис. 1. Характерные профили 1, 2 – измеренной и теоретической скорости течения, 3 – концентрации взвеси, 4 – разности плотностей вод у поверхности и на конкретной высоте над уровнем дна  $z$  (ст. 8 продольного разреза на Нурекском водохранилище, 14.10.1982). Затененная область соответствует облаку мутности.

В случае, который для примера иллюстрируется на рис. 1, система течений включает придонный плотностной поток и три струи, расположенные в пределах ступенек на профиле разности плотностей вод у поверхности и на конкретной высоте над уровнем дна  $z$ . Облаку мутности соответствует затененная область на профиле концентрации взвеси. Вертикальный турбулентный обмен в зоне облака определяется, преимущественно, влиянием центральной струи и течений в ближайших к ней сдвиговых слоях нижней и верхней струй. Выполнявшийся нами анализ проводился для 8 типов систем течений, включавших разнообразные сочетания внутренних потоков.

По расширенной, по сравнению с предшествующим этапом исследований, базе данных получены распределения характеристик облаков по их размерам и частоте появления. Выделены диапазоны наивероятнейших параметров облаков.

Чаще всего встречаются облака со значением  $\Delta Z_{cl}/Z_{cl}$  в промежутке от 0,3 до 0,5 ( $N_{cl} \cong 50\%$ ). Здесь  $\Delta Z_{cl}$  вертикальный размер облака,  $Z_{cl}$  высота подъема над уровнем дна. Облака мутности разделяются на три группы. В первую группу входят облака в придонном слое, во вторую – облака, вышедшие из придонного слоя, но находящиеся вне зоны действия струйного течения. В третью группу вошли облака, которые находятся в зоне действия струй.

Основные зависимости, найденные ранее [10], в целом подтвердились. К их числу относятся а) обобщенные квазилинейные зависимости относительного вертикального размера облаков мутности от устойчивости течения для трех указанных выше групп; б) пропорциональность размера облака и соотношения устойчивостей придонного потока и течения в облаке.

### **Гипотеза о вихревой природе облаков**

При расшифровке механизма формирования облаков мутности мы проанализировали результаты измерений выполненных экспедициями кафедры физики моря и вод суши физического факультета МГУ на полигонах, указанных выше. Наиболее подробные и длительные регистрации удалось провести в Петрозаводской губе Онежского озера в сентябре 2007 г. и августе 2008 г. Согласно этим данным, при повышении скорости придонного потока и, следовательно, снижении его устойчивости из придонного слоя поднимаются зоны возмущений скорости. Подъем таких зон сопровождается появлением облаков мутности, которые эмитируются из придонного слоя и достигают высоты порядка 10 м над дном. По оценкам скорость подъема облаков близка к значениям стандарта вертикальной компоненты пульсаций скорости плотностного течения и вертикальной компоненты скорости внутренней волны. Качественно близкий результат был получен в теоретической работе [9], в которой показано, что внутренняя волна ускоряет придонное течение, снижая его устойчивость. Это вызывает подъем вихреобразований из придонного потока в вышележащие слои. Вихреобразования увлекают вверх взвесь из придонной области, что и приводит к эмиссии облаков мутности. В теоретической работе [8] авторам удалось получить распределения возмущений скорости и сопутствующих им облаков в атмосфере при анализе развития неустойчивости Кельвина-Гельмгольца в приземном потоке. Основные элементы выявленного в этой работе процесса генерации облаков, в принципе, подобны закономерностям, обнаруженным в нашей работе.

Таким образом, можно считать, что генерация и развитие облаков мутности вызваны вихреволновыми процессами, которые порождены неустойчивостью течения и внутренними волнами. Математическая модель такого процесса должна включать выражение потока взвеси, обеспечивающего вертикальный вихреволновой перенос.

### Математическая модель развития облака и ее проверка

Для математического моделирования диффузии взвеси в системах стратифицированных течений с облаками мутности мы ввели в уравнение диффузии взвеси дополнительный поток взвеси, связанный с вихревым переносом ( $W_{ed}$ ). Он характеризует среднюю скорость вертикального переноса взвеси с вихреобразованиями, поднимающимися из зоны их генерации за счет развития неустойчивости течения в придонном пограничном слое. Для вертикальной компоненты скорости завихренности применено решение из работы [7], согласно которому эта скорость изменяется по квазигармоническому закону с амплитудой, экспоненциально затухающей с высотой над уровнем дна.

$$\partial_t S + \partial_x US + \partial_z (W + w_{ed} - \omega_f) S = -\partial_z \langle W' S' \rangle \quad (1)$$

$$\partial_x U + \partial_z W = 0 \quad (2)$$

$$\langle W' S' \rangle = -(K_u / Sc) \partial_z S \quad (3)$$

$$\int_z^H US dz \cong H \overline{U}_{FD} \overline{S}_{FD} (1 - z/H) \quad (4)$$

$$w_{ed} = A_{ed} \exp(-k_e (z - z_e)) \sin(k_{ed} z + \varphi_{ed}) \quad (5)$$

$$K_u = c_\alpha \cdot (u_\tau + u_c) \ell / (1 + \alpha_2 Ri_d)^{1/2} \quad (6)$$

$$A_{ed} = a(U_m / Ri_u) + b \quad (7)$$

$$k_e = (a Ri_u + b) / z_u \quad (8)$$

$$k_{ed} = c_1 (U_*^2 / z_{u0} U_{*0}^2) \exp(-k_1 ((U_* - (U_*)_{cr}) / U_{*0})^{3/2}) \quad (9)$$

В уравнениях (1) и (2)  $x$  и  $z$  – продольная и вертикальная координаты,  $U$  и  $W$  – продольная и вертикальная компоненты средней скорости течения,  $S$  – концентрация взвеси,  $S'$  – пульсации концентрации,  $W'$  – пульсации вертикальной компоненты скорости течения,  $\omega_f = \sum_{i=1}^{\Phi_{fr}} \omega_{fi} V_i$  – средневзвешенная гидравлическая крупность (скорость гравитационного оседания) смеси частиц. Здесь  $\omega_{fi}$  и  $V_i$  – гидравлическая крупность и объемная концентрация частиц конкретной фракции (диапазона размеров),  $\Phi_{fr}$  – число фракций. В уравнении (3)  $K_u$  – коэффициент вертикального турбулентного обмена,  $Sc$  – число Шмидта. В уравнении (4)  $H$  – глубина места,  $\overline{U}_{FD}$ ,  $\overline{S}_{FD}$  – осредненные по глубине  $H$  значения скорости течения и концентрации взвеси. В уравнении (5)  $w_{ed}$  – вертикальная компонента

скорости вихревых возмущений, которые генерируются за счет сдвиговой неустойчивости в пограничном слое [7];  $A_{ed}$ ,  $k_{ed}$ ,  $\varphi_{ed}$  - амплитуда при  $z=z_e$ , волновое число и фаза,  $k_e$  - коэффициент затухания,  $z_e$  - уровень максимума амплитуды возмущений.

В уравнении (6) из работы [11]  $u_c = \ell |\partial_z U|$  - сдвиговая скорость,  $\ell$  - масштаб турбулентности,  $c_a = \alpha_1 (\alpha_2^*)^{1/2} \cong 1$ ,  $\alpha_2 = 0,4$  - эмпирический коэффициент. Величина

$U_c$  - компонента скорости вертикального турбулентного переноса, обусловленная диффузией пульсационной энергии из зон ее продукции. Значение  $U_c$  максимально при  $\partial_z U = 0$  и равно нулю в зонах с максимумами  $\partial_z U = (\partial_z U)_{MAX}$ . Такими свойствами скорости переноса  $U_c$  обладает функция

$u_c = 0,02 \cdot \overline{U_{FD}} \cdot \left(1 - \left| \partial_z U / \partial_z U_{MAX} \right| \right)$ . Здесь 0,02 - минимальное известное значение

$\sigma_w / \overline{U_{FD}}$ , где  $\sigma_w = \langle w'^2 \rangle^{1/2}$  - стандарт вертикальной компоненты пульсаций скорости течения.

$Ri_d = N^2 \ell^2 / (u_c + u_c)^2$  модифицированное число Ричардсона, которое, в отличие от градиентного числа  $Ri$ , конечно при  $\partial_z U = 0$ . В уравнениях (7) и (8)  $a$ ,  $b$  - постоянные коэффициенты, подстрочный индекс 0 здесь и в других выражениях соответствует значениям параметров в начальном створе, индексом  $sg$  обозначается критическое значение.

Полуэмпирические выражения характеристик, определяющих вертикальную компоненту возмущений скорости течения (7), (8) и (9) получены при выполнении данной работы. Выявлена квазилинейная зависимость амплитуды возмущений скорости  $A_{ed}$  от отношения максимальной скорости придонного потока к интегральному числу Ричардсона  $U_m / Ri_u$  (рис. 2 а). Эта зависимость подтверждает вихревую природу возмущений, поскольку вертикальная компонента скорости завихренности должна увеличиваться с ростом скорости течения и, тем более, градиента скорости который в свою очередь пропорционален максимуму на профиле  $U(z)$  в придонном потоке. При этом рост устойчивости стратификации обычно ведет к гашению вертикального энергообмена. Именно из этих соображений была выбрана приведенная зависимость, проверка которой показала правильность сделанных предположений.

Более сложный характер носит обнаруженная связь волнового числа для возмущений скорости  $k_r$  с динамической скоростью придонного потока  $U_*$  (рис. 2 б). Выбор  $U_*$  в качестве определяющего параметра для  $k_r = 2\pi / \lambda_{zr}$  обусловлен приведенными в предшествующем разделе данными, согласно которым скорость подъема облаков в придонном слое близка к величине стандарта вертикальной компоненты пульсаций скорости плотностного течения  $\sigma_w$ . Поэтому вертикальная длина волны для возмущений  $\lambda_{zr}$  должна была бы быть пропорциональна  $U_*$ , так как у дна  $\sigma_w \cong U_*$  [3]. Однако, вместо предполагаемой спадающей зависимости, фактически, (рис. 2 б) имеет место неоднозначность связи  $k_r$  и  $U_*$ . Правая ветвь кривой на рис. 2 б, соответствующая спаду волнового числа с ростом  $U_*$  при  $U_* > 0,3$  см/с

вполне объяснима и на данном этапе исследований удовлетворительно обеспечена данными. Что касается левой ветви, то ее ход требует дальнейшего изучения после расширения базы данных.

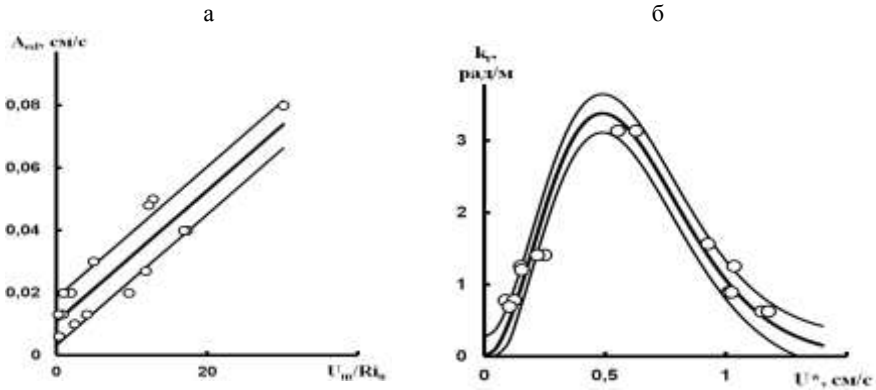


Рис. 2. Зависимости а - амплитуды возмущений скорости  $A_{ed}$  от отношения максимальной скорости придонного потока к интегральному числу Ричардсона  $U_m/Ri_b$ , б - волнового числа для возмущений скорости  $k_r$  от динамической скорости придонного потока  $U_*$ .

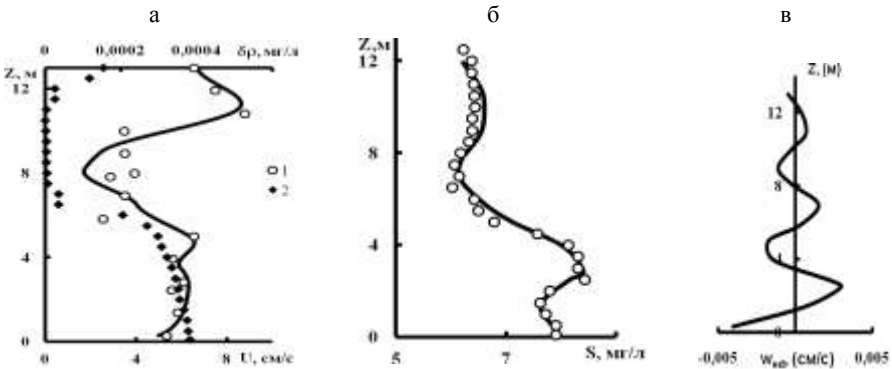


Рис. 3. Профили а- скорости течения  $U$  (1) и изменения плотности жидкости с глубиной  $\delta\rho$  (2), б - концентрации взвеси  $S$ , в - вертикальной компоненты вихревых возмущений скорости  $w_{ed}$ . (Русское водохранилище, ст. Курово-Оселье, 28.06.2000). Кривые  $U$ ,  $S$ ,  $w_{ed}$  - теоретические.

Методика решения системы (1-4) без учета влияния завихренности на перенос взвеси приведена в работе [11].

С применением данных зависимостей в решении уравнения диффузии были найдены теоретические распределения концентрации взвеси в потоках с облаками мутности. Рассчитанные распределения концентрации согласуются с результатами измерений (рис.3.).

Максимумы концентрации взвеси, связанные с наличием облаков мутности, удалось получить именно путем введения в уравнение диффузии потока частиц, связанного с переносом взвеси завихренностью ( $W_{ed}$ ).

### Закключение

1. Получены распределения характеристик 80 облаков мутности по их размерам и частоте появления на 13 полигонах. Выделены диапазоны наименее вероятнейших значений относительных размеров облаков и устойчивостей переносящих их течений для потоков разных типов.
2. Предложена и проверена математическая модель диффузии взвеси в системе течений с учетом вихревой природы облаков мутности.

**Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант 11-05-01146).**

### Литература

1. Баренблатт Г.И. Подobie, автомодельность, промежуточная асимптотика. // Л.: Гидрометиздат. 1982. 256 с. М о н и н А. С., Каменкович В. М., Корт В. Г. Изменчивость мирового океана.— Л.: Гидрометеиздат, 1974, 262 с.
2. Woods J. D. Wave-induced shear instability in the summer thermocline.—J. Fluid Mech., 1968, vol. 32, P. 4, p. 792—800.
3. Самолубов Б.И. Придонные стратифицированные течения // М. «Научный мир», 1999. 464с.
4. Самолубов Б.И. Турбулентная диффузия в локальных сдвиговых слоях придонного стратифицированного течения с взвешенными частицами. // Изв. АН СССР. Сер. Физика атмосф. и океана. 1986. Т. 22 № 5. С. 513-524.
5. Копелевич О.В., Буренков В.И., Маштаков Ю.Л., Носенко Н.М. Некоторые результаты исследований рассеяния и поглощения света морской водой в Бенгальском заливе. // Гидрофизические и оптич. иссл. в Инд. океане. М.: Наука. 1975. С. 67-70.
6. McCave I. Particulate size spectra, behavior and origin of nepheloid layers over the Nova Scotian Continental Rise. // J. Geophys. Res. 1983. № 12. P. 7647-7666.
7. Бетчов Р., Криминале В. Вопросы гидродинамической устойчивости // «Мир» 1971. 352с.
8. Morel, Y.G., D.S. Darr, C. Talandier Possible sources driving the potential vorticity structure and long-wave instability of coastal upwelling and downwelling currents. // J. Phys. Oceanogr. 2006, 36, 875–896.
9. Stastna M., Lamb K.G. Sediment resuspension mechanisms associated with internal waves in coastal waters //J. of Geoph. Res. 2008. V. 113, C10016, doi:10.1029/2007JC004711.
10. Б.И. Самолубов, Н.А. Перескок Облака мутности в системах стратифицированных течений. Физические проблемы экологии. М.: МАКС ПРЕСС. 2011. № 18. С. 346– 353.
11. Б.И. Самолубов Профили коэффициента турбулентного обмена и концентрации взвеси в системе стратифицированных течений // Вестн. Моск. Ун-та. Сер. 3. Физика. Астрономия. № 4. 2012, с. 76 - 79.

ИССЛЕДОВАНИЕ МАГНИТНЫХ СВОЙСТВ ПОЧВ В ЗОНЕ ВЛИЯНИЯ  
КОМБИНАТА «СЕВЕРНИКЕЛЬ»»

Самсонова В.В.<sup>1</sup>, Карпенко О.И.<sup>1</sup>, Копчик С.В.<sup>1</sup>, Перов Н.С.<sup>1</sup>,

Родионова В.В.<sup>1</sup>, Бенедиктова А.И.<sup>2</sup>

*Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова,*

*<sup>1</sup> Физический факультет, кафедра магнетизма,*

*<sup>2</sup> Факультет почвоведения, кафедра общего почвоведения.*

*E-mail: [vv.samsonova@physics.msu.ru](mailto:vv.samsonova@physics.msu.ru)*

### **Введение**

На сегодняшний день среди главных источников загрязнения окружающей среды находятся предприятия горнодобывающей и металлургической промышленности. При этом одним из самых опасных факторов антропогенного загрязнения является загрязнение тяжелыми металлами [1]. Из-за большого количества операций при производстве по разлому, крошению, обогащению и последующей переработке руды в окружающую среду попадает большое количество поллютантов, содержащих как сами металлы, так и их соединения. Промышленные центры увеличивают антропогенное влияние на окружающую среду, что приводит к отрицательным изменениям в природных экосистемах: уменьшению биоразнообразия, упрощению структуры и снижению продуктивности экосистем. Таким образом, анализ и контроль количества тяжелых металлов в окружающей среде необходимы для оценки вредных воздействий на человеческий организм и состояние природных экосистем.

В настоящее время с проблемой антропогенного загрязнения столкнулась почти каждая страна мира. Например, в Турции большой опасности подвержена зона самого первого медного рудника «Murgul (Artvin)» [2]. В Северной Америке, Детройт, выявлено загрязнение почв Амбассадор-Бридж – главного транспортного пути по которому проходит в среднем 4880 дизельных грузовиков ежедневно [3]. На юге Китая загрязнение городских почв привело к увеличению уровня вредного воздействия на организмы человека, животных и растений [4]. Подобные исследования выявили источники существенных антропогенных загрязнений в России, Италии, Тайланде, Нигерии, Чехии, Польше и других странах.

Почвы Кольского полуострова в течение более чем 60 лет испытывают влияние атмосферных выбросов горно-металлургических комбинатов, основными загрязняющими металлами являются никель и медь [5]. В данной работе установлена связь между магнитными свойствами почв и расстоянием до источника загрязнения в зоне влияния комбината «Североникель».



### Образцы и методика измерений.

Ранее нами были исследованы образцы почв Кольского полуострова, взятые на разном расстоянии от горно-металлургического комбината «Печенганикель». Несмотря на то, что выборка была непредставительной, результаты исследований позволили выявить корреляцию магнитных свойств проб почв со способом обработки образцов и расстоянием до комбината [6]. В настоящей работе представлены результаты исследований значительно большей выборки образцов почв Кольского полуострова, подверженных влиянию атмосферных выбросов комбината «Североникель» (рис. 1.).

Пробы почв были взяты на участках мониторинга на расстояниях от 2 до 102 км от комбината. На каждом из участков брались пробы из нескольких точек и из разных подгоризонтов подстилки (рис.2): верхнего листового подгоризонта (OL), нижележащего ферментативного и гумусового подгоризонтов (OFH), подстилки в целом (O). Всего было исследовано 76 проб.



Рис. 1 Кольский полуостров, Мончегорск, комбинат «Североникель».

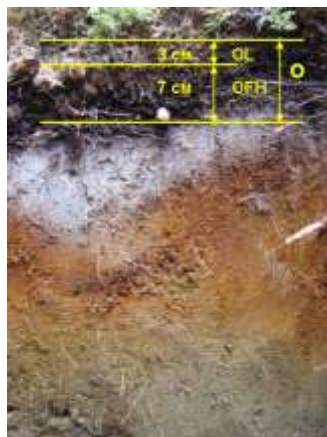


Рис. 2 Профиль почвы.

Измерения магнитных свойств почв проводились на вибрационном магнитометре фирмы Lakeshore (серия 7407) в полях до 10 кЭ при комнатной температуре. Для исследования образцы помещались в полиэтиленовые пакетики размером 5 мм\*5 мм, взвешивались, уплотнялись (для минимизации перемещения частиц внутри пакетика) и запаивались. Дополнительно были выполнены измерения динамической восприимчивости в частотном диапазоне 20Гц-200кГц, которые проводились на RLC – метре.

### Результаты и обсуждения

Исследования магнитных свойств почв при комнатной температуре показали, что все образцы являются ферромагнитными с заметной коэрцитивной силой.

В таблице 1 представлены пространственные и магнитные характеристики почв (используется усредненный магнитный момент, который получен как среднее

арифметическое моментов 3-4 образцов почв, отобранных с одного участка). Погрешность измерения удельной намагниченности составляет около 5 % и включает в себя сумму погрешности измерений массы и магнитного момента. На рисунке 3 представлены петли гистерезиса 7 образцов почв, взятых на разных расстояниях от комбината (102, 28, 24, 21, 20, 18, 7 км) из верхнего OL и нижнего OFH подгоризонтов подстилки. Из рисунка 3а) видно, что с увеличением расстояния от комбината величина магнитного момента образца уменьшается, значит, содержание тяжелых металлов в подстилке уменьшается.

Расстояние от комбината, км	Горизонт почвы	Удельная намагниченность, ед.СГСМ/г	Нс, Э	Восприимчивость в насыщении, Гс Э <sup>-1</sup> Г <sup>-1</sup>
102	OL	0,07	148	-0,0000299
102	OFH	0,09	136	-0,0000163
102	O	0,18	141	-0,0000421
28	OL	0,09	119	-0,0000077
28	OFH	0,13	121	0,0000071
28	O	0,16	140	0,0000122
24	OL	0,13	128	-0,0000169
24	OFH	0,19	120	-0,00000019
24	O	0,20	179	-0,00000461
21	OL	0,15	152	-0,00000446
21	OFH	0,26	171	-0,00000342
21	O	0,30	173	-0,00000465
20	OL	0,18	178	-0,00000498
20	OFH	0,14	186	-0,00000337
20	O	0,23	135	0
18	OL	0,27	156	-0,00000332
18	OFH	0,22	150	-0,00000141
18	O	0,21	147	-0,00000253
7	OL	0,28	163	-0,00000222
7	OFH	0,27	137	0,00000154
7	O	0,39	135	0,00000088
~3	Oe	0,68	147	0,00000795
~2	RY	0,36	115	0,00000505

Таблица 1. Пространственные и магнитные характеристики образцов почвы.

Так как слой OL находится на самой поверхности, то воспроизводимость его магнитных свойств зависит от переменчивых природных условий. Так, если прошел сильный дождь или ветер, то поллютанты могут или просочиться вглубь почвы и там осесть, или переместиться в направлении ветра. Поэтому изучение магнитных свойств образцов почв, взятых из более глубоких слоев, физически усредняющих воздействие за определенный интервал времени, несет более точную информацию о загрязнении. На рисунке 3б) представлены петли гистерезиса образцов ферментативного и гумусового OFH слоев подстилки.

График зависимости величины магнитного момента образцов верхних горизонтов почв от расстояния до комбината представлен на рисунке 4. Существенное отличие величины магнитных моментов образцов почв, взятых с участка ремедиации (2 км) и техногенной пустоши (3 км), определяется разным характером верхних горизонтов, представленных удобренным оторфованным слоем и остат-

ками подстилки, соответственно. Запыленность разрушающейся подстилки техногенной пустоши железосодержащими минеральными частицами обуславливает, вероятно, повышенную величину магнитного момента по сравнению с верхним оторфованным слоем участка ремедиации несмотря на близкое содержание в них металлов-загрязнителей. Поведение подгоризонта OFH подстилки не стабильно в районе от 20 до 30 км. Такое поведение может проявляться из-за высокой пространственной изменчивости ее свойств, обусловленной природными факторами, техногенной дигрессией экосистем, привнесом геогенной пыли с эродированных поверхностей. Аналогично поведение подстилки в целом. Верхний подгоризонт OL характеризуется резким спадом намагниченности с увеличением расстояния. Это говорит об уменьшении загрязнения с удалением от комбината.

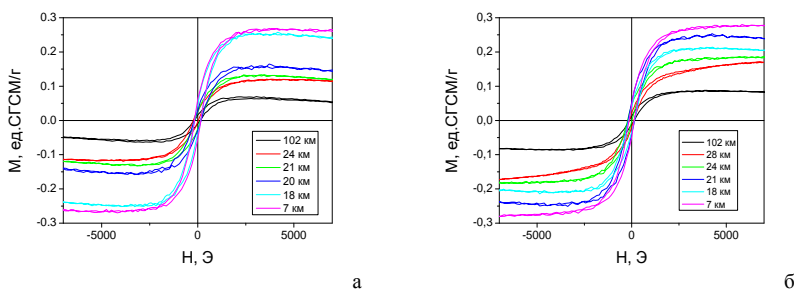


Рис. 3. Петли гистерезиса образцов почв, взятых на разных расстояниях от комбината из подгоризонтов подстилки а) OL, б) OFH.

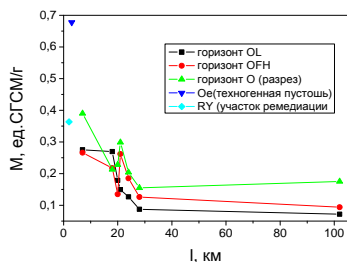


Рис. 4. График зависимости величины магнитного момента верхних горизонтов почв от расстояния до комбината.

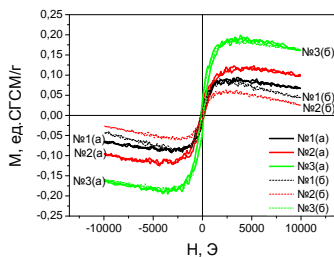


Рис. 5. Петли гистерезиса образцов почв, взятых на расстоянии 21 км от комбината из подгоризонта OL подстилки.

Высокая пространственная неоднородность загрязнения подтверждается на примере детального исследования подстилки. На рисунке 5 представлены петли гистерезиса проб, взятых на расстоянии 21 км от комбината из верхнего, наиболее загрязненного и неоднородного по составу подгоризонта OL. Видно, что в одной «точке» проба однородна: петли гистерезиса образцов № 3(а) и № 3(б) совпадают (числа обозначают место отбора в пределах участка, а буквы – взятие для магнитных измерений части из приготовленной для анализа гомогенизированной (размолотой) пробы). В другой «точке» величина магнитного момента отличается

почты в 2 раза (образцы № 2(а, б)). Такая неоднородность может объясняться «штучным» поступлением с атмосферными выпадениями частиц, содержащих магнитные оксиды тяжелых металлов, и их относительным закреплением на разнородных по характеру растительных остатках, образующих подстилку. Другими словами, наблюдаемая неоднородность магнитных свойств связана, вероятно, как с неоднородным характером поступления в почвы частиц (влияние крон, микрозавихрений и т.п.), так и с влиянием измерения и/или пробоотбора - флуктуацией числа магнитных частиц в пробе.

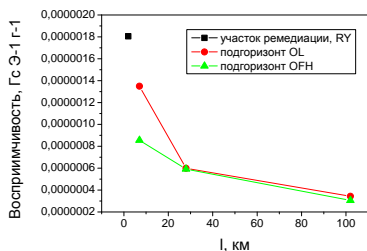


Рис. 6 Зависимость динамической восприимчивости проб разных горизонтов почв от расстояния.

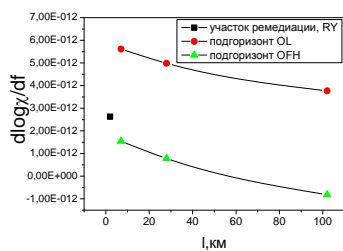


Рис. 7 Зависимость  $d \log \chi / df$  проб разных горизонтов почв от расстояния.

Также были исследованы зависимости динамической восприимчивости проб разных горизонтов почв от расстояния (рис. 6) и их частотная зависимость (рис. 7). С увеличением расстояния восприимчивость и наклон частотной зависимости  $d(\log \chi) / df$  убывают. Магнитная восприимчивость, как правило, увеличивается с увеличением частоты. Величины  $(\chi_{lf} - \chi_{hf}) / \chi_{lf}$ , где  $\chi_{lf}$  и  $\chi_{hf}$  - низкочастотная и высокочастотная восприимчивости, в основном, отрицательны. Такие величины обычно нехарактерны для развитых почв и, в соответствии с калибровочным графиком [7, рис. 2.3] могли бы, например, соответствовать геогенным магнитным частицам с характерными размерами, соответствующими области перехода от монокломоновых супермагнитных к многодоменным объемным частицам (~ 0.1-10 мкм). Частотная зависимость, безусловно, несет более подробную информацию о характерных размерах, поступающих в почву ферримангнитных частиц и должна явиться предметом дальнейшего анализа.

## Выводы

Магнитостатические и динамические измерения дают возможность определить степень загрязнения почв магнитными примесями. В целом, наблюдается корреляция намагниченности проб почв как с расстоянием от источника загрязнения, так и с глубиной почв. Общий тренд связывается с наложением прямого (поступления магнитных частиц в атмосферу с выбросами комбината и последующего осаждения) и косвенного (переноса с воздушным транспортом магнитных частиц естественного происхождения с эродированных территорий вблизи комбината).

та) влияния комбината. Отклонения от тренда могут быть обусловлены и естественной неоднородностью почв, и влиянием других антропогенных факторов.

Обнаружена высокая изменчивость магнитных свойств почв, которая объясняется как неоднородным характером поступления в почвы магнитных частиц, так и влиянием измерения / пробоотбора.

Апробирован метод анализа образцов почв на основе измерений динамической восприимчивости в частотном диапазоне 20Гц-200кГц. Полученные результаты могут быть использованы для разработки и стандартизации магнитных методов контроля экологического состояния почв.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, проект № 11-04-01794-а.

### Литература

1. Nyarko, V.J.B., Dampare, S.B., Serfor-Armah, Y., Osae, S., Adotey, D., Adomako, D., 2008. International Journal of Environment and Pollution 32, 467–476.
2. B. Koz, U. Cevik, S. Akbulut, 2012. Ecological Indicators 20, 17–23.
3. B. Sapkota, M.T. Cioppa, 2012. Environmental Pollution 170, 131-144.
4. Guanghui Guo, Fengchang Wu, Fazhi Xie, Ruiqing Zhang, 2012. Journal of Environmental Sciences 24(3), 410–418.
5. Копчик Г.Н., Лукина Н.В., Копчик С.В., Ливанцова С.Ю., Щербенко Т.А., Ерасова С.А., Удачин Н.В. // Вестник МГУ, сер. почвовед. 2004. № 4. С. 1-11.
6. Самсонова В.В., Копчик С.В., Перов Н.С., Родионова В.В. 2012. Физические проблемы экологии (экологическая физика), № 18, 353-357.
7. Dearing J.A. 1994., Environmental Magnetic Susceptibility - Using The Bartington MS2 System. Chi Publishing Kenilworth, UK, 104 pp.

## ПАРАМЕТРЫ ИННОВАЦИОННОГО ПРОЦЕССА В ВОЗОБНОЛЯЕМОЙ ЭНЕРГЕТИКЕ

Синюгин О.А.

*Географический факультет МГУ имени М.В.Ломоносова*

*научно-исследовательская лаборатория возобновляемых источников энергии*

Лидерами исследований и внедрения в сфере возобновляемых источников энергии (ВИЭ) являются страны с развитой экономикой: Дания, Германия, Великобритания, США, Япония. Активную экспансию возобновляемой энергетики в развивающихся странах осуществляют совместные предприятия с капиталом из этих стран. При этом характерно сочетание финансового капитала и технологических разработок транснациональных энергетических компаний (ТНК) и энергетических потребностей растущих рынков развивающихся стран.

### **Инновационный процесс в энергетике**

Инновационные процессы охватывают практически все сферы и отрасли мирового хозяйства. Инновационная деятельность служит мощным двигателем, приводящим в движение всю мировую экономику, оказывая влияние как на отраслевую структуру так и на пространственную организацию хозяйства [1].

Отличительной чертой инновационной сферы является интеграция науки и производства. Можно выделить следующие основные компоненты инновационной сферы: создание новшеств (know-how) и изобретений, рынок вложения капитала и инвестиций, инновационная инфраструктура, конкурентный рынок внедрения инноваций.

Современные представления о закономерностях пространственной организации мирового хозяйства нашли отражение в динамических теориях и концепциях, среди которых особое место занимает концепция «центр-периферия». Ее сущность заключается в том, что постоянная качественная трансформация ядра – центра происходит за счет генерирования, внедрения и диффузии инноваций, причем распространение нововведений строго иерархически: от высших уровней к низшим – из центра на периферию. Концепция объясняет современные технологические и экономические диспропорции между развитыми и развивающимися странами. Последние не могут самостоятельно производить инновации вследствие отсутствия необходимой научно-технической базы и экономической отсталости, поэтому вынуждены приобретать новые технологии у наиболее развитых стран.

В настоящее время инновации являются основным средством достижения и поддержания международной конкурентоспособности. Структура вложений в новые исследования и разработки обычно совпадает с направлениями тех национальных преимуществ, в которых страна оказывается наиболее конкурентоспособной на мировом рынке.

### **Инновации и новая структура энергетики мира**

Активизация инновационной деятельности и широкое распространение инновационных технологий, безусловно, является приоритетным направлением современного мирового развития энергетики. Под воздействием инновационных процессов формируется новая структура энергетики мира, которую можно рассматривать как цивилизацию энергетических инноваций. Во многом благодаря распространению инноваций с начала 1980-х годов наметилась тенденция прекращения роста энергопотребления на душу населения в развитых странах. В последнее 30-летие душевое энергопотребление в них оставалось практически неизменным, а в новых индустриальных странах, напротив, отмечается увеличение подушного потребления энергии [2]. Подобная тенденция отражает характерные черты развивающегося постиндустриального общества, которое характеризуется ростом и распространением информационных технологий, снижением энергопотребления и ресурсоемкости в отраслях материального производства. В отличие от индустриальной экономики новые технологические решения не требуют таких же количеств невозобновляемых природных ресурсов и энергии.

Определяя базовые направления развития инновационного процесса в традиционной энергетике как совершенствование накопленных за десятилетия технологий, можно выделить следующие наиболее значимые из них:

- Физико-химические методы воздействия на пласт в нефти - и газодобыче [3]. Бурение и транспортировка углеводородов в шельфовых зонах. Разработка технологий добычи газогидратов.
- Технологии газификации и ожижения в угольной промышленности, включая, улавливание выбросов угольных электростанций.
- Ядерные реакторы нового поколения с повышенной степенью безопасности. Замыкание ядерного топливного цикла, обращение с отходами.

Из числа перечисленных технологий, к наиболее перспективным базовым энергетическим ресурсом, следует отнести разработку эффективных методов извлечения газогидратов. Мировые запасы газовых гидратов по многим оценкам в несколько раз превышают запасы обычного газа. Кроме того, этот ресурс отличает практическая повсеместность в недрах мирового океана. Дальше всех продвинулась в деле поиска и разработки газогидратных месторождений Япония, которая, как известно, сильно зависит от импорта углеводородов. В настоящее время на шельфе Японии наибольший интерес с точки зрения промышленного освоения представляет месторождения природных гидратов Нанкай. К промышленной разработке этого месторождения намечается приступить в 2017 году [4].

Сейчас в Японии функционирует государственная программа по изучению газовых гидратов. Аналогичные программы есть также в США («Национальная долгосрочная программа по метангидратам»), Канаде, Великобритании, Индии. Например, в США в настоящее время инвестируется в разработку этой технологии порядка 0,5-1 млрд. долларов ежегодно, а к 2015 году планируется увеличить объем финансирования до 3 млрд. долл. Цель - уже к 2015 году начать коммерческую эксплуатацию месторождений газогидратов.

Основная трудность в решении проблемы добычи газа из гидратов связана с тем, что большая часть природных газовых гидратов сосредоточена в акватории Мирового океана, на глубине начиная с 300-500 м. Технология извлечения, доставки этого ресурса не совсем проста и находится только в начальной стадии опытно-конструкторских разработок.

Поэтому, можно констатировать, что в ближайшее десятилетие базовыми энергоносителями останутся газ. А географическая картина энергетики мира будет формироваться на основе наиболее экономически привлекательных природных углеводородных ресурсов, находящихся в Евразийской «оси», протянувшейся по меридиональной полосе от шельфа Карского моря, проходя через Западную Сибирь, Каспийское море, Иран, Персидский залив к Аравийскому полуострову. С перспективными рынками потребителей энергии расположенными по краям Евразийского континента – в Европе и Восточной Азии, на весьма значительных расстояниях от производителя в пределах порядка (4-6) тысяч километров.

Современная традиционная энергетика за многие десятилетия развития практически достигла предельного уровня развития. Технология производства электроэнергии отработана практически до деталей и трудна для совершенствования. Помимо этого, существует и другой аспект. В постиндустриальных странах с развитой экономикой, где доля индустриального сектора в последние десятилетия заметно снизилась, рост энергопотребления, как уже отмечалось, существенно замедлился. Иерархически многоступенчатые производства, уступают место специализированным, ориентированным на фрагментарное производство предприя-

тиям [5]. Такая же тенденция наметилась и в энергетике, где все более востребованными становятся автономные, децентрализованные энергоисточники.

### **Особенности развития возобновляемой энергетики в России**

Что касается нашей страны, то здесь положение дел сложилось непростое. С одной стороны, существуют определенные факторы в пользу развития возобновляемых источников энергии в России такие как:

1. Централизованные системы энергоснабжения охватывают лишь 1/3 территории страны. Около 20 млн. чел. проживает вне этих систем. Надежное энергообеспечение отдаленных районов сложная и дорогая для государства задача.

2. Более половины административных районов энергодефицитны (импортируют энергоресурсы из других регионов).

3. Газифицировано лишь около 50% населенных пунктов.

Несмотря на эти факторы рост возобновляемой энергетики не столь внушителен как в странах-лидерах в этой отрасли. Пока доля энергетики на основе возобновляемых источников в топливном балансе России составляет всего 1%. При сильной направленности на экспорт углеводородного сырья экономики страны рассчитывать на востребованность возобновляемых источников не приходится.

В январе 2009 году принято распоряжение правительства, которым были утверждены основные направления государственной политики в сфере повышения эффективности электроэнергетики на основе использования возобновляемых источников энергии до 2020 г.

В принятом распоряжении правительства прописано увеличение показателя объема производства и потребления электрической энергии с использованием возобновляемых источников на период до 2020 году (с учетом малых гидроэлектростанций): в 2010-м - 1,5%, в 2015-м - 2,5%, в 2020-м - 4,5%. Объем мощности, генерируемой с помощью возобновляемых источников энергии, будет возможно увеличить до такого уровня лишь в том случае, если вся нормативно-правовая документация, которая разрабатывается в рамках этого постановления, будет создана до 2012 года.

### **Литература**

1. *Шумпетер Й.А.* Теория экономического развития. – М.: ЭКСМО, 2007. – 864 с.
2. *Бушуев В.В., Телегина Е.А., Шафраник Ю.К.* Мировой нефтегазовый рынок: инновационные тенденции. – М.: ИАЦ Энергия, 2008. – 358 с.
3. *Голицын М.В., Голицын А.М., Пронина М.В.* Альтернативные энергоносители. – М.: Наука, 2004. – 159 с.
4. *Бабурин В.Л.* Инновационные циклы в российской экономике. – М.: Эдиториал УРСС, 2002. – 120 с.
5. *Березкин М.Ю., Синогин О.А.* Постиндустриальные тенденции конкурентоспособности энергетики мира / В сб. Конкурентоспособность в системе мирового хозяйства: пространственный анализ / Под ред. Н.С. Мироненко. – М.: Пресс-Соло, 2002. – С.340-354.



## ЭКРАНИРУЮЩИЙ ЭФФЕКТ КОНДЕНСАЦИИ

Соловьев А.А., Чекарев К.В.

*Географический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова**geosolmgu@mail.ru***Введение**

Экспериментальное определение достоверных значений коэффициентов конденсации, несмотря на длительную историю изучения, остается значимой проблемой теплообмена на границе раздела фаз, в приложении к геофизическим задачам. До сих пор остается открытым вопрос о необходимости использования в моделях климата параметризации процессов теплообмена, учитывающих конденсационную составляющую молекулярного влагообмена в приводном слое атмосферы, с которыми не без основания связываются отмечаемые в последние десятилетия драматические климатические изменения во многих регионах Земли [1]. В связи с отсутствием точных данных по коэффициенту конденсации в системе влажный воздух – вода пригодность полученных в экспериментальных исследованиях закономерностей к решению задачи о вкладе конденсации в энергообмен между океаном и атмосферой нуждается в тщательной проверке [2]. Неопределенность значительного, в пределах нескольких порядков, разброса измеренных значений коэффициента конденсации на различных межфазных поверхностях, стимулирует необходимость постановки соответствующих экспериментов с анализом возможных источников погрешностей в измерениях. В работе излагаются результаты экспериментального исследования конденсации паров воды в воздухе на неподвижную плоскую водную поверхность для стационарного процесса в отсутствии воздушных потоков.

**Экспериментальная установка и методика измерений скорости конденсации**

Для определения скорости конденсации содержащихся в атмосферном воздухе паров воды на водную поверхность, была использована экспериментальная установка с климатической камерой, в которой температура, влажности воздуха и температура поверхности воды поддерживались постоянными во время эксперимента. Климатическая камера имела размеры (1,8 x 5 x 0,72) м по длине, высоте и ширине соответственно. Герметизация камеры исключала возможность возникновения в ней воздушных потоков в результате проникновения воздуха из внешней среды. В камере находились регуляторы температуры и влажности воздуха. Контроль температуры и влажности осуществлялся датчиками температуры и влажности, установленными на различных расстояниях от водной поверхности. Мерная кювета с водой, на которую происходила конденсация, имела размеры 0,4 x 0,31 x 0,013 м, устанавливалась в термостатирующей емкости с водой, на дне которой находился теплообменник, соединенный трубками через гидронасос с термостатом. С помощью гидронасоса содержащаяся в термостате вода заданной температуры прокачивалась через теплообменник и определяла необходимое значение температуры воды в мерной кювете. Задаваемыми и контролируемыми параметрами

рами экспериментов были температура и относительная влажность воздуха, а также температура поверхности воды.

Измерения температуры воздуха и воды в кювете производились платиновыми датчиками марки 700-102ВАА-В00 с габаритными размерами (0,0021 x 0,0023 x 0,0009) м. Точность измерения температуры этими датчиками составляла 0,1°C. Датчик измерения влажности марки ИРТВ обеспечивал измерение относительной влажности в климатической камере с погрешностью, не превышающей 0,25% единицы младшего разряда. Сигналы с датчиков через аналого-цифровой преобразователь вводились в компьютер. Влажность воздуха в климатической камере создавалась парогенератором, влаготдача которого регулировалась реле, изменяющим напряжение электропитания нагревателя воды. Нагрев воздуха в камере производился нагревателем, выполненным в виде проволочной спирали, закрепленной рядами на рамке, которая обдувалась равномерным потоком, от вентилятора направлявшимся под небольшим углом, порядка 10° к горизонту уровня водной поверхности, обеспечивающим отсутствие воздушного течения над мерной кюветой. Соединение воздушного нагревателя с источником регулируемого напряжения, позволяло создавать фиксированную температуру воздуха в камере.

Метод измерения скорости конденсации влаги (плотности потока массы) на водную поверхность при заданных параметрах основывался на определении разности весов воды в мерной кювете до и после эксперимента. Весовое количество сконденсировавшейся воды измерялось на электронных весах с точностью до 0,01 г. На процедуре и последовательности проведения экспериментов мы не останавливаемся, так как она представлена достаточно подробно в [3]. Особый интерес представляет рассмотрение вопроса об относительно большом разбросе данных измерений интенсивности конденсации, представленных различными экспериментаторами. Сравнение результатов экспериментов различных авторов по определению скорости конденсации паров воды на воду, в том числе с нашими данными, показало, что при одних и тех же условиях отмечается большая, причинно неопределяемая разница значений интенсивности конденсации, далеко выходящая за пределы точности измерений.

Анализ методик измерений и расчета параметров конденсации привел к заключению о том, что одной из причин значительных погрешностей измерения скорости конденсации, далеко не всегда преодолеваемой в экспериментах, является неопределенность установления истинных значений температуры водной поверхности, с помощью которой определяется давление или плотность паров воды по линии насыщения. Температура, фиксируемая при непосредственных контактных измерениях, в пределах порядка 10 -15 % остается неопределенной. Для повышения степени достоверности при определении температуры водной поверхности нами предложен и апробирован способ трендовой интерполяции графиков зависимости температурного коэффициента  $\gamma = dT_{z\infty}/dT_k$  с расстоянием от водной поверхности. Этот коэффициент определялся по вертикальным профилям температур воздуха, измеренных датчиками, от температуры в климатической камере. Расчет температуры поверхности воды в таком случае можно было производить по формуле  $T_s = \gamma \cdot T_{\infty}$  со значением температурного коэффициента, которое устанавливалось аппроксимацией кривой указанной выше зависимости до пересечения с уровнем воды. Выполненные оценки показали, что за счет уточнен-

ной процедуры погрешности, вносимые в измерения скорости конденсации неточным определением температуры межфазной поверхности, снижались до величины не превышающей 2%.

Другой, не менее существенной причиной возможной недостоверности измеренных значений конденсации, является отсутствие оценок поправок, которые надо вносить в измерения скорости конденсации за счет учета разных объемов испарений, уходящих с мерной кюветы в процессе измерений за различные промежутки времени проведения эксперимента. К причинам разногласий измеренных значений скорости конденсации также относится не учет контроля величины весовых погрешностей, вносимых испарением в мерный резервуар в процессе установления заданных условий эксперимента и при осуществлении процедуры взвешивания. В результате анализа методики конденсационных измерений были установлены конкретные значения поправок к весам конденсата, которые оказались зависящими от разности температурных и влажностных условий внутри и вне климатической камеры. Относительные величины таких поправок, достигали значений порядка 50%. По итогам тарировочных измерений разработана уточненная методика проведения экспериментов, позволяющая определять систематическую ошибку, вносимую в конденсацию неучтенным испарением. Составлена таблица потерь количества сконденсировавшейся воды при выставлении заданных стационарных условий в климатической камере в заданном интервале времени и при переливе воды из мерной кюветы в мерную колбу для взвешивания. Определенное таким образом количество потерь воды учитывалось при расчетах конденсата во время эксперимента. Абсолютная погрешность метода измерения составила: для плотности пара в климатической камере ( $\pm 1,2 \cdot 10^{-5} \text{ кг/м}^3$ ), для скорости конденсации ( $\pm 10^{-6} \text{ кг/(м}^2 \cdot \text{сек)}$ ).

### Результаты экспериментов и их обсуждение.

В выполненных на экспериментальной установке измерениях скорости конденсации паров атмосферной влаги на водную поверхность проведено три серии опытов. В первой серии влажность поддерживалась постоянной, а температуры воздуха и поверхности воды изменялись. Во второй серии опытов при постоянных значениях относительной влажности и температуры воздуха изменялась температура воды. Третья серия опытов проводилась при фиксированных значениях температуры воды и воздуха и изменяющихся значениях влажности (таблица 1). Коэффициент конденсации в задачах массообмена определяется как отношение числа захваченных поверхностью молекул к общему числу молекул падающих на межфазную поверхность

$$K_c = \frac{n_s}{n_\infty}. \quad (1)$$

Таблица 1

Скорость конденсации водяных паров в воздухе на водную поверхность									
RH, %	T <sub>∞</sub> , К	T <sub>s</sub> , К	ρ <sub>s</sub> , кг/м <sup>3</sup>	ρ <sub>∞</sub> , кг/м <sup>3</sup>	m, кг	Δρ, кг/м <sup>3</sup>	j, кг/м <sup>2</sup> ·с, 10 <sup>-5</sup>	K <sub>D</sub> , м/с	K <sub>c</sub> , 10 <sup>-6</sup>
80	303	288,0	0,00769	0,02311	0,0067	0,0154141	1,5009	0,000974	2,99
80	308	289,0	0,00816	0,03055	0,0105	0,0223875	2,3521	0,001051	4,22
80	313	290,0	0,00865	0,04038	0,0143	0,0317265	3,2034	0,001010	6,86
80	313	291,0	0,00907	0,05048	0,0197	0,0414096	4,4130	0,001066	9,29
80	313	281,2	0,00856	0,04038	0,0143	0,0318225	3,2034	0,001007	12,13
80	313	289,2	0,01337	0,04038	0,0105	0,0270060	2,3521	0,000871	9,32
80	313	293,2	0,01672	0,04038	0,0089	0,0236609	1,9937	0,000843	7,91
80	313	297,2	0,02090	0,04038	0,0071	0,0194793	1,5905	0,000817	6,93
80	313	301,2	0,02598	0,04038	0,0046	0,0143975	1,0304	0,000716	6,13
80	313	281,2	0,00846	0,04038	0,0143	0,0319175	3,2034	0,001004	4,33
70	313	281,2	0,00846	0,03533	0,0112	0,0268697	2,5089	0,000934	9,35
60	313	281,2	0,00846	0,03028	0,0083	0,0218219	1,8593	0,000852	7,87
50	313	281,2	0,00846	0,02523	0,0062	0,0167740	1,3888	0,000828	6,28

Величина коэффициента конденсации паров воды на водную поверхность устанавливается по измеренной плотности потока массы пара к поверхности жидкости и рассчитанной плотности потока, выраженной через разность интенсивностей потоков к жидкости и от жидкости. В рамках модели, в которой максвелловская функция распределения скоростей молекул движущихся к межфазной границе и от нее одинакова, получена формула Герца – Кнудсена, используемая в качестве исходной для вычисления коэффициента конденсации:

$$j = K_c \sqrt{\frac{R}{2\pi\mu}} [\rho_\infty \sqrt{T_\infty} - \rho_s \sqrt{T_s}] \quad (2)$$

Все параметры, входящие в формулу (2), могут быть измерены достаточно точно. Однако до настоящего времени продолжается обсуждение вопроса о том, в какой степени на достоверность экспериментального определения коэффициента конденсации оказывают влияние принятые предположения относительно соотношения интенсивности процессов испарения и конденсации.

Формулой Герца – Кнудсена предусматривается равенство коэффициентов испарения и конденсации, в процессе определения потока массы конденсата на поверхность. Последующие уточнения формулы Герца - Кнудсена для различных

режимов Кнудсена не изменили ее структуру и привели к числовым поправкам коэффициентов конденсации и испарения в пределах одного порядка [4,5].

Параллельно молекулярно – кинетическому подходу используется феноменологическое описание процессов переноса влаги. Существует общий принцип представления потоков интенсивности различных субстанций через поток сил. Для потока импульса это закон Ньютона, потока тепла - закон Фурье, а для потока массы - закон Дальтона:

$$j = K_D(\rho_\infty - \rho_s). \tag{3}$$

Число Дальтона является однозначной характеристикой процесса массопереноса и знания его величины вполне достаточно для решения многочисленных задач динамики тепломассопереноса на межфазных поверхностях различной формы в приложении к техническим и природным явлениям. Об этом свидетельствуют данные по конденсации воды, полученные в наших экспериментах с уточненной методикой учета корректирующих поправок на скорость конденсации. Из представленных на рис. 1 данных измерений следует, что в пределах 17% разброса значений скорость конденсации паров атмосферной влаги на водную поверхность удовлетворяет линейному закону пропорциональности дефициту плотностей пара.

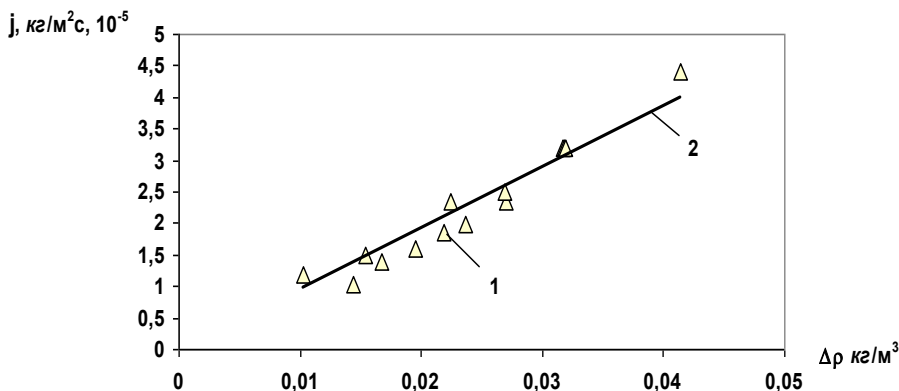


Рис. 1. Скорость конденсации  $j$  (кг/м²с) в зависимости от разности плотностей пара в воздухе и насыщенного водяного пара при температуре поверхности воды  $\Delta\rho = \rho_\infty - \rho_s$  (кг/м³) и влажности воздуха RH (50–80%). 1- эксперимент; 2- расчет по формуле (3) с числом Дальтона  $K_D=0,000974$  м/с.

При этом значения коэффициента конденсации, рассчитанные по формуле Герца - Кнудсена, для тех же условий, без учета корректирующих поправок, оказываются изменяющимися в довольно широких пределах с разбросом до 45 % (рис.2 слева). Причем, характер зависимости отклонений коэффициента конденсации от разности плотностей паров в воды в воздухе неодинаково изменяется при вариациях температур воздуха, воды и влажности.

Из сравнения формул Герца - Кнудсена и Дальтона получаем:

$$K_c = \frac{K_D}{\sqrt{\frac{R}{2\pi\mu} [\rho_\infty \sqrt{T_\infty} - \rho_s \sqrt{T_s}]}} \Delta\rho . \quad (4)$$

Расчет коэффициента конденсации по этой формуле оказывается в удовлетворительном согласии с данными по уточненной методике измерений (см. правый рис.2).

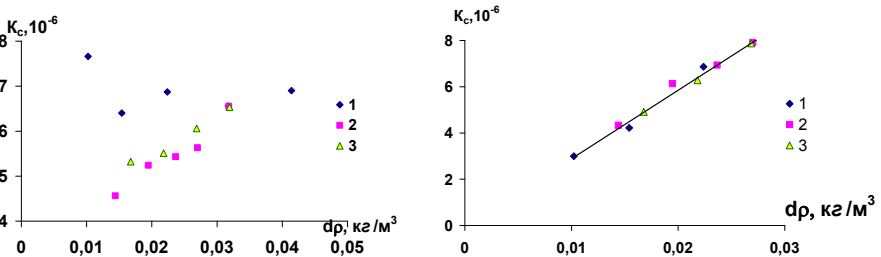


Рис. 2. Зависимость коэффициента конденсации от разности плотностей пара в воздухе. Данные измерений: 1-RH=80%,  $T_\infty=(303-313)K$ ,  $T_s=(288-291)K$ ; 2-RH=80%,  $T_\infty=313K$ ,  $T_s=(281,2-301,2)K$ ; 3-RH=(50-80)%,  $T_\infty=313K$ ,  $T_s=281,2K$ .

Сплошная линия - расчет по формуле (4). Левый рисунок с данными измерений без учета корректирующих поправок на испарение, правый - с измерениями по уточненной методике.

Сравнительный анализ этих данных с результатами, представленными в [6,7], свидетельствует о том, что большая часть хаотического массива значений коэффициента конденсации в системе воздух – вода, отличается величин, полученных в наших экспериментах. Относительно большие расхождения в значениях коэффициента конденсации, вероятнее всего, являются следствием экспериментальных систематических ошибок, связанных с неучтенным вкладом в конденсацию испарения.

Использованный нами прецизионный метод измерения скоростей испарения и конденсации позволил провести сравнительную оценку интенсивности этих двух процессов. Было установлено, что в равновесном режиме до насыщения испарение существенно преобладает над конденсацией. Коэффициент Дальтона для испарения  $K_D = 0,064$  м/с. При существовании условий для конденсации испарение с поверхности воды прекращается. А конденсация осуществляется со скоростью  $K_D = 0,001$  м/с на два порядка меньшей, чем испарение (рис 3). Процесс конденсации является своеобразной крышкой, экранирующий выход молекул в направлении от границы раздела фаз. Как только возникают условия для испарения, начинается интенсивный выход молекул с межфазной границы, при этом интенсивность конденсации существенно снижается. Обнаруженный эффект свидетельствует о значимости определения областей Мирового океана, в которых существуют условия для конденсации применительно к учету процессов тепло-массопереноса в климатических моделях.

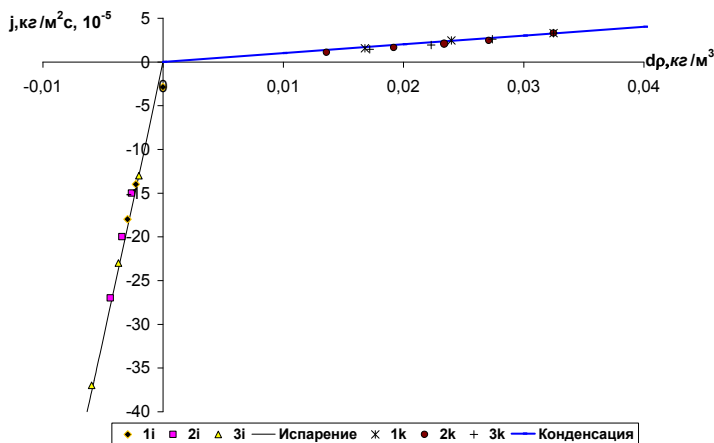


Рис. 3. Скорость испарения и конденсации в зависимости от разности плотностей пара в воздухе и насыщенного водяного пара.

**1i**-RH=80%,  $T_{\infty}=(303-313)\text{K}$ ,  $T_s=(303-313)\text{K}$ ; **2i**-RH=70%,  $T_{\infty}=(303-313)\text{K}$ ,  $T_s=(303-313)\text{K}$  ;

**3i**-RH=80%,  $T_{\infty}=293\text{K}$ ,  $T_s=(293-311)\text{K}$ ;

**1k**-RH=80%,  $T_{\infty}=(303-313)\text{K}$ ,  $T_s=(279,3-282,2)$ ; **2k**- RH =80%,  $T_{\infty}=313\text{K}$ ,  $T_s=(281,2-301,1)\text{K}$ ;

**3k**-RH=(50-80)%,  $T_{\infty}=313\text{K}$ ,  $T_s=281,2\text{K}$ .

Для иллюстрации значимости экранирующего эффекта конденсационных процессов в формировании адекватных моделей взаимодействия атмосферы и океана были выполнены оценки суммарной конденсации для пролива Дрейка. Этот район Мирового океана расположен вблизи зоны Антарктической конвергенции и характеризуется формированием процессов общеклиматической изменчивости. Материалы экспедиционных исследований последнего времени свидетельствуют о существовании высокой относительной влажности по всей площади пролива Дрейка [8].

С использованием экспериментальных значений коэффициента конденсации выполнены оценки суммарной конденсации для пролива Дрейка. Интенсивность потока скрытого тепла от атмосферы к океану, исходя из полученных нами значений коэффициента конденсации может достигать значений порядка  $19,5 \text{ Вт/м}^2$ . Следует отметить, что систематическая ошибка вертикального потока тепла на границе океан–атмосфера порядка  $\pm 5 \text{ Вт/м}^2$  создает неопределенность в межширотном потоке тепла в океане порядка  $0,4 \times 10^{15} \text{ Вт}$ , т.е. почти 100% от самой величины потока [9]. На длительных временных интервалах эффект конденсации будет приводить к более существенным изменениям в термическом режиме океана и уточнению климатических прогнозов глобального потепления.

**Обозначения**

$K_c$  - коэффициент конденсации;  $K_E$  - коэффициент испарения;  $K_D$  - число Дальтона, м/с;  $j$  - плотность потока массы, кг/м<sup>2</sup>с;  $\rho$  - плотность, кг/м<sup>3</sup>;  $p$  - давление, Па;  $T$  - температура, К;  $R=8,57$  Дж/моль·К - универсальная газовая постоянная;  $\mu$  - молекулярная масса, кг/моль;  $n$  - число молекул,  $s$  - индекс жидкости;  $\infty$  - индекс пара.

**Литература**

1. Чечин Д. Г., Репина И.А., Степаненко В.М. Численное моделирование влияния холодной пленки на тепловой баланс и термический режим водоемов // Изв. РАН сер. ФАО. 2010, Т. 46, №4, С.538-550.
2. Крюков А.П., Левашов В.Ю., Павлюкевич Н.В. Конденсация из парогазовой смеси // ИФЖ 2010, Т.83, № N 4, С. 637-644.
3. Соловьев А.А., Чекарев К.В. Экспериментальные исследования конденсации паров атмосферной влаги на водную поверхность // Физические проблемы экологии. №16. М.: Макс Пресс, 2009. С.252-262.
4. Кучеров Р.Я., Рикенглаз Л.Э. К вопросу об измерении коэффициента конденсации // Доклады АН СССР. 1960, Т.133, Вып.5, С.1130-1131.
5. Kryukov A.P., Levashov V.Yu. About evaporation–condensation coefficients on the vapor–liquid interface of high thermal conductivity matters // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2011, V. 54, P.3042–3048.
6. Marek R, Straub J. Analysis of the evaporation coefficient and the condensation coefficient of water // Journal of Heat and Mass Transfer. 2001, V. 44, P.39–53.
7. Davis E.J. A history and state-of-the-art of accommodation coefficients// Atmospheric Research/ 2006, V. 82, P. 561–578.
8. Соловьев Д.А., Нигматулин Р.И. Исследование явления весеннего термического бара методами математического и лабораторного моделирования // Доклады Академии наук. 2010, Т. 434, N 4, С. 544-548.
9. Артамонова А.Ю., Бучнев И.А., Репина И.А. Взаимодействие атмосферы с подстилающей поверхностью в летний период в зоне Антарктической конвергенции // Проблемы Арктики и Антарктики. 2007, Т.44, С.14-23.



## ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ПРИПОВЕРХНОСТНОЙ КОНДЕНСАЦИИ В АТЛАНТИЧЕСКОМ ОКЕАНЕ

Соловьев Д.А., Александрова М.П.

*Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт  
океанологии им. П.П. Ширшова Российской академии наук*

В современных оценках взаимодействия океан-атмосфера до сих пор остается количественно неопределенная составляющая энерго- и влагообмена, которая связана с конденсацией атмосферной влаги на водную поверхность. В значительной степени это связано с трудностями теоретического и экспериментального определения величины приводной конденсации и отделения ее доли от других приходных составляющих водного баланса. Использование расчетных методов влагообмена характеризуется также сложностью учета особенностей молекулярно-кинетических и гидродинамических процессов на границе раздела океан-атмосфера. Влагообмен между океаном и атмосферой берет свое начало на водной поверхности и проходит через приводный воздушный слой. Перенос влаги в приводном слое осуществляется в условиях существенного отклонения термодинамического равновесия на границе вода - воздух и потому обладает сложной структурой, в формировании которой изначальный вклад вносят процессы молекулярной диффузии и теплопроводности. Поэтому, изучение термической и плотностной структуры процессов тепло и влагообмена вблизи границы приводного слоя атмосферы позволяет углубить и расширить представления о сложных процессах тепло- и массообмена между океаном и атмосферой.

Число исследований, посвященное определению характеристик турбулентного переноса импульса, тепла и влаги в приводном слое достаточно велико. При этом изучению конденсационной составляющей молекулярного влагообмена в приводном слое атмосферы уделяется весьма незначительное внимание. Результаты, полученные в них весьма противоречивы, и не дают ответа на вопрос о причине расхождения модельных и экспериментальных данных и значимости влияния конденсации на энергообмен между океаном и атмосферой. Для решения этой задачи необходимо непосредственное измерение конденсации в пограничном приводном слое воздуха, примыкающем к водной поверхности при различных температурных и влажностных характеристиках сред и последующая параметризация энергообмена внешними условиями.

В экспедиции 35-го рейса НИС «Академик Иоффе» предусматривалось проведение научно-исследовательских работ по изучению процессов приповерхностной конденсации на пути следования судна из порта Галифакс (Канада) до порта Монтевидео (Уругвай). Дата выхода судна из порта Галифакс 23 сентября 2011 г. Окончание рейса в порту Монтевидео 20 октября 2011 г. Схема маршрута 35 рейса представлена на рис. 1.

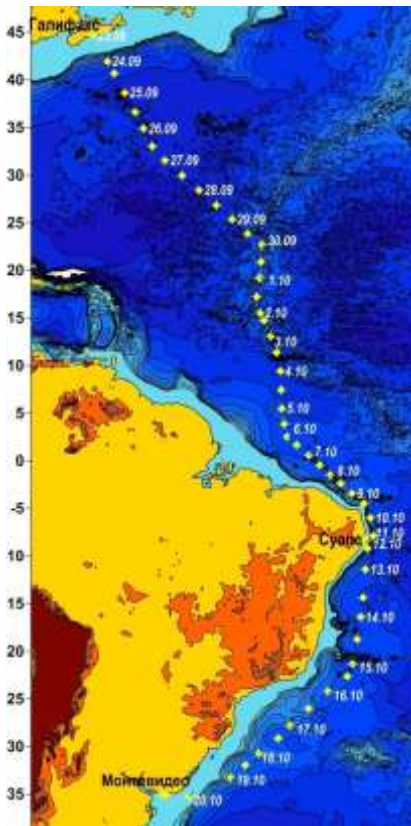


Рис.1 Схема маршрута 35 –го рейса НИС «Академик Иоффе».

В ходе рейса исследовались режимы и условия возникновения процессов приповерхностной конденсации. Такие процессы могут происходить в зонах апвеллинга в результате понижения температуры воздуха около поверхности при интенсивном подъеме холодных глубинных вод. Стоит отметить, что до сих пор роль этих процессов в водном балансе Земли считалась незначительной. В то же время в районах распространения апвеллинга эти процессы могут оказывать значительное влияние на влагообмен между океаном и атмосферой. При этом следует иметь в виду апвеллинг достаточно распространенное явление в океане. Он не редко наблюдается в прибрежной и экваториальной зонах, а так же может быть вызван прохождением тропических циклонов. Осадкомеры и дисдрометры (измеритель дождевых капель - прибор, используемый для захвата жидких гидрометеоров и расчета распределения их диаметров) традиционно используемые при метеонаблюдениях не позволяют проводить исследование процессов приповерхностной конденсации. В

связи с этим для проводимых измерений одновременно использовался комплекс электронно-цифровых приборов, включающий в себя гигрометры, ИК-измеритель температуры и TDS –мультиметр.

Научная программа рейса предусматривала проведение измерений на меридиональном разрезе от 42N до 42S (23.09.2011- 20.10.2011) по маршруту следования судна из Галифакса в Монтевидео. Накопленный массив данных о температуре воды, относительной влажности и температуре воздуха (в том числе вблизи поверхности океана) по маршруту движения судна дает возможность непосредственно определить гидрометеорологические условия, а также зоны, наиболее благоприятные для конденсации влаги вблизи поверхности океана.

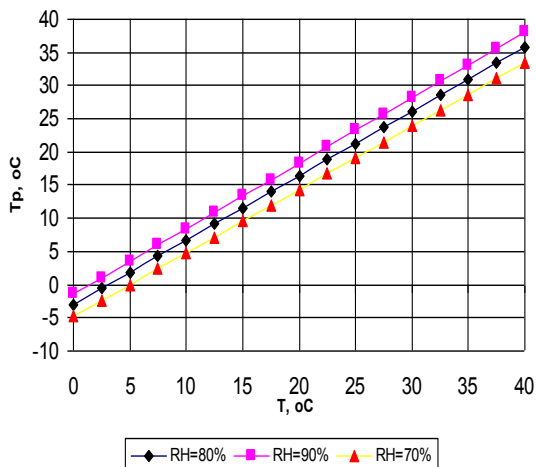


Рис.2. Температура начала конденсации (точка росы)  $T_p$  при относительной влажности воздуха  $RH = 70, 80$  и  $90\%$ .

Температура начала конденсации (точка росы) определяется относительной влажностью воздуха (рис.2.). Чем выше относительная влажность, тем температура конденсации будет выше и ближе к фактической температуре воздуха.

На рис. 3. (б) видно, что относительная влажность воздуха по утрам в отдельные дни (25.09; 30.09; 4.10; 15.10; 16.10) достигала 80-90%. Высокие утренние значения относительной влажности обусловлены, главным образом, ночным охлаждением воздушных масс, вблизи поверхности океана (рис.3.,(а)). При этом изобарически охлажденный водяной пар, содержащийся в воздухе, становится насыщенным по отношению к воде, что приводит к его конденсации. Температуры начала конденсации определяется формулой:

$$T_p = \frac{b\gamma(T, RH)}{a - \gamma(T, RH)}, \text{ где} \quad \gamma(T, RH) = \frac{aT}{b+T} + \ln(RH)$$

где,  $T_p$  - точка росы,  $a = 17,27$  °C,  $b = 237,7$  °C,  $T$  - температура в градусах Цельсия,  $RH$  - относительная влажность в объёмных долях ( $0 < RH < 1.0$ ),  $\ln$  — натуральный логарифм.

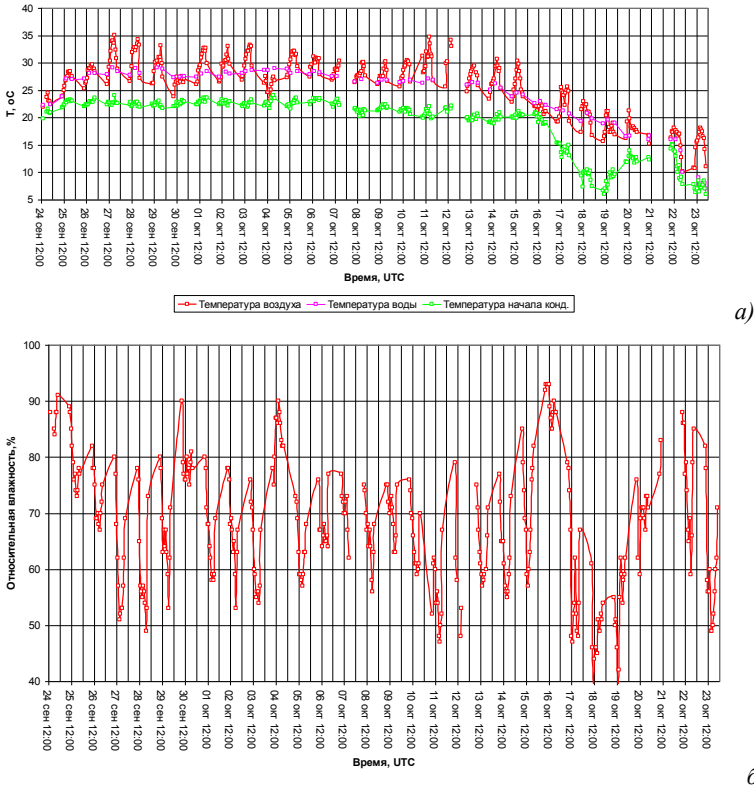
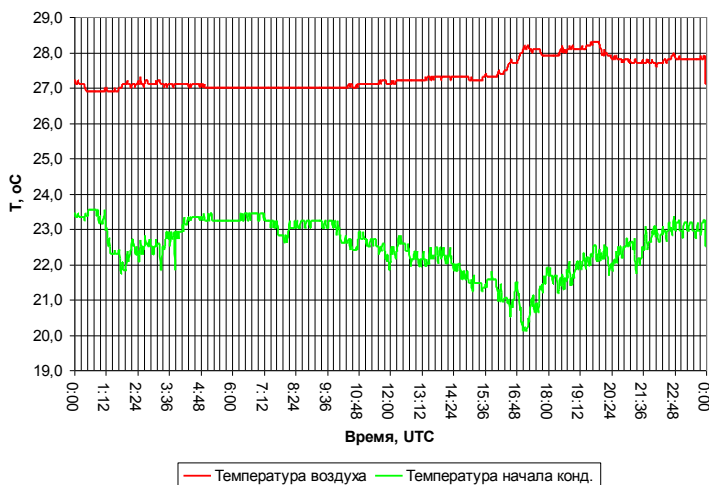
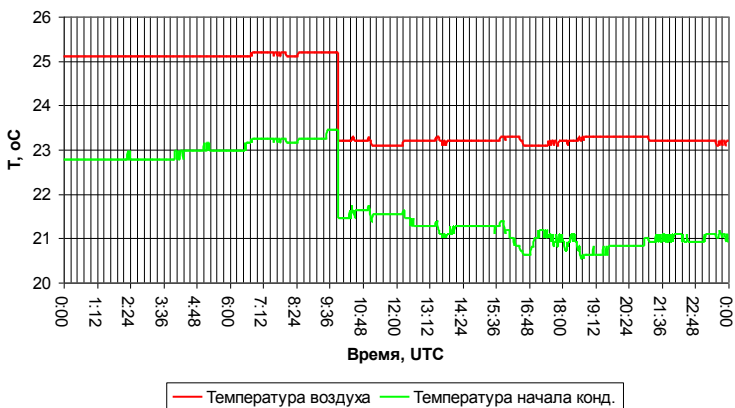


Рис.3. График регистрации изменения (а) - температуры воздуха, температуры начала конденсации и температуры забортной воды, (б) – относительной влажности воздуха.

С восходом солнца температура воздуха постепенно возрастает (рис. 4). При этом дефицит точки росы ( $\Delta T_p = T - T_p$ ) увеличивается, а относительная влажность воздуха снижается. По маршруту движения судна можно условно выделить 2 широтные зоны, где отмечались наиболее выраженные процессы приповерхностной конденсации. Границы этих зон лежат в пределах от  $39^\circ$  до  $23^\circ$  северной и от  $23^\circ$  до  $35^\circ$  южной широты. В экваториальной зоне маршрута судна перепад между значениями температуры воды и воздуха был менее выражен, что способствовало увеличению дефицита точки росы.



a)



б)

Рис.4. Пример суточной регистрации (а) - температуры воздуха и температуры начала конденсации 27.09.2011, (б) - температуры воздуха и температуры начала конденсации 16.10.2011

На рис.4. показан пример суточной регистрации температуры воздуха и температуры начала конденсации при различном состоянии условий облачности (27.09.11 и 16.10.11). День 27 сентября характеризовался наблюдением незначительного количества облачности. День 16 октября 2011 года, характеризовался условиями сплошной плотной облачности, которая практически не давала просветов на небе (рис.4.). Температура поверхности заборной воды в этот день изменялась в пределах 0,5 °С в интервале времени между 8 и 20 ч. На рис.4. (б) видно, что около 10 часов утра происходит скачкообразное снижение

температуры воздуха примерно на  $2^{\circ}\text{C}$ . При этом дефицит точки росы снижается до нуля и происходит интенсивная конденсация водяного пара вблизи поверхности океана. Величина конденсации при снижении температуры на величину  $2^{\circ}\text{C}$  может составлять до 10% от уровня фактического содержания водяного пара в ед. объема воздуха на уровне моря (для  $T=25^{\circ}\text{C}$  уровень максимального содержания водяного пара в воздухе составляет примерно 2,3%).

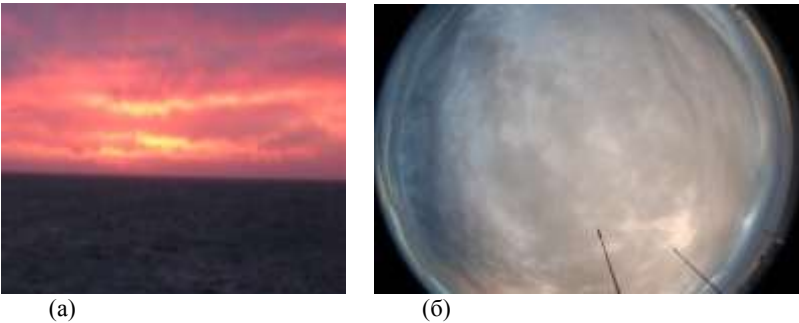


Рис.5. Пример окраски зари (а) и состояние облачности (б) 23.10.2011 9:00 UTC при высоком уровне конденсации ( $39,00,57\text{S};56,37,78\text{W}$ ), влажность воздуха 82%,  $\Delta T_p=2,9^{\circ}\text{C}$ , тип облаков – Слоисто-кучевые просвечивающие (Sc. trans.)

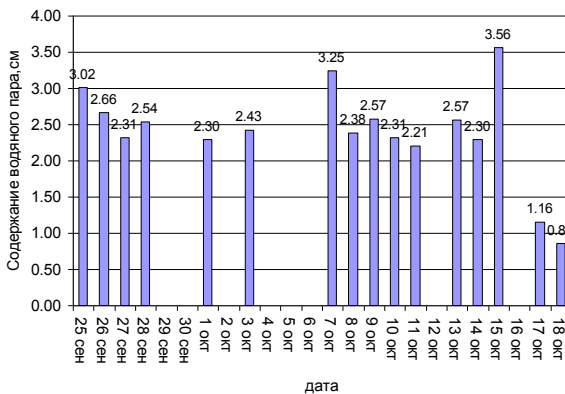


Рис.6. Содержание водяного пара в вертикальном столбе воздуха в атмосфере.

В ходе рейса были проведены также визуальные наблюдения, позволяющие судить о характере конденсации. Известно, что о характере конденсации можно судить по окраске зари при восходе и закате солнца. Цвет зари зависит от содержания в воздухе водяных паров и пыли. Воздух, сильно насыщенный влагой, преимущественно пропускает красные лучи (рис.5.). Такая картина окраски зари, как правило, отмечалась при дефиците точки росы  $\Delta T_p \leq 3^{\circ}\text{C}$ . Интенсивная ярко-

желтая, золотистая и розовая окраска вечерней зари свидетельствует о малом содержании влаги и большом количестве пыли в воздухе, что указывает на низкую конденсацию.

При конденсации влаги, приносимой на холодное водное зеркало воды нагретым воздухом. На высоте 100-150 м над поверхностью отмечалась густая облачность, которая на еще большей высоте преобразуется в кучевые облака.

Результаты измерений общего содержания водяного пара в атмосфере, выполненные с использованием озонметра MICROTUPS II показаны на рис. 6. Прибор позволял делать измерения только в условиях, когда вблизи Солнца отсутствовала облачность. Представлены данные, полученные по маршруту следования Галифакс -Монтевидео. Обращает на себя внимание то, что распределение максимального содержания водяного пара в воздухе качественно соответствует распределению относительной влажности воздуха (рис. 3., б).

Важно отметить, что относительная влажность воздуха в некоторых областях маршрута стабильно держится рядом с отметкой 80-90%. Высокие утренние значения относительной влажности обусловлены, главным образом, ночным охлаждением воздушных масс, вблизи поверхности океана (рис.3., а б). При этом изобарически охлажденный водяной пар, содержащийся в воздухе, удерживается насыщенным по отношению к воде, что приводит к его конденсации.

Конденсация на водную поверхность во всех областях маршрута, как следует из приведенных выше результатов измерений, происходит систематически на протяжении всего пути судна. Этот факт дает основание для количественных оценок в данной локальной местности составляющей приводной конденсации.

По данным усредненных суточных измерений за 20 октября 2011 г. выполним оценку величины дополнительного (за счет приповерхностной конденсации) притока пресной воды в заливе Заливе Ла –Плата (35,06,41S; 63,13,60W) , площадью около 25 тыс. км<sup>2</sup> с использованием формулы Герца-Кнудсена [1]:

$$j = \beta \sqrt{\frac{R}{2\pi}} [\rho_{\infty} \sqrt{T_a} - \rho_s \sqrt{T_s}].$$

Здесь,

$j$  - плотность потока сконденсировавшейся массы воды в кг/м<sup>2</sup> ·сек;

$\rho_s$  - плотность паров при температуре поверхности воды  $T_s$  ( взята из таблицы в кг/м<sup>3</sup>);

$\rho_{\infty}$  - плотность паров воды при температуре воздуха рассчитывается по температуре насыщенных паров для температуры воздуха  $T_{\infty}$  и относительной влажности  $RH$  т.е  $\rho_{\infty} = RH \cdot \rho_{\text{нп}\infty}$  в кг/м<sup>3</sup> ;

$T_s$  - температура воды в градусах Кельвина;

$R$ -универсальная газовая постоянная ( $R=8,31$  Дж/моль ·град);

$T_{\infty}$  - температура воздуха в градусах Кельвина

$\beta$ -коэффициент конденсации-испарения, обычно принимается равным единицы или 0,6 (это значение до сих пор предмет дискуссии);

Расчеты показывают, что плотность потока сконденсировавшейся массы воды в заданной точке залива оказывается равной  $4 \cdot 10^{-6}$  мм / м<sup>2</sup>·сек (10,4 мм/м<sup>2</sup>·мес.), в то время как среднемесячная величина испарения в заливе по данным Атласа теплового баланса в октябре составляет величину порядка 50 мм/м<sup>2</sup>·мес. [4]. Как можно заметить величины вполне сопоставимые, однако в современных климатических моделях при параметризации водного баланса конденсация не учитывается. В то же время эффект конденсации на водную поверхность для данной локальной области играет существенную роль при формировании уровня океанических вод и солености воды, так как происходит поверхностное опреснение. Учет конденсации необходим и при параметризации теплового баланса в моделях климата. Интенсивность потока скрытого тепла от атмосферы к океану, исходя из полученных нами значений коэффициента конденсации для залива Ла –Плата, может составлять в соответствии с данными наших измерений величину порядка до 10% от величины всего потока [3]. А на длительных временных интервалах эффект конденсации будет приводить к более существенным изменениям в термическом режиме океана и возможным систематическим ошибкам в межширотном потоке тепла в океане. Таким образом, для подобных областей Мирового океана необходима коррекция параметризации составляющих водного и теплового баланса с учетом явления приповерхностной конденсации.

### Литература

1. Коган М.Н. Динамика разреженного газа. М.: Наука, 1967. 440 с.
2. Львович М. И. Элементы водного режима рек земного шара М.: Изд-во «Свердловск — Москва», 1945. 57 с.
3. Чечин Д. Г., Репина И.А., Степаненко В.М. Численное моделирование влияния холодной пленки на тепловой баланс и термический режим водоемов // Изв РАН сер ФАО, Т 46, №4, 2010. С.538-550.
4. Атлас теплового баланса. Под редакцией М.И. Будыко. Л.: Главная Геофизическая обсерватория им. А.И. Военкова. 1955. 41 с.



## ВОДНЫЕ РЕСУРСЫ ДЛЯ ЦЕЛЕЙ ЭНЕРГЕТИКИ: ЭФФЕКТИВНОСТЬ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ

Соловьев Д.А., Нигматулин Р.И.

*ФГБУН Институт океанологии им. П.П. Ширшова Российской академии  
наук*

Современное существование человека напрямую зависит от наличия водных ресурсов и энергии разнообразных видов и форм. Энергия и вода неразрывно связаны между собой. Многие источники энергии нуждаются в воде для производственных процессов, таких, как добыча сырья, охлаждение на электростанциях, выращивание культур для производства биотоплива, работы турбин ГЭС и т.д. С другой стороны, энергия требуется, чтобы водные ресурсы были доступны людям для использования и потребления в быту, на водном транспорте, с целью опреснения воды и орошения полей. Эта двусторонняя взаимозависимость энергии и водных ресурсов к сожалению достаточно уязвима. Задача управления этой взаимосвязью опирается на внешние факторы, влияние которых может быть оценено, но полностью учесть их не представляется возможным.

Изменение климата является центральным внешним фактором, который влияет как на воду, так и на энергию напрямую. Меры по смягчению последствий изменения климата концентрируются вокруг сокращения потребления энергии и выбросов углекислого газа, в то время как адаптация к этим изменениям означает, что нужно учитывать так же усиление гидрологической изменчивости и экстремальных погодных явлений, включая наводнения, засухи и шторма.

Другой немаловажный фактор, создающим внешнее напряжение в этой сфере - демографический рост, так как с увеличением численности населения и миграций, а также с повышением экономической активности и уровня жизни, будет генерироваться всплеск потребления энергии и воды.

В настоящее время практически во всех секторах энергетики потребности в воде при производстве электроэнергии постоянно возрастают (Рис.1).

На тепловых электростанциях (уголь, газ, нефть, биомасса, геотермальная энергия или уран) выработка электроэнергии происходит при нагревании воды или пара, при прохождении их через турбины для привода электрических генераторов. После прохождения через турбины, вода в паровом цикле охлаждается в градирнях, затем идет в конденсатор и используется вторично. На технологические процессы генерации, с участием воды в настоящее время приходится 78% мирового производства электроэнергии (EIA 2010 [3]), и ожидается, что цифра будет расти, т.е. еще больше воды потребуется для охлаждения.

Значения расхода воды для таких тепловых электростанций варьируются в зависимости от различных существующих технологий и источников топлива, а

также климатических различий, влияющих на испарение и выбор процесса охлаждения.

Гидроэнергетика использует возобновляемые источники электроэнергии в большом объеме (15% мирового производства в 2007 году), считается, что на две трети ее мировой экономически обоснованный потенциал еще не исчерпан (WEC 2010 [4]). Основные потери воды в гидроэнергетике происходят за счет ее испарения из накопительных водохранилищ. Большинство последних исследований в США на эту тему отмечают диапазон потерь от 0,04 до 210 м3 на 1 МВт\*ч.

На ветровые и солнечные фотоэлектрические преобразователи в настоящее время приходится 3% мирового производства электроэнергии. Во время работы ВЭС вода практически не используется, за исключением, мытья поверхности солнечных батарей. Тем не менее, потребность в воде для этих целей может быть значительной, особенно в районах с засушливым климатом. Кроме того, в случае крупномасштабного развертывания концентраторов солнечной энергии (солнечных водонагревателей), производство электроэнергии потребует использования водяного пара, как и в случае с тепловыми электростанциями и, следовательно, охлаждения водой.

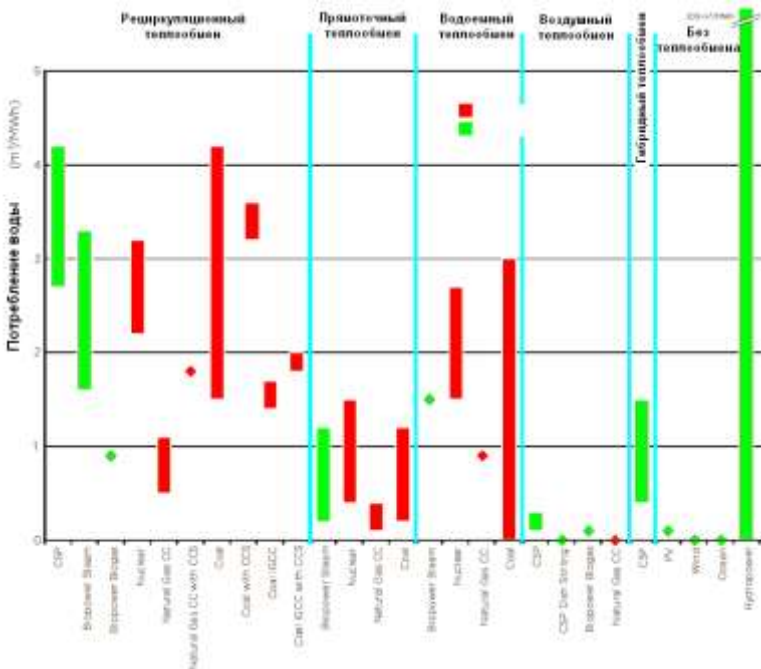


Рис.1. Уровень потребления воды при производстве энергии, с использованием различных технологий. Источник: Trends in the demand of water for energy. IPCC 2011, fig. 914. p. 49., [1].

В настоящее время существует устойчивая тенденция возрастания потребления электроэнергии во всех регионах мира, причем наиболее сильно это увеличение происходит в ряде стран не входящих в ОЭСР, ситуация в дальнейшем весьма негативно скажется на водных ресурсах необходимых для производства этой энергии [2].

Таблица 1 показывает, что ожидаемые потребности в воде для производства энергии вырастут на 11,2% в 2050 году при сохранении нынешних режимов потребления.

Таблица 1.

Численность населения, потребление энергии и потребление воды для нужд энергетики в мире, 2005-2050 гг.

	2005 г.	2020 г.	2035 г.	2050 г.
Население (млн.)	6290	7842,3	8601,1	9439,0
Потребление энергии (Экса Дж)	328,7	400,4	464,9	518,8
Потребление энергии (ГДж / на душу населения)	52,3	51,1	54,1	55
Вода для энергии (млрд. м <sup>3</sup> /год)	1815,6	1986,4	2087,8	2020,1
Вода для энергии (м <sup>3</sup> / на душу населения)	288,6	253,3	242,7	214,0

Источник: WEC (2010, table 1, p. 50), [4].

Таблица 2.

Численность населения, потребление энергии и потребление воды для нужд энергетики в мире, с учетом повышения энергоэффективности, 2005-2050 гг.

	2005 г.	2020 г.	2035 г.	2050 г.
Население (млн.)	6290	7842,3	8601,1	9439,0
Потребление энергии (Экса Дж)	328,7	364,7	386,4	435,0
Потребление энергии (ГДж / на душу населения)	52,3	46,5	44,9	46,1
Вода для энергии (млрд. м <sup>3</sup> /год)	1815,6	1868,5	1830,5	1763,6
Вода для энергии (м <sup>3</sup> / на душу населения)	288,6	238,3	212,8	186,8

Источник: WEC (2010, table 2, p. 51), [4].

В рамках сценария WEC (2010) [4], который предполагает увеличение производства энергии и к. п. д. энергоустановок считается, что потребность в воде для производства энергии может снизиться на 2,9% до 2050 года (таблица 2.).

Водные ресурсы распределены неравномерно по всей планете, и, соответственно, отдельные регионы столкнутся с существенной нехваткой воды для выработки энергии. В этой связи, WEC (2010) приводит оценки, свидетельствующие о том, что этот сценарий будет иметь место на большей части Северной и Южной Америки и в Карибском бассейне.

Как видно из Таблицы 3, очистка сточных вод также требует большого количества энергии (WEF) [5]. Развитые страны, имеющие более строгие законы в отношении сброса и очистки сточных вод, обладают, как правило, более энергоэффективными технологиями очистки последних.

Биофильтры, использующие биологически активные субстраты для аэробной очистки, потребляют в среднем свыше 250 кВт\*ч.

Таблица 3.

Средний уровень расхода электроэнергии на добычу и очистку воды (США).

	Источник воды/ технология очистки	Расход электроэнергии (кВт*ч/млн.л.)
<b>Чистые воды</b>	Поверхностные воды	60
	Подземные воды	160
	Подземные (солончатые) воды	1000-2600
	Морская вода	2600-4400
<b>Сточные воды</b>	Биофильтрация	250
	Активный ил	340
	Очистка без хлорирования	400
	Очистка с хлорированием	500

Источники: CEC (2005); EPRI (2002); Stillwell (2010); Stillwell et al. (2010, 2011).

Применение технологии фильтрации «Активного ила», является более энергоемкой формой очистки сточных вод, требующей 340 кВт\*ч из-за использования насосов и специального оборудования. Системы фильтрации, для высококачественной очистки, требуют до 400-500 кВт\*ч электроэнергии.

В свою очередь, осадок сточных вод путем анаэробного сбраживания возможно использовать для производства энергии путем создания биогаза, возобновляемого топлива, которое может быть использовано для компенсации до 50% затрат электроэнергии, потребляемой для очистки.

Все процессы управления и использования воды требуют значительных энергозатрат, так, например, в сельском хозяйстве энергия находит свое применение для орошения полей. В странах ОЭСР энергия, затраченная на орошение, составляет небольшую долю от общей энергии, потраченной на операции с водой (нагрев, первичная очистка и утилизации сточной воды). Однако страны не входящие в ОЭСР затрачивают на орошение значительную долю электроэнергии. Не исключено, что повышение энергоэффективности и развитие новых «водных» технологий в будущем компенсирует ожидаемый рост энергопотребления, необходимый для перехода на более высокие стандарты очистки стоков. Весьма вероятно, что в стоимость производства электроэнергии будут включаться затраты на регенерацию потребляемой для этих целей воды.

Ужесточающиеся требования к качеству воды для нужд растущего количества населения, а также нехватка чистой воды будет обязывать страны постоянно искать и изучать нетрадиционные источники воды, требующие для своего использования привлечения значительных энергетических ресурсов. Таким образом, в то время как технологии постоянно становятся все более энергоэффективными, выигрыш в эффективности рискует быть компенсированным увеличением потребности в энергии для доставки воды из таких нетрадиционных источников, или очистки воды, которая имеет более низкое качество.

Как отмечалось выше, глобальное потребление энергии для производства воды резко возрастет в течение следующих двух десятилетий. Эта тенденция в первую очередь зависит от экономического роста и роста населения в развивающихся странах. Основной задачей в области водных ресурсов и энергии будет устойчивое обеспечение формирующейся новой энергетической цивилизации водными ресурсами для того, чтобы удовлетворить растущие ресурсные запросы, в том числе энергетические. Решение этой задачи потребует создания новой политики для обеспечения более эффективного и интегрированного управления водными ресурсами для целей новой энергетики. Первый шаг на пути такой политики - это комплексная оценка доступных ресурсов воды. Затем, водная и энергетическая политика, должны будут напрямую интегрироваться в общую стратегию устойчивого развития в тесном взаимодействии между собой.

Энергия, генерируемая за счет воды - гидроэнергия, наряду с другими возобновляемыми источниками энергии, такими, как энергия ветра, солнца, приливов, биоэнергия, геотермальная энергия, может стать более устойчивой в экологическом отношении, не ведущей к загрязнению окружающей среды и альтернативой ископаемым энергоносителям. В совокупности за счет этих источников в настоящее время покрывается около 14 % мирового первичного спроса на энергию. Малая гидроэлектроэнергетика хорошо подходит для энергообслуживания не охваченных крупными энергосистемами сельских районов, тогда как другие возобновляемые источники энергии, например ветровые и солнечные генераторы и установки, работающие на биомассе, целесообразно применять для электроснабжения насосов, качающих грунтовую воду для питья и мелкомасштабного орошения в отдаленных сельских районах или небольших селениях.

Значительный потенциал имеет и расширение крупномасштабной гидроэлектроэнергетики в развивающихся странах, не входящих в ОЭСР. Тем не менее, сооружение крупных плотин чревато тяжелыми экологическими последствиями для сред обитания диких биологических видов, миграции рыб и объемов и качества водотока, равно как и серьезными социально-экономическими последствиями, связанными с необходимостью переселения местного населения.

Еще одной существенной проблемой, ждущей своего решения, является финансирование инфраструктуры, необходимой для предоставления базовых услуг водо- и электроснабжения в развивающихся странах. Без надежной энергетической инфраструктуры и стабильного электроснабжения потенциал для экономического роста здесь ограничен.

Решение проблемы для таких стран нужно искать в создании малых автономных гидроэнергетических систем, которые, как правило, оказывают небольшое воздействие на окружающую среду и могут оказаться особенно полезными в сельских и отдаленных районах. При проектировании любых гидроэнергетических систем, как крупных, так и мелких, исключительно важно проводить еще на этапе планирования подробную экспертизу экологических и социально-экономических последствий.

### Литература

1. IPCC Fourth Assessment Report: Climate Change 2007 (AR4) IPCC statement on the melting of Himalayan glaciers - 20 January 2010.
2. Managing Water under Uncertainty and Risk, the United Nations world water development report 4. Vol. 1. Published in 2012 by the United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization, Paris 07 SP, France. 909 p.
3. Annual Energy Outlook 2012/ June 25, 2012 Report Number: DOE/EIA-0383(2012)
4. Survey of Energy Resources 2010/ 22nd edition of the World Energy Council's (WEC). November 2010. URL: <http://www.worldenergy.org/publications/3040.asp>
5. World Economic Forum Annual Report 2010-2011. URL: <http://www.weforum.org/reports-results>

## МОНИТОРИНГ ВЕРТИКАЛЬНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ОЗОНА НА МИЛЛИМЕТРОВЫХ ВОЛНАХ НАД МОСКВОЙ ПРИ ВОЗМУЩЕ- НИЯХ ОЗОНОСФЕРЫ в 2010 и 2011 гг.

С.В.Соломонов, Е.П.Кропоткина, С.Б.Розанов, А.Н.Игнатьев, А.Н.Лукин

*Физический институт им П.Н.Лебедева РАН*

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Мониторинг вертикального распределения атмосферного озона представляет особую важность в связи с исключительной ролью этой газовой составляющей в защите жизни на Земле от губительного УФ-Б излучения Солнца [1]. Озон является также одной из ключевых газовых составляющих, участвующей в тепловых, химических и динамических атмосферных процессах [1]. Радиофизические методы дистанционного зондирования земной атмосферы, основанные на измерении собственного теплового радиоизлучения атмосферных газов на миллиметровых (ММ) волнах, открыли новые возможности в изучении атмосферы и её озонового слоя. Эти методы развиваются в нашей стране [2-6] и за рубежом [7-9]. В Физическом институте им. П.Н.Лебедева (ФИАН), начиная с 1987 года, выполняется многолетний мониторинг на миллиметровых (ММ) радиоволнах вертикального распределения озона над Московским регионом. Дистанционные измерения вертикальных профилей озона на ММ волнах с поверхности Земли характеризуются рядом уникальных особенностей. Действительно, в отличие от оптических наблюдений, такие измерения могут выполняться круглосуточно при различных погодных условиях, поскольку для радиоволн характерно много более слабое, чем в оптическом диапазоне, ослабление в облаках и аэрозольных слоях. Измерения вертикального распределения озона (ВРО) на ММ волнах с Земли позволяют по-

лучать надёжную информацию о содержании озона и его изменениях в широком диапазоне высот, в стратосфере и мезосфере, включая труднодоступные верхние слои мезосферы в районе мезопаузы. По предельным высотам радиофизические методы существенно превосходят традиционные оптические, а также методы измерения с помощью шаров-озонзондов и лидаров. Задачей измерений ВРО, проводимых в ФИАН, является исследование откликов озоносферы на протекающие атмосферные процессы [3]. Одной из важных задач таких исследований является изучение «отклика» озоносферы на сильные (мажорные) стратосферные потепления, которые нарушают зимнюю циркуляцию стратосферы. Изменение частоты и характера таких потеплений может повлиять на содержание стратосферного озона и на климат тропосферы [1, 10].

В данной работе представлены радиофизические методы наблюдений атмосферного озона, проводимых в ФИАН на ММ волнах, и результаты исследований вертикального распределения озона над Москвой во время значительных возмущений при среднезимнем стратосферном потеплении в 2010 г., а также в период сильного истощения озонового слоя в высоких широтах Северного полушария весной 2011 г.

## 2. МЕТОДЫ И АППАРАТУРА

Измерения вертикального распределения озона на миллиметровых волнах проводятся в ФИАН с помощью высокочувствительной спектральной аппаратуры. Регистрируется вращательная спектральная линия озона с центром на частоте 142,175 ГГц. Эта линия уширена столкновениями молекул, она содержит информацию о высотном распределении содержания озона в стратосфере и мезосфере. По форме регистрируемой спектральной линии, которая чувствительна к профилю ВРО, можно решить обратную задачу - восстановить вертикальный профиль содержания озона в стратосфере и мезосфере. Для решения этой задачи использован предложенный К.П.Гайковичем алгоритм [11], основанный на методах Тихонова [12] и статистической регуляризации [13].

Соотношение между яркостной температурой  $T_B$  спектра теплового радиоизлучения озона и его высотным профилем концентрации  $U(h)$  после вычитания вклада других атмосферных составляющих может быть представлено в виде интеграла

$$T_B(\nu) = \int_0^{\infty} U(h) K(U, \nu, \theta, h) dh, \quad (1)$$

где  $\mathbf{K} = K(U, \nu, \theta, h)$  - нелинейное ядро уравнения (1),  $\nu$  и  $\theta$  - частота и угол, под которым принимается излучение.

Высотный профиль распределения озона восстанавливается в результате решения (1) как нелинейного интегрального уравнения. В этом алгоритме на каждом шаге итерационного процесса интегральное уравнение Фредгольма 1-го рода решается методом обобщенной невязки Тихонова [12]. Метод решения этой некорректной обратной задачи, подробно описанный в [11, 14], успешно использовался при многолетних систематических наблюдениях динамики озоносферы над Москвой. Принимая во внимание, что правая часть (1) известна с погрешностью

$\delta$ , итерационный алгоритм для решения уравнения (1) как нелинейной задачи в операторном виде записывается следующим образом

$$\mathbf{K}^{(n)} U^{n+1} = T_B^\delta, \quad (2)$$

где оператор  $\mathbf{K}^{(n)} = \mathbf{K}(U^n, \nu, h)$ , а в качестве первого приближения  $U^1(h)$ , которым может служить произвольная функция, используется модельный профиль концентрации озона.

В качестве альтернативного метода в этот алгоритм включён статистический подход к регуляризации задачи (1). При этом интегральное уравнение (2) сводится к системе уравнений с выделенным вектором ошибки:

$$\sum_{i=1}^N k_{ji}^{(n)}(h_i, \nu_j) u_i^{(n+1)}(h_i) = T_{Bj}^\delta(\nu_j) - \delta_j, \quad j = 1, 2, \dots, M. \quad (3)$$

Обозначая  $\mathbf{u} = [u_1, u_2, \dots, u_N]^*$ ,  $\mathbf{T}_B^\delta = [T_{B1}^\delta, T_{B2}^\delta, \dots, T_{BM}^\delta]^*$ ,  $\delta = [\delta_1, \delta_2, \dots, \delta_M]^*$ ,  $\mathbf{K} = k_{ji}$ ,  $i = 1, 2, \dots, N$ , где  $(*)$  - матричное транспонирование, запишем (2) в матрично-векторной форме:

$$\mathbf{T}_B^\delta = \mathbf{K}\mathbf{u} + \delta, \quad (4)$$

где относительно вектора ошибки  $\delta$  предполагается, что он имеет нормальное распределение с нулевым средним и заданной ковариационной матрицей.

В данной работе применялся вариант статистической регуляризации, основанный на методе максимального правдоподобия, который использовался ранее при решении ряда задач дистанционного зондирования атмосферы (см., например, [7, 11]). В нем предполагается, что распределения вектора атмосферного параметра и ошибок являются гауссовыми и независимыми друг от друга. Тогда их совместное распределение вероятностей распадается на произведение, условие максимума которого при заданном векторе данных даёт искомую формулу для оценки  $\hat{\mathbf{u}}$  искомого решения:

$$\hat{\mathbf{u}} = \langle \mathbf{u} \rangle + \mathbf{B}_u \mathbf{K}^* (\mathbf{K} \mathbf{B}_u \mathbf{K}^* + \mathbf{B}_\delta)^{-1} (\mathbf{T}_B^\delta - \langle \mathbf{T}_B^\delta \rangle) \quad (5)$$

где  $\langle \dots \rangle$  - среднее по ансамблю,  $\mathbf{B}_u = \langle (u_i - \langle u_i \rangle)(u_j - \langle u_j \rangle) \rangle$ ,  $\mathbf{B}_\delta = \langle \delta_i \delta_j \rangle$ ,  $\langle \delta(v_i) \rangle = 0$ .

Таким образом, при решении обратной задачи могут использоваться и метод Тихонова, и метод статистической регуляризации (5). Оказалось, что использование метода статистической регуляризации имеет преимущество по скорости решения обратной задачи на персональном компьютере и по точности на высотах нижней стратосферы (12–20 км) по сравнению с алгоритмом метода Тихонова. Вместе с тем, для восстановления сложных (деформированных) вертикальных распределений озона алгоритм с использованием метода Тихонова даёт лучшие



результаты. Поэтому сочетание этих двух методов позволяет оптимизировать решение задачи восстановления ВРО.

Действующий спектро радиометр ФИАН для дистанционного зондирования атмосферного озона состоит из малошумящего супергетеродинного приемника, 96-канального анализатора спектра АС-96 с улучшенными характеристиками и персонального компьютера с интерфейсными модулями и программным обеспечением. Подробное описание спектро радиометра, в котором используется смеситель на планарном диоде Шоттки, дано в работе [5]. Однополосная шумовая температура спектро радиометра составляет около 700 К при охлаждении входных каскадов жидким азотом и около 1500 К без охлаждения.

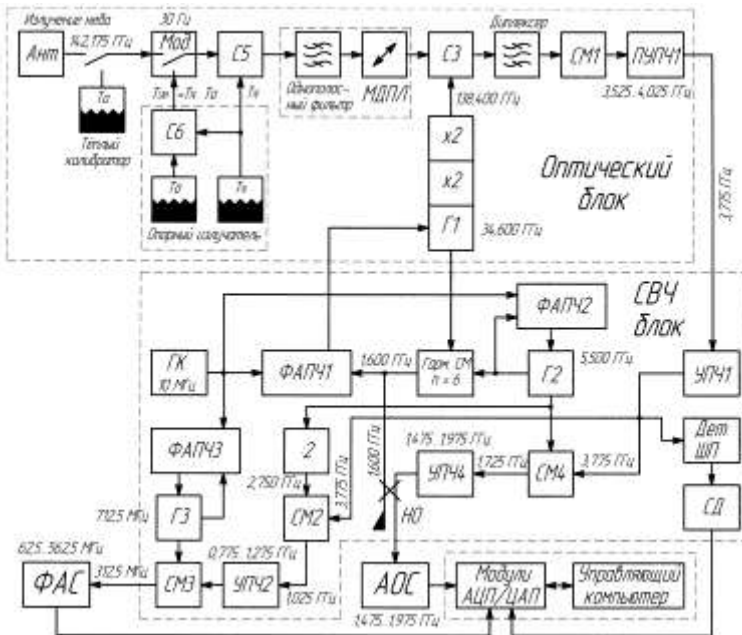
Фильтровой анализатор спектра АС-96 с расширенной полосой частот и высоким спектральным разрешением в центре линии создан в ИПФ РАН с участием ФИАН. В состав АС-96 входят блок преобразований частоты с четырьмя гетеродинами и блоки фильтров, имеющие 96 фильтровых каналов при полной ширине полосы анализа 475 МГц (диапазон частот 75–550 МГц). Ширина каналов изменяется от 0,1 МГц в центре линии озона до 20 МГц на ее крыльях ступенями с промежуточными значениями 0,2, 0,5, 2 и 5 МГц. Такой набор ширин полос пропускания каналов и частот гетеродинов обеспечивает, с одной стороны, минимальное спектральное сглаживание регистрируемой линии и оптимальное отношение сигнал/шум в каналах и, с другой стороны, помехозащищенность и возможность технической реализации узлов АС-96. Сеанс наблюдений разбивается на циклы, состоящие из двух этапов калибровки и следующих за ними заданного количества этапов измерений.

В результате проведенной оптимизации параметров спектро радиометра линия озона регистрируется практически без искажения ее формы, что обеспечивает высокую точность определения вертикального распределения озона на высотах стратосферы и мезосферы. Оценки [3, 14] показали, что суммарная погрешность восстановления профиля вертикального распределения озона (с учетом шума аппаратуры и других экспериментальных погрешностей) при оптимальных условиях наблюдения и времени накопления сигнала около 1 часа (без охлаждения приемника) не превышает 5–7% на высотах от 20 до 50 км, постепенно возрастая в более низких и в более высоких слоях. По основным параметрам (чувствительности, точности восстановления профилей озона) аппаратура ФИАН соответствует мировому уровню инструментов такого типа.

Получено хорошее соответствие профилей ВРО, измеренных в ФИАН, с данными одновременных наблюдений озона над Москвой из космоса в отдельные дни и среднесеasonных профилей. Различие усредненных за март 2005 г. профилей ВРО, полученных в ФИАН и с помощью спутникового прибора MLS [15] над Москвой не превосходило 7% на высотах 21–51 км. Различие усредненных профилей ВРО, полученных в апреле 1996–2003 гг. по наблюдениям в ФИАН и из космоса с помощью ультрафиолетовых инструментов SBUV [16], составило менее 6% на высотах 20–45 км. Для анализа результатов наблюдений ВРО над Москвой, получаемых с помощью действующего спектро радиометра, в ФИАН создана специальная методика. В соответствии с ней производится анализ карт геопотенциальных высот, температуры, потенциальной завихренности (potential vorticity, PV) [17] для ряда высотных уровней стратосферы Северного полушария, карт общего содержания озона [18], а также проводится траекторный анализ с помощью моделей God-

hard automailer и HYSPLIT (NOAA Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory model) [19]. Рассматривается положение основных барических систем стратосферы в Северном полушарии, изучается изменение интенсивности полярного стратосферного вихря, которая характеризуется геопотенциальной высотой  $H_{\text{ц}}$  в центре полярного вихря (см., например, [20]). Известно [1, 21], что сильные воздушные течения вокруг полярной области приводят к изолированности воздуха вихря. Граница (край) полярного вихря определяется методом расчётов максимума производной PV с учётом максимума скорости ветра [21].

В ФИАН создан также передвижной озонометр для измерения ВРО в стратосфере и мезосфере, работающий на частотах спектральной линии озона 142,175 ГГц [6, 22-25]. Блок-схема этого прибора показана на **рис. 1** [23]. Прибор включает в себя малошумящий супергетеродинный модуляционный приёмник со смесителем на планарном диоде Шоттки и твердотельным гетеродином на диоде Ганна, состоящий из оптического блока и СВЧ блока, широкополосный 1000-канальный акустооптический спектроанализатор (АОС, разработка СПбГПУ [25])



**Рис. 1.** Блок-схема передвижного озонометра [23]. Сокращения означают: Ант. – антенна, Г – генератор, СМ – смеситель, Гарм. – гармонический, ГК – кварцевый генератор, Дет. – детектор, СД – синхронный детектор, Мод. – модулятор, С – проволочная сетка, УПЧ – усилитель промежуточной частоты, ПУПЧ – предварительный УПЧ, ФАПЧ – система фазовой автоподстройки частоты.



**Рис. 2.** Общий вид оптического блока приёмника передвижного озонметра (передняя стенка и верхние крышки сняты) [23].

с полосой около 500 МГц и разрешением 0,9 МГц, узкополосный 50-канальный фильтровой анализатор спектра (ФАС, разработка ИПФ РАН) с полосой 10,6 МГц и разрешением в центре полосы 0,1 МГц и управляющий компьютер с необходимыми интерфейсами и программным обеспечением.

Более подробно схема оптического блока приёмника передвижного озонметра была представлена ранее в работе [6]. Общий вид оптического блока приёмника показан на Рис. 2 [23]. Измерения шумовой температуры приёмника проводились по тёплому (находящемуся при комнатной температуре) и холодному (охлаждённому жидким азотом до температуры) чернотельным излучателям. Средние значения однополосной шумовой температуры приёмника, измеренные в широкой полосе (ШП) частот около 0,5 ГГц, составили  $(1100...1120) \pm 20$  К [24]. Полученные значения находятся на уровне лучших известных результатов для неохлаждаемых супергетеродинных приёмников двухмиллиметрового диапазона со смесителями на диодах Шоттки. В настоящее время проводятся натурные испытания передвижного спектрометра, предварительные результаты которых свидетельствуют о его высокой эффективности.

### 3. РЕЗУЛЬТАТЫ НАБЛЮДЕНИЙ

В результате регулярных измерений ВРО над Москвой было построено высотно-временное распределение озона, отражающее изменения, происходившие в озоносфере в холодные периоды 2009-2010 гг. и 2010-2011 гг. [26]. Распределение озона для указанных холодных периодов представлены на **рис. 3** и **рис. 4**. На этих рисунках изолиниями показано содержание озона в единицах отношения смеси  $C_{O_3}$  (ppm, или  $10^{-6}$ ). Для более наглядного представления

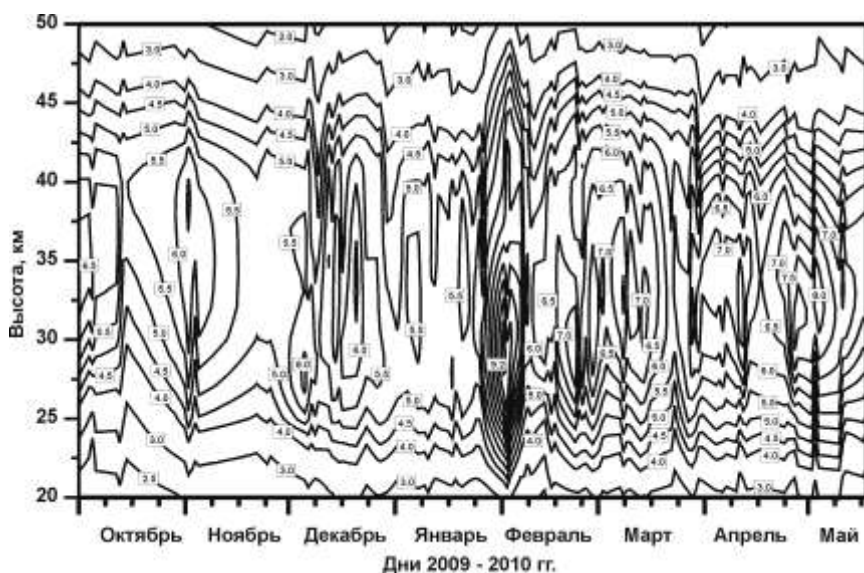


Рис.3. Высотно-временное распределение озона в единицах отношения смеси в холодный период 2009-2010 гг. [26].

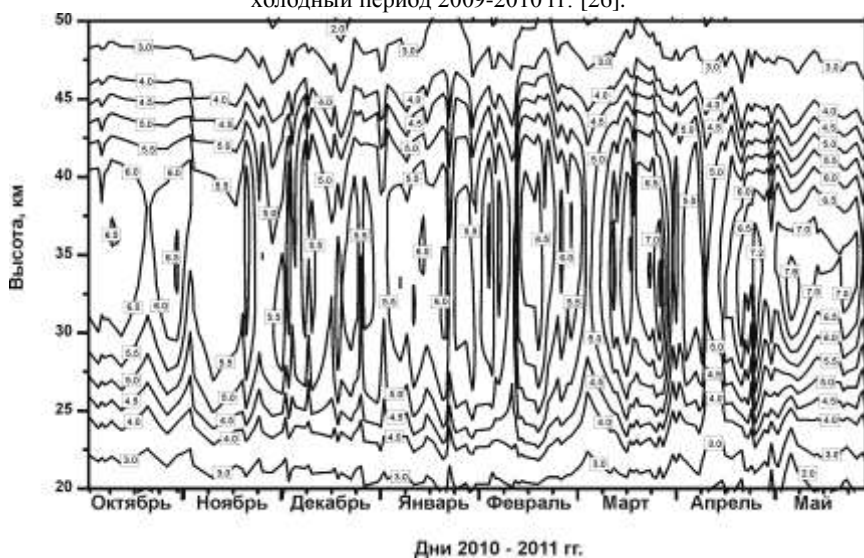
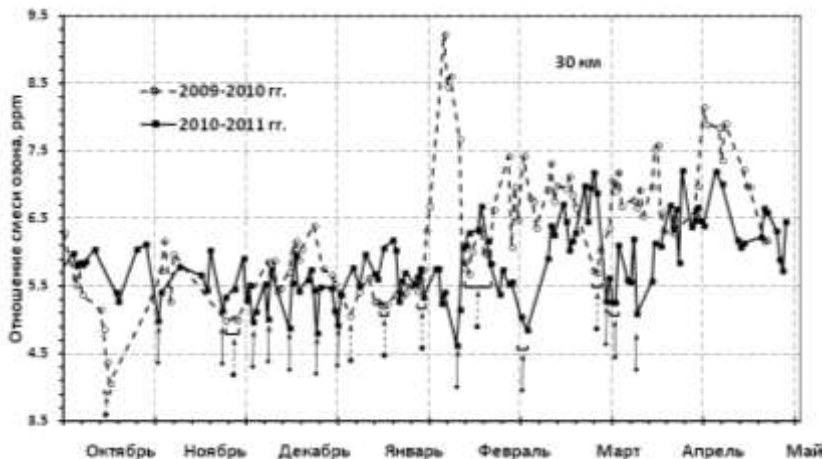


Рис.4. Высотно-временное распределение озона в единицах отношения смеси в холодный период 2010-2011 гг. [26].

различий и особенностей временного хода  $C_{O_3}$  в средних слоях стратосферы в 2009-2010 гг. и в 2010-2011 гг. на **рис. 5** показаны значения  $C_{O_3}$  на высоте 30 км над Москвой для обоих холодных периодов. На этом рисунке стрелками обозначены события, характеризующиеся пониженными значениями  $C_{O_3}$ . Анализ показал, что причинами таких понижений содержания озона  $C_{O_3}$  явилось появление над Московским регионом воздуха полярного вихря (включая воздух



**Рис.5.** Отношение смеси озона на высоте 30 км в холодные периоды 2009-2010 гг. (пунктирная кривая) и 2010-2011 гг. (сплошная кривая) [26].

края вихря), который характеризуется более низкими (по сравнению с воздухом вне вихря) значениями  $C_{O_3}$ . Такие события были зарегистрированы в отдельные периоды в октябре и ноябре 2009 г., в январе-марте, ноябре и декабре 2010 г. и в феврале-апреле 2011 г.

Как видно из **рис. 5**, отношение смеси  $C_{O_3}$  на высоте 30 км в холодное полугодие 2009-2010 гг. изменялось в пределах примерно от 4 ppm до 9 ppm. При этом минимальное значение  $C_{O_3}$ , равное 4,0 ppm, было зарегистрировано 16 октября 2009 г. Такое сильное понижение  $C_{O_3}$  связано с появлением воздуха вихря над Московским регионом в начале рассматриваемого холодного периода. Другой особенностью холодного полугодия 2009-2010 гг. явилось показанное на **рис. 3** и **рис. 5** значительное увеличение  $C_{O_3}$  в конце января - начале февраля 2010 г. В этот период отношение смеси  $C_{O_3}$  на высоте 30 км возросло от 5,4 ppm 25 января до 9,2 ppm 3 февраля 2010 г., что превысило весенний максимум озона  $C_{O_3}$ , зарегистрированный в конце апреля – начале мая 2010 г. (см. **рис. 5**). Наблюдавшееся изменение вертикального распределения озона в конце января-начале февраля 2010 г. является откликом озоносферы на среднезимнее стратосферное потепление, при котором возникло сильное возмущение циркуляции атмосферы.

Анализ полей геопотенциала и потенциальной завихренности Северного полушария в холодный период 2009-2010 гг. показал, что вариации содержания

озона в средних слоях стратосферы так же, как и в предыдущие холодные периоды, связаны с крупномасштабными динамическими процессами в стратосфере. О влиянии динамики атмосферы на озон в холодный период 2009-2010 гг. свидетельствует, например, установленная корреляционная связь концентрации озона на высоте 30 км с характеризующей атмосферные движения потенциальной завихренностью на близком к этой высоте изэнтропическом уровне с потенциальной температурой 850 К. Соответствующий коэффициент корреляции составляет  $-0,85 \pm 0,04$ .

Благодаря наблюдениям озона на ММ волнах в условиях перемещения вихря над Москвой в январе-феврале 2010 г. удалось произвести «разрезы» полярного вихря. При этом луч зрения спектро радиометра дважды пересёк край вихря. Оказалось, что область края полярного вихря характеризуется большим перепадом концентрации озона, а также, как показал анализ других атмосферных параметров [17], отличается значительными горизонтальными градиентами в полях геопотенциала и потенциальной завихренности.

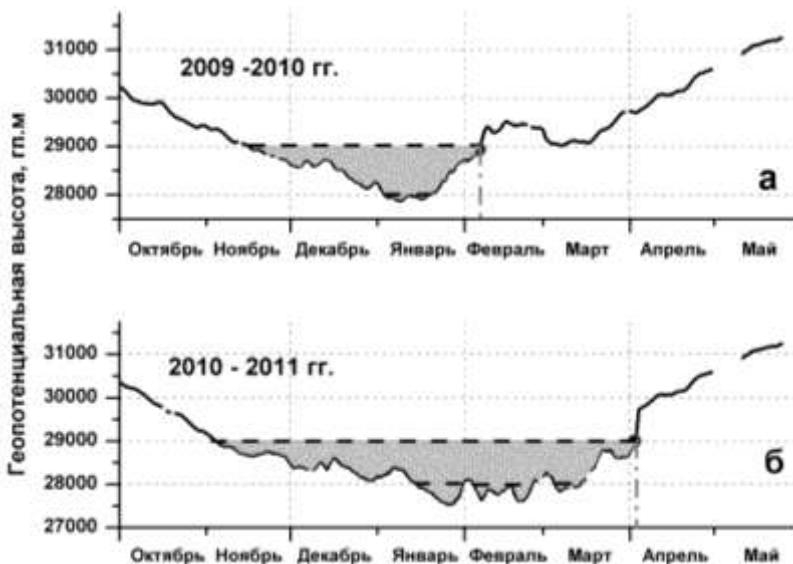
Высотно-временное распределение озона над Москвой в холодное полугодие 2010-2011 гг., показанное на **рис. 4**, имеет существенные отличия от распределения озона в предыдущий холодный период 2009-2010 гг. Важной особенностью циркуляции стратосферы в холодное полугодие 2010-2011 гг. явилось продолжительное существование интенсивного полярного вихря, во время которого центр вихря значительную часть времени располагался вблизи Северного полюса. В отличие от события 16 октября 2009 г., возникшее понижение содержания озона 18-19 октября 2010 г. было менее значительным, поскольку над Москвой в это время располагалась лишь пограничная область полярного вихря.

Из представленных на **рис. 5** данных следует, что изменения содержания озона  $C_{O_3}$  в воздухе вихря на высоте 30 км над Москвой в холодное полугодие 2010-2011 гг. лежали в пределах от 4,6 ppм до 5,3 ppм, причём в феврале - марте 2011 г. значения  $C_{O_3}$  в воздухе вихря были заметно ниже соответствующих величин в 2010 г. Другим важным отличием холодного периода 2010-2011 гг. стало появление воздуха вихря с пониженным на 30-35% содержанием озона над Москвой 30 марта и 7 апреля 2011 г. Это произошло во время смещения полярного вихря к Европе. В эти дни, судя по картам общего содержания озона [18], над Московским регионом появлялась периферия аномально истощённой области озона, большая часть которой располагалась в высоких широтах. В этой области, как показано в работе [27], из-за возросшей концентрации хлора, разрушающего озон при низких температурах, возникли беспрецедентные для Северного полушария потери озона над высокими широтами.

Для иллюстрации развития полярных стратосферных вихрей на **рис. 6** представлена полученная из анализа данных [17] геопотенциальная высота  $H_{\text{ц}}$  уровня 10 мбар (высота около 30 км) в центре полярного вихря в рассмотренные холодные периоды 2009-2010 гг. и 2010-2011 гг. Здесь и ниже геопотенциальная высота дана в геопотенциальных метрах, гп.м (геопотенциальные метры, как известно, численно примерно соответствуют геометрическим метрам, см., например, [28]).

Как следует из карт полей геопотенциала на уровне 10 мбар, полярный вихрь в 2009-2010 гг. стал наиболее глубоким, т.е. геопотенциальная высота  $H_{\text{ц}}$

достигла минимальных значений, в первой половине января 2010 г. Действительно, геопотенциальная высота  $H_{ц}$  на **рис. 6а**, примерно равная  $30 \cdot 10^3$  гп.м в начале октября 2009 г., снизилась до значений, меньших  $28 \cdot 10^3$  гп.м, в



**Рис.6.** Геопотенциальная высота  $H_{ц}$  уровня давления 10 мбар в центре полярного вихря в холодные периоды 2009-2010 гг. и 2010-2011 гг. Горизонтальными пунктирными линиями отмечены значения  $H_{ц} = 28 \cdot 10^3$  гп.м. и  $H_{ц} = 29 \cdot 10^3$  гп.м. Заштрихована область с  $H_{ц} \leq 29 \cdot 10^3$  гп.м. [26].

январе 2010 г. В конце января 2010 г. произошло упомянутое выше стратосферное потепление. Оно сопровождалось увеличением температуры воздуха над Москвой, увеличением геопотенциальной высоты  $H_{ц}$ , деформацией и смещением полярного вихря. Например, на высоте 30 км температура воздуха поднялась почти на 50 К за период с 24 по 29 января 2010 г. Как видно на **рис. 6а**, в феврале 2010 г. геопотенциальная высота увеличилась до значений, превышающих  $29 \cdot 10^3$  гп.м. В феврале 2010 г. вихрь стал вытянутым (в поперечном сечении) и, распавшись на две части, приобрёл двухцентровую структуру (значения  $H_{ц}$  на **рис. 6а** в этот период соответствуют более глубокой части вихря).

Из сравнения графиков на **рис. 6а** и **рис. 6б** видно, что вихрь в 2010-2011 гг. углублялся быстрее, чем в 2009-2010 гг. и, за исключением начала января, полярный вихрь в 2011 гг. был более глубоким, чем в предыдущий холодный период. Отмеченные выше более низкие значения  $C_{O_3}$  в воздухе вихря над Москвой в феврале-марте 2011 г. по сравнению с соответствующими значениями  $C_{O_3}$  в предыдущий холодный период могут означать более высокую изолированность

воздуха вихря в 2010-2011 гг., которая объясняется большей интенсивностью (глубиной) этого вихря.

Как видно на **рис. 6б**, вихрь с  $H_{ц}$  менее  $29 \cdot 10^3$  гп.м сохранялся долго - до начала апреля 2011 г., т.е. примерно на два месяца дольше, чем в предыдущий холодный период. Обнаруженные пониженные значения  $C_{O_3}$  в воздухе вихря над Москвой 7 апреля 2011 г. свидетельствуют о том, что более долгоживущий интенсивный вихрь в 2010-2011 гг. препятствовал перемешиванию и обмену с богатым озоном воздухом вне вихря также и в апреле 2011 г.

#### 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотренные выше межгодовые отличия высотно-временного распределения озона в холодные полугодия 2009-2010 гг. и 2010-2011 гг. оказались связанными с различиями динамических процессов, с особенностями развития полярных вихрей в рассматриваемые холодные сезоны.

Отмеченные в работе [27] беспрецедентные для Северного полушария потери озона над высокими широтами, превосходившие 80% в слое на высоте около 20 км, свидетельствуют о возможности возникновения озонных дыр в Северном полушарии даже при более умеренных снижениях температуры стратосферы в Арктике по сравнению с температурами в Антарктике. Это уникальное явление в Северном полушарии стало полной неожиданностью, поскольку пока ещё не существует надёжных прогнозов изменений в озонном слое. Поэтому для оперативного обнаружения сильных истощений озона (озонных дыр), необходимы дальнейшие исследования, включающие мониторинг вертикального распределения озона на миллиметровых волнах.

Полученные результаты указывают на большие изменения стратосферного озона под влиянием крупномасштабных атмосферных процессов, на особенности межгодовых изменений в озоносфере в условиях неконтролируемых техногенных нагрузок и изменений климата. Радиофизические методы мониторинга вертикального распределения озона дают уникальную информацию о процессах в озоносфере, в том числе в периоды образования значительного истощения озонного слоя в полярном вихре, а также при сильных возмущениях, вызванных стратосферным потеплением, и представляют важность для развития прогнозов эволюции озоносферы.

Авторы выражают глубокую благодарность профессорам Ю.А.Пирогову, В.Н.Сорокину, Е.В.Суворову и В.А.Черепнину за поддержку данной работы. Авторы признательны лаборатории NOAA Air Resources Laboratory (ARL) за возможность пользования транспортной моделью HYSPLIT, центру British Atmospheric Data Center (BADC) за любезно предоставленные метеорологические данные, а также благодарны NASA за возможность доступа к спутниковым данным.

Работа поддержана Программами ОФН РАН «Современные проблемы радиофизики» и «Радиоэлектронные методы в исследовании природной среды и человека», а также грантом УНК ФИАН.



## Литература

1. World Meteorological Organization. Scientific Assessment of Ozone Depletion: 2010. Report 52, Global Ozone Research and Monitoring Project, 2011.
2. Красильников А.А., Куликов Ю.Ю., Мазур А.Б. и др. Микроволновое зондирование озона и других малых составляющих атмосферы. В сборнике «Физика микроволн», Изд. ИПФ РАН, Нижний Новгород, 1999. - Т.1. - С.171-178.
3. Соломонов С.В. Радиофизические исследования озоносферы //Успехи соврем. радиоэлектроники. - 2003. - №1. - С.9-25.
4. Соломонов С.В., Гайкович К.П., Кропоткина Е.П. и др. Дистанционное зондирование атмосферного озона на миллиметровых волнах //Изв. вузов. Радиофизика. - 2011. - Т.54, №2. - С.113-121.
5. Соломонов С.В., Игнатъев А.Н., Кропоткина Е.П. и др. Спектральная аппаратура для мониторинга атмосферного озона на миллиметровых волнах //Приборы и техника эксперимента. - 2009. - №2. - С.138-144.
6. Розанов С.Б., Соломонов С.В., Игнатъев А.Н., Кропоткина Е.П. Оптимизация характеристик радиоспектрометров миллиметрового диапазона волн для исследований озона и окиси хлора в атмосфере Земли. //Сб. «Физические проблемы экологии (Экологическая физика)» - 2004. - Т.12. - С.186-199.
7. Atmospheric remote sensing by microwave radiometry. Ed. M.Janssen, J.Wiley&Sons Inc., 1993.
8. Parrish A. Millimeter-wave remote sensing of ozone and trace constituents in the stratosphere //Proc. IEEE. - 1994. - V.82, No.12. - P.1915-1929.
9. Klein U., Wohltmann I., Lindner K., Kunzi K.F. Ozone depletion and chlorine activation in the Arctic winter 1999/2000 observed in Ny-Ålesund //J.Geophys.Res. -2002.- V.107, No D20.- P.8288-8298.
10. Charlton-Perez A.J., Polvani L.M., Austin J., Li F. The frequency and dynamics of stratospheric sudden warmings in the 21st century. J. Geophys.Res. - 2008 - V.113, P.D16116, doi:10.1029/2007JD009571
11. Gaikovich K.P. Inverse Problems in Physical Diagnostics. Nova Science Publishers Inc., New York, 2004.
12. Тихонов А.Н., Гончарский А.В., Степанов В.В., Ягола А.Г. Регуляризирующие алгоритмы и априорная информация. М.: Наука, 1983.
13. Gaikovich K.P., Markina N.N., Naumov A.P., et al. Investigation of remote sensing possibilities of the low atmosphere in the microwave range and some aspects of statistical data use //Int. Journal of Remote Sensing. - 1983. - V.4, No.2. - P.419-431.
14. Гайкович К.П., Кропоткина Е.П., Соломонов С.В. Определение вертикального профиля атмосферного озона по наземным измерениям излучения в миллиметровом диапазоне//Изв. АН. Физика атмосферы и океана.- 1999.- Т.35, №1. - С.86-95.
15. Froidevaux L., Livesey N.J., Read W.G., et al. Early validation analyses of atmospheric profiles from EOS MLS on Aura Satellite //IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing. - 2006. - V44, No.5. - P.1106-1121.
16. SBUV Version 8, Nimbus 7, NOAA-9a, NOAA-9b, NOAA-11, NOAA-16 //DVD-ROM. - April 2004. - Prepared by the NOAA/NASA Ozone Processing Team.
17. The British Atmospheric Data Centre (BADC). [Электронный ресурс]. URI: [http://badc.nerc.ac.uk/view/badc.nerc.ac.uk\\_ATOM\\_dataent\\_ASSIM](http://badc.nerc.ac.uk/view/badc.nerc.ac.uk_ATOM_dataent_ASSIM)

18. The Green Lane Environment Canada's World Wide Web Site. Select Ozone Maps [Электронный ресурс]. URI: <http://woudc.ec.gc.ca/cgi-bin/selectMap>
19. Draxler R.R., Rolph G.D. 2010 HYSPLIT (NOAA HYbrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory) Model, NOAA ARL READY Website NOAA Air Resources Laboratory, Silver Spring, MD.
20. Тарасенко Д.А. Структура и циркуляция стратосферы и мезосферы. Л.: Гидрометеиздат. 1988.
21. Nash E.R., Newman P.A., Rosenfield J.E., Shoenberl M.R. An objective determination of the polar vortex using Ertel's potential vorticity //J. Geophys. Res. -1996. - V. 101, No.D5. - P.9471.
22. Розанов С.Б., Собельман И.И., Божков В.Г., Есепкина Н.А. и др. Создание радиоспектрометров в 1,5– и 2-миллиметровом диапазонах длин волн для атмосферных исследований с оптимизированными характеристиками //Изв. вузов. Радиофиз. - 2005. - Т.48, №10-11. - С.857-862.
23. Розанов С.Б., Завгородний А.С., Логвиненко С.В. и др. Малошумящий приёмник для микроволновой озонотриии //Изв. вузов. Радиофиз. - 2011. - Т.54, №8-9. - С.708-718.
24. Розанов С.Б., Игнатьев А.Н., Кропоткина Е.П., Лукин А.Н., Соломонов С.В. Исследования вертикального распределения атмосферного озона методами дистанционного зондирования на миллиметровых волнах //Вестник МПГУ.- 2011. - №3. -С.3-12.
25. Саенко И.И., Круглов С.К., Розанов С.Б., Соломонов С.В. Оптоэлектронный спектрометр для комплекса дистанционного зондирования атмосферы на миллиметровых волнах //Научно-технические ведомости СПбГПУ. Информатика. Телекоммуникации. Управление. - 2010.- №4(103).- С.243-249.
26. Соломонов С.В., Кропоткина Е.П., Розанов С.Б., Игнатьев А.Н., Лукин А.Н.. Особенности высотно-временного распределения озона над Москвой в период сильного истощения озонного слоя весной 2011 г. и при стратосферном потеплении в 2010 г. по наблюдениям на миллиметровых волнах //Краткие сообщения по физике ФИАН. – 2012. - №10. – С.3-13.
27. Manney G.L., Santee M.L., Rex M. et al. Unprecedented Arctic ozone loss in 2011 //Nature. - 2011. - V.478, No.7370. - P.469-475, doi:10.1038.
28. Хргиан А.Х. Физика атмосферы. М.: Изд. МГУ, 1986.

## АВТОМАТИЗАЦИЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ОКРАШЕННЫХ ОБЛАСТЕЙ В СОСТАВНОМ ВИХРЕ

Степанова Е.В., Аниконов М.И.

*Институт проблем механики РАН*

step@ipmnet.ru

### **Введение**

Теория вихревых течений в модели идеальной жидкости в покоящейся [1] или вращающейся среде [2], а также расчет переноса вещества основываются на априорных предположениях о динамике явления, таких как «пассивность примеси» и «турбулентный характер переноса». В дополнение к теоретическим исследованиям, начиная с начала прошлого века, проводятся экспериментальные исследования распространения примеси в вихревых течениях.

Уже в одной из первых работ было замечено, что примесь сосредотачивается в компактных областях, имеющих характерную форму “стен краски” [3] или спиральных структур [4]. Целью проводимых расчетов является выяснение как временных, так и пространственных закономерностей проникновения растворимого красителя в толщу жидкости, в случае внесения на поверхность составного вихря окрашенной капли примеси.

### **Методика эксперимента и основные характеристики течения**

Расчеты проводились по записанным изображениям, полученным в ходе экспериментов с составным вихрем на установке «Вихревые течения с кручением» (ВТК), входящей в УСУ «ГФК ИПМех РАН», где вихревое течение создавалось диском, вращающимся на дне прозрачного цилиндрического контейнера. Для уменьшения оптических искажений контейнер помещался в открытый прямоугольный бассейн из прозрачного полиметилметакрилата размерами  $0.6 \times 0.45 \times 0.7$  м. Поверхность диска вместе с фальш-дном составляет плоскость, ограничивающую снизу рабочий объем установки. Диск приводился во вращение установленным снизу электродвигателем. Частота вращения вала двигателя  $\Omega$  (и диска, соответственно) измерялась с помощью оптического датчика с цифровым частотомером. В каждой серии опытов бассейн заполнялся дегазированной водопроводной водой комнатной температуры до заранее выбранного уровня. Более подробное описание методики экспериментов и параметров экспериментального стенда можно найти в [5].

Создаваемое в установке течение характеризуется двумя основными частотами:  $\omega_c$  - движения вокруг вертикальной оси,  $\omega_r$  - торондального вихря с замкнутой горизонтальной осью. Общее течение имеет сложную пространственно-неоднородную структуру, жидкость в нем движется по спиральным и винтовым траекториям. Общее течение характеризуется локальной частотой  $\omega = \omega_c + \omega_r$ .

На поверхности жидкости над составным вихрем образуется каверна, форма которой определяется всеми параметрами эксперимента и основными физическими постоянными (толщина слоя жидкости  $H$ , радиус контейнера  $R_c$ , радиус  $R_d$  и частота  $\Omega$  вращения диска, ускорение свободного падения  $g$ , плотность  $\rho$ , ки-

нematическая вязкость  $\nu$ , коэффициент поверхностного натяжения  $\sigma$  жидкости). В рассматриваемых опытах глубина поверхностной каверны невелика.

### **Структура переноса растворимых примесей в составном вихре**

В проведенных экспериментах растворимый краситель вводится на свободную поверхность составного вихря, достигшего установившегося режима течения, характеризующегося постоянной глубиной поверхностной каверны, без учета искажающих ее форму волн. Краситель, помещенный на свободную поверхность в виде капли распространяется независимо вдоль изогнутой свободной поверхности, вытягиваясь в спиральные рукава, а также проникает в толщу воды вдоль вертикальных поверхностей, затем образующих соосные вертикальной оси вихря цилиндрические окрашенные области.

Такое окрашивание наблюдается при внесении на поверхность составного вихря любого традиционного водорастворимого красителя (анилиновые чернила, слабые растворы флюоресцирующих веществ). Поверхностные спиральные структуры, если капля красителя внесена не строго в центр вращающейся свободной поверхности, формируются и увеличиваются в двух противоположных направлениях: один спиральный рукав интенсивно растет в направлении центра вращения свободной поверхности, другой – более плавно удлиняется в направлении, противоположном основному течению вдоль поверхности. Если капля красителя попадает непосредственно в центр вращающейся свободной поверхности, краситель из нее вытягивается только в направлении периферии, образуя один окрашенный спиральный рукав.

При внесении капли растворимого красителя вблизи центра вращения свободной поверхности (на расстоянии не превышающем половины радиуса активатора  $R_d$ ), основная часть проникшего в толщу красителя движется вниз в виде тонких цилиндрических оболочек, которые занимают центральную часть течения, сливаясь и окрашивая ее вблизи вертикальной оси вращения диска-активатора [6].

Такой перенос окрашивающего вещества представляет интерес, т.к. несмотря на интенсивность всего течения, опускание красителя в центральном окрашенном столбе происходит довольно медленно (рис. 1).

### **Определение параметров окрашенных областей**

Разработанный алгоритм определения интенсивности окрашивания различных частей потока по яркости их изображения, полученного с помощью различных цифровых камер, позволяет судить о качественном и количественном состоянии распределения красителя в потоке. Наиболее надежно определяются положение и геометрические характеристики центрального окрашенного столба, а также прослеживается его удлинение по мере проникновения красителя в толщу составного вихря.

Рассмотрим стадии проникновения красителя в толщу воды в центральном окрашенном столбе. Подкрашивание проводилось синими анилиновыми чернилами, с фотографий была удалена вся информация о цвете, кроме синего канала изображения, для исключения влияния посторонних цветов на измерение интенсивности окрашивания рабочего объема. Полученные черно-белые изображения обрабатывались с помощью разработанного алгоритма.

Результат работы программы, наложенный на фотоизображения, представлен на рис. 1.

Фоновая картина течения и распределение интенсивности синего цвета на ней непосредственно перед введением окрашивающего вещества не имеет выраженных пиков. Через 5 с после введения красителя интенсивность окрашивания всего исследуемого объема изменилась – четко обозначились максимумы на линиях, лежащих на уровнях от 34.25 до 29.75 см над вращающимся диском. Линии отражают распределение яркости картины течения на 15-ти уровнях от 34.25 до 2.75 см над вращающимся диском. Сравнение освещенностей картин фоновой и спустя 5 с после введения красителя с рис. 1, *а* приведено на рис. 2, *а*. Дальнейшая эволюция распределения красителя приводит к размыванию нижнего края окрашенной центральной области потока и увеличению ее размеров, о чем можно судить по распределению интенсивности синего цвета на изображении.

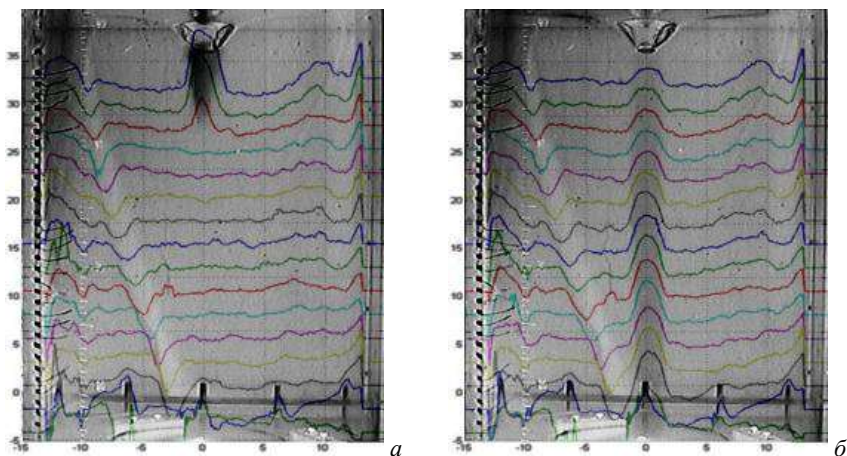


Рис. 1. Совмещение изображения течения с профилями яркости вдоль вертикалей ( $H = 40$  см,  $\Omega = 480$  об/мин,  $R_d = 7.5$  см): *а*) – освещенность через  $t = 5$  с после начала проникновения красителя; *б*) – конечная стадия проникновения красителя и размывание центрального окрашенного столба ( $t = 90$  с).

Проникновение красителя в толщу жидкости продолжается, с течением времени центральный столб окрашивается по всей высоте, затем интенсивность его окраски начинает уменьшаться, начиная с верхних уровней, ближайших к свободной поверхности. Затем бледнеет центральный окрашенный столб по всей высоте исследуемого объема (рис. 1, *б*).

Через 55 с после введения красителя, пики на линиях интенсивности окрашивания практически одной высоты по всему объему – окрашенный столб почти равномерно заполнен синим красителем (см. рис. 2, *б*, *в*).

На рис. 2, *б* приведено сравнение интенсивности синей окраски в моменты спустя 55 и 70 с после введения красителя, верхние уровни имеют более низкие пики, краситель плавно вытягивается из верхних слоев под действием вращающегося диска, в приосевую часть течения начинает поступать чистая вода (или, если говорить точно, менее интенсивно окрашенная, т.к. краситель отбрасываемый от

диска распределяется по всему объему). Такая эволюция окрашенной области продолжается и, как показывает рис. 2, *з*, уменьшение концентрации красителя в верхней части окрашенного столба продолжается, различия в интенсивности синего цвета продолжают нарастать.

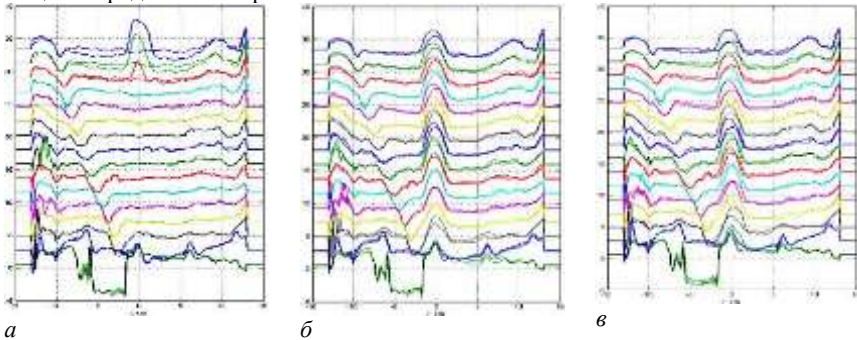


Рис. 2. Распределение интенсивности окрашивания центрального столба временем ( $H = 40$  см,  $\Omega = 480$  об/мин,  $R_d = 7.5$  см): *а*) – сравнение кадров фонового распределения освещенности и начала удлинения окрашенной области ( $\Delta t = 5$  с); *б*, *в*) – сравнение освещенности в момент времени  $t = 55$  с и  $t = 70, 90$  с (видимое уменьшение интенсивности окрашивания верхней части столба).

Ширина столба постоянна вдоль вертикальной координаты и составляет около 2.7 см (т.е. радиус центрального окрашенного столба составляет 0.2 радиуса активатора). К моменту, когда нижний край центрального окрашенного столба достигает вращающегося диска, верхняя часть окрашенного столба теряет интенсивность окраски, что свидетельствует об уменьшении концентрации примеси (см. рис. 2, *б*).

Аналогичным образом проводится обработка изображений течения с добавлением флуоресцирующего водорастворимого красителя (уранил), дающая графическое представление о распределении освещенности (яркости) в толще составного вихря (рис. 4). Для такого типа подкрашивания применяется версия алгоритма, учитывающая освещенность рабочего объема установки при таком способе подкрашивания течения. На рис. 4, *а* линии 2 - 4 отражают распределение яркости изображения вдоль горизонталей на уровнях от 39.25 до 31.00 см над вращающимся диском-активатором. На этих линиях хорошо прорисован участок вблизи центральной оси контейнера, где яркость максимальна, а соответственно присутствует заполненная красителем область (см. фото на рис. 3, *а*).

Поперечный размер окрашенного столба на этом уровне составляет 3.8 см. Линия 15 проходит везде вблизи нулевой отметки, следовательно на уровне 3 см над вращающимся активатором общий фон яркости равномерный, и окрашенных более или менее интенсивно, по сравнению с фоном, областей не наблюдается. Сглаженные линии в представлении яркости изображения на рис. 4, *а* получены с помощью «сырых» данных. Фильтрация проводится для уменьшения уровня высокочастотных шумов (причина их появления – особенности светочувствительной матрицы регистрирующей аппаратуры и оцифровки аналогового сигнала), при

расчете значений учитывается величина яркости в точках, окружающих данную. Также для улучшения определения геометрических параметров из всех распределений яркости на горизонталях изъяты линейные и квадратичные тренды, связанные с фоновым распределением освещенности рабочего объема.

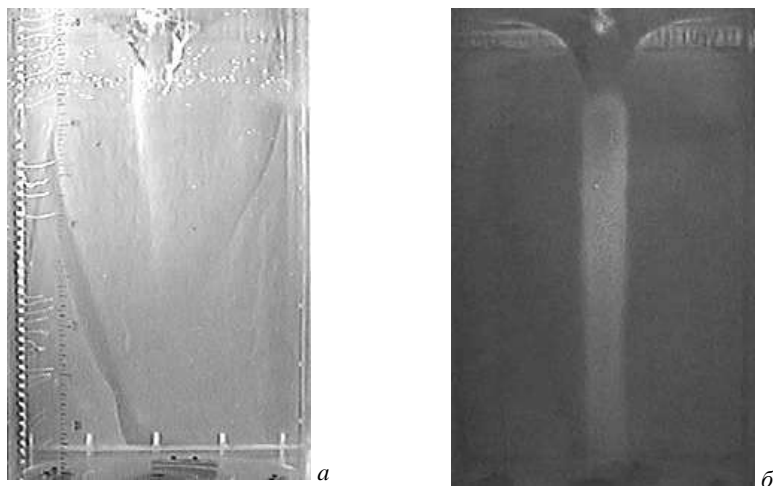


Рис. 3. Транспорт примеси в толщу жидкости ( $H = 50$  см,  $\Omega = 820$  об/мин,  $R_d = 7.5$  см,  $Re = 7\,200$ ): *a*, *б*)–  $t = 28, 78$  с.

Линия *б* на рис. 4, *a* (яркость на уровне 26.00 см над активатором) имеет слабо выраженный центральный пик (величина существенно меньше, чем у вышележащих линий). Если принять этот уровень за текущую глубину проникновения красителя, то она составляет 15.9 см от нижней точки поверхностной каверны, что подтверждается и визуальным наблюдением (рис. 3, *a*).

Яркость точек изображения, расположенных на горизонтальном уровне 41.5 см над вращающимся диском (линия *1* на рис. 4, *б*), показывает отсутствие резких изменений освещенности вдоль диаметра контейнера. На фотоизображении (рис. 3, *б*) этой области соответствует горизонтальная линия чуть выше нижней точки поверхностной каверны, где никаких окрашенных объемов не наблюдается. Остальные линии на рис. 4, *б* имеют один выраженный максимум в центре, что соответствует яркому центральному окрашенному столбу в центре исследуемого объема.

Средняя ширина окрашенной области составляет от 3.5 до 4.0 см. Также на отфильтрованных графиках распределения яркости заметно, что линии 2 – 5 (распределение яркости в верхней части рабочего объема) располагаются существенно ниже остальных линий, отражающих яркость слоев жидкости, лежащих в диапазоне от 5.75 до 25.00 см над вращающимся диском. Это связано с перераспределением красителя в потоке, и отражает разбавление пигмента в верхней части окрашенного столба поступающей чистой водой и его вымывание в интенсивном течении на поверхности вращающегося активатора.

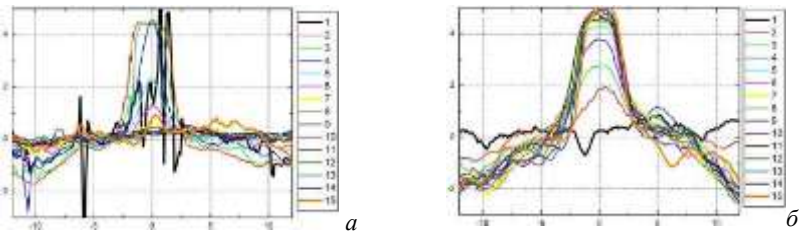


Рис. 4. Оцифровка распределения яркости рабочей области установки ВТК ( $\Omega = 820$  об/мин,  $H = 50$  см,  $R_d = 7.5$  см; 1-15 – освещенность на уровне  $41.5 \div 3$  см с шагом  $2.75$  см): время после введения красителя а) – 28 с, б) – 128 с.

Зависимость глубины проникновения красителя в толщу составного вихря (для эксперимента, фото которого приведены на рис. 1) представлена на рис. 5. Первоначальная глубина поверхностной каверны –  $4.5$  см, т.е. начальный уровень поступления примеси –  $35.5$  см над уровнем вращающегося активатора. С этой отметки начато построение графиков зависимости полного заполнения (окрашивания) столба на всю ширину (символы 1) и опускания нижней границы окрашенной области (символы 2) от времени.

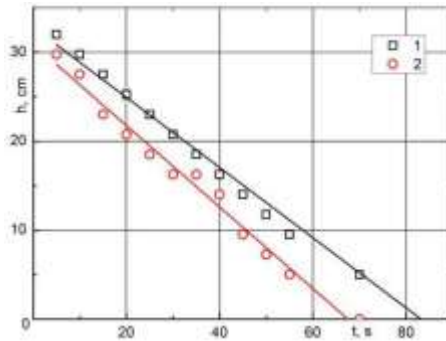


Рис. 5. Изменение глубины проникновения красителя со временем ( $H = 40$  см,  $\Omega = 480$  об/мин,  $R_d = 7.5$  см): 1 – нижний уровень окрашенного столба полной ширины, 2 – нижний уровень изменений по сравнению с фоновой яркостью.

Проведенная линейная интерполяция данных показывает, что скорость проникновения красителя (около  $4.5$  мм/с) слегка превышает скорость заполнения столба на всю ширину ( $3.9$  мм/с). Коэффициенты в линейных зависимостях  $h = At + B$  приведены в Табл. 1.

Проведенные опыты по детектированию положения окружающей центральной столб тонкой цилиндрической окрашенной области показывают, что распространение красителя в ней происходит намного более интенсивно в вертикальном



направлении, а также что ее положение более сложно для определения вследствие небольшого поперечного размера на отдельном изображении течения (рис. 6).

Таблица 1. Линейная интерполяция скорости проникновения красителя.

	A	B
Прямая 1	$-0.391 \pm 0.014$	$32.81 \pm 0.64$
Прямая 2	$-0.458 \pm 0.018$	$30.91 \pm 0.68$

На изображении, сделанном через 10 с после первого введения красителя в поток, слабые пики интенсивности совпадают с контурами цилиндрической оболочки, но их величина не позволяет с уверенностью автоматизировать процесс определения размеров и толщины интересующей окрашенной области. Дальнейшее распространение красителя и вовсе слабо отражается на графиках изменения интенсивности синей окраски (рис. 6, а).

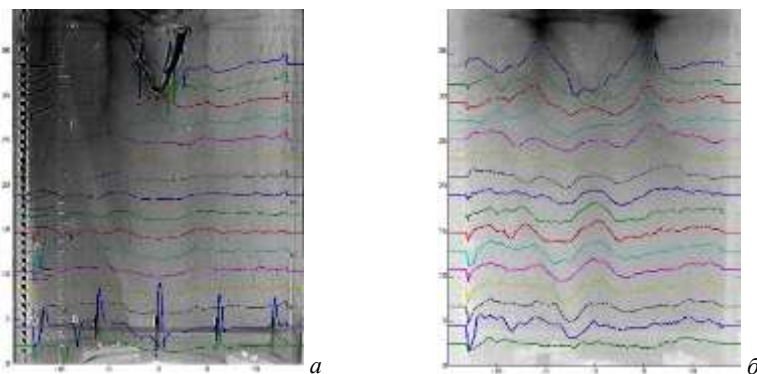


Рис. 6. Характерные изображения цилиндрической окрашенной оболочки в потоке, изменение окрашивания со временем ( $H = 40$  см,  $\Omega = 650$  об/мин,  $R_d = 7.5$  см): а) – изменение размера «лохматого» нижнего края окрашенного столба ( $t = 15$  с); б) – добавление новой порции красителя (от начала окрашивания 60 с, после добавления порции красителя – 5 с).

На рис. 6, б приведена картина течения, куда дополнительно была внесена порция красителя (полное время распространения красителя 60 с, время, прошедшее после добавления второй порции красителя – 5 с), где прослеживается увеличение интенсивности окрашивания центральной области потока, и слабо выделяются интенсивно окрашенные тонкие прослойки, соответствующие цилиндрической оболочке диаметром около 10.8 см, окружающей центральный столб.

В различное время по данным регистрации горизонтальный размер цилиндрической оболочки колеблется от 10.4 до 10.9 см в диаметре. Поперечный размер центрального столба сохраняется таким же, как и при более низкой частоте вращения активатора, а именно 3.85 см в диаметре.

**Выводы:**

Проведены экспериментальные исследования проникновения растворимого красителя в толщу составного вихря со свободной поверхностью, показавшие, что перенос примеси происходит в отдельных областях постоянных размеров. Все наблюдаемые картины течения устойчиво воспроизводятся в пределах точности опытов.

Вертикальная скорость проникновения красителя невелика, центральная окрашенная область имеет четкую границу, что позволяет провести автоматизацию обработки экспериментальных данных. В проведенных экспериментах радиус центральной окрашенной области составляет от 20 до 30% радиуса активатора.

Скорость распространения красителя в тонкой окрашенной цилиндрической оболочке, окружающей центральный окрашенный столб, существенно выше, чем в центральном столбе. Эта окрашенная область плохо поддается автоматическому распознаванию ввиду малости ее размеров и относительно небольшого времени существования.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Гранта РФФИ 12-05-31393-мол\_а.

**Литература**

1. Милн-Томсон Л.М. Теоретическая гидродинамика. М. Мир, 1964. 655 с.
2. Рыжов Е.А., Кошель К.В. Хаотический перенос и перемешивание пассивной примеси вихревыми потоками за препятствиями // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2010. Т. 46. № 2. С. 204-211.
3. Taylor G.I. Experiments with rotating fluids // Roy. Soc. Proc. A. 1921. V. 100. Pl. 2. P. 114-121.
4. Long R. R. Note on Taylor's "ink walls" in a rotating fluid // Journal of the Atmospheric Sciences. 1954. V. 11. No. 3. P. 247-249.
5. Степанова Е.В., Чаплина Т.О., Чашечкин Ю.Д. Перенос масла в составном вихре // Изв. РАН: Механика жидкости и газа. № 2. 2011. С. 52-64.
6. Степанова Е.В., Чашечкин Ю.Д. Анизотропный перенос примеси в составном вихре // Доклады АН. 2008. Т.423. № 4. С. 474-478.

## ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ВАКУУМНЫХ ФОТОЭЛЕМЕНТОВ В СОЛНЕЧНОЙ ЭНЕРГЕТИКЕ

Тебуев В.В.

*Географический факультет МГУ имени М.В.Ломоносова*

*научно-исследовательская лаборатория возобновляемых источников энергии*

На сегодняшний день повсеместно используются кремниевые полупроводниковые фотоэлементы. Строятся целые «поля» солнечных батарей для производства электричества. Принцип действия таких фотоэлементов строится на принципе фотоэффекта в р-п полупроводниках. Но сам фотоэффект, кроме полупроводников, встречается и на поверхности некоторых металлов, но исследования данного эффекта для металлов не пошло дальше практического изготовления светодиодчиков и каскадных умножителей. Целью данной статьи является рассмотрение возможности применения вакуумных фотоэлементов в области возобновляемых источников энергии в качестве солнечных элементов для получения электричества на нужды потребителей.

Как известно, фотоэффект был обнаружен на поверхности металлов, при облучении последних ультрафиолетом. Эффект исследован, начиная с 1888 г., Гальваксом, Герцем, Столетовым, Эльстером, Гейтелем и др. В частности Столетов открыл, что сила тока эмитируемых электронов с поверхности металла, зависит от интенсивности падающего света на металл. В 1905 г. Эйнштейн дал толкование фотоэффекта с позиции квантовой теории света. Эта теория получила практическое подтверждение при проведении множества экспериментов. Закон Эйнштейна гласит, что энергия падающего кванта света на металл при фотоэффекте расходуется на работу выхода электрона из металла и на кинетическую энергию электрона (1):

$$h\nu = A_{\text{вых}} + \frac{mv^2}{2} \quad (1)$$

Из (1) видно, что при отсутствии фотоэффекта, т.е. при скорости электрона  $v=0$ , формула приобретает вид:

$$h\nu = A_{\text{вых}} \quad \text{или} \quad \frac{hc}{\lambda_{\text{кр}}} = A_{\text{вых}} \quad (2)$$

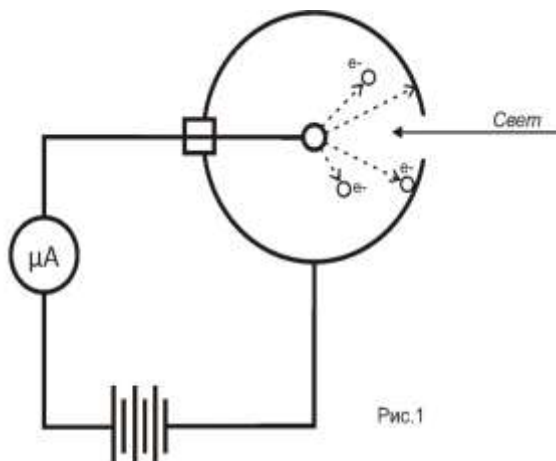
т.е. для каждого металла существует т.н. длинноволновая граница фотоэффекта  $\lambda_{\text{кр}}$ , за которой фотоэффект отсутствует. Составлены таблицы для металлов, при какой длине волны наблюдается фотоэффект и работа выхода металла. Нас интересуют металлы, фотоэффект в которых возникает при воздействии солнечного света, т.е. длина волны должна лежать в пределах видимого диапазона спектра  $\lambda=0,38 \dots 0,78$  мкм. Характеристики таких металлов показаны в таблице (таб. 3).

Из таблицы видно, что наиболее близок к красной границе цезий, т.е. он захватывает большую часть энергии видимого спектра. Фототок от неразложившегося света называется интегральным фотоэффектом.

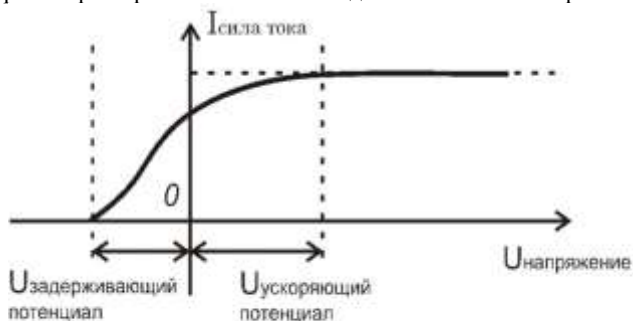
Таблица 3.

Материал	Работа выхода, эВ	$\lambda_{кр}$ , мкм
Калий	2,22	0,558
Литий	2,38	0,521
Натрий	2,35	0,527
Цезий	1,81	0,685

Рассмотрим устройство, позволяющее проводить эксперименты по фотоэффекту:



В вакуумную колбу с нанесенным на стенки слоем металла и прозрачным окошком помещают шарик металла с возможностью фотоэмиссии электронов под воздействием света и искусственно прикладывают разность потенциалов от внешнего источника напряжения. Увеличивая или уменьшая тормозящее поле (изменяя напряжение внешнего источника) определяют фотоэмиссионный ток. Вольтамперная характеристика такого исследования показана на рис.2:



Особое внимание для исследования привлекает левая часть графика, которая показывает, что эмитирующие электроны имеют кинетическую энергию, для обнуления которой требуется задерживающее поле. Так же практический интерес представляет нулевая точка оси абсцисс, в которой видно, что при отсутствии внешнего источника напряжения сам фотоэлемент служит источником тока. В данном опыте сила тока измеряется в микроамперах и не представляет практического интереса в плане электрогенерации, но и интенсивность света очень низка. Для увеличения силы тока нужно в соответствии с законом Столетова увеличить интенсивность, т.е. мощность света. Возвращаясь к цели данного исследования это можно сделать, лишь изготовив вакуумные фотоэлементы большой площади. Известно, что  $1\text{ м}^2$  земной поверхности в зависимости от широты и погодных условий принимает от 600Вт до 4кВт солнечной энергии. Учитывая, что форма ФЭ в виде огромной шаровой колбы с прозрачным окошком конструктивно сложна в изготовлении и не практична, автор предлагает плоскую конструкцию вакуумного фотоэлемента, представленную на рис.3:

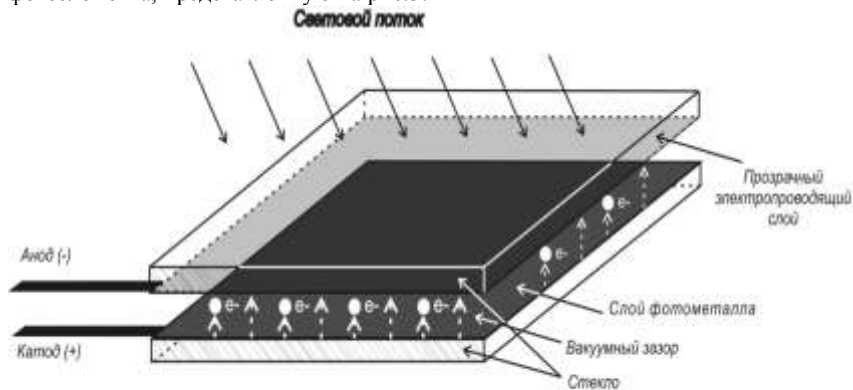


Рис.3

В состав конструкции входит: солнечный элемент из подложки – стекла с нанесённым на него слоем фотометалла, к примеру, цезия, толщина нанесения около  $0,1\text{ мкм}$  (при освещении, эмиссия электронов происходит с такой глубины металла), затем оставляется вакуумный зазор для предотвращения контакта анода с катодом, выше ещё один слой стекла с нанесённым на него изнутри электропроводным слоем, который не производит фотоэмиссию при освещении. Данный проводящий слой должен быть нанесён в виде тонкой металлической плёнки, насквозь пронизываемой светом, либо в виде графитовой плёнки, важно, чтобы свет проходил практически без потерь и данный слой мог бы служить коллектором эмитированных электронов, сам не эмитируя электроны. Промежуток между стёклами вакуумируется после сварки стёкол по краям. Фотометалл должен быть высокой степени очистки и дегазации, иначе через некоторое время происходит утомление фотокатода (окисление или загрязнение поверхности), что снижает характеристики фотоэлемента. Так же высокие требования предъявляются к ваку-

уму. При должной дегазации стекла, низком давлении вакуума (порядка  $10^{-6}$  мм Hg), и чистом фотометалле, служба фотоэлемента может быть очень долгой. Примером могут послужить старые термоэмиссионные лампы, они служат десятилетиями в экстремальных температурных условиях.

Рассмотрим теоретическую возможность производства тока представленной вакуумной фотопанелью. С учётом работ выхода катода и анода (их потенциалов), формулу (1) можно получить в виде:

$$h\nu - A_{\text{вых}} = \frac{mv^2}{2} = \varphi_a - \varphi_k - eU_{\text{зан}} \quad (4)$$

Т.к. наш фотоэлемент мы хотим использовать в качестве источника тока, то внешний источник напряжения отсутствует, следовательно,  $U_{\text{зан}}=0$ .

Из формулы (4) можно найти холостое напряжение цезиевого фотокатода  $\varphi_a - \varphi_k = U$ .

Взяв за основу, что цезиевый фотокатод работает в диапазоне длин волн от  $\lambda_{\text{кр}} = 0,685$  и ниже (до границы фиолетовой части видимого спектра  $\lambda = 0,38$ ) то  $U_{\text{фотоэлемента}} = 0,013 \dots 1,45\text{В}$ \* [1]. Учитывая интегральный эффект действия солнечного света, можно смело брать верхнюю границу напряжения как рабочую [2].

*Примечание:* Вопрос о повышении эффективности будет разобран ниже.

Рассмотрим теоретически возможный ток вакуумного фотоэлемента. Для оценки силы тока фотоэмиссии, можно воспользоваться уравнением квантового выхода фотоэммиттера  $q$ .

$$q = \frac{I n c}{b P_{\text{изл}} \lambda} \quad (5)$$

Где  $I$  – сила тока фотоэмиссии (в микроамперах, т.е.  $\times 10^{-6}\text{А}$ ),  $P_{\text{изл}}$  – мощность падающего излучения.

Из (5):

$$I = \frac{q b P_{\text{изл}} \lambda}{h c} \quad (6)$$

Квантовый выход фотокатодов колеблется в диапазоне 0,2-0,8 (электронов на квант), возьмём среднее значение  $q=0,5$ . Для панели площадью  $1\text{м}^2$  Ризл в российских широтах составляет 1000Вт.

$$I = \frac{0,5 \times 1000 \text{ Вт} \times 0,685}{1,24 \times 10^{-6}} = 2,76 \times 10^8 \text{ мкА} = 276 \text{ А}$$

Используя, полученную из (4)  $U_{\text{фотоэлемента}} = 1,45\text{В}$  можно найти теоретическую мощность фотопанели:

$$P_{\text{фотопанели}} = I \times U = 276 \text{ А} \times 1,45 \text{ В} = 400 \text{ Вт.}$$

Теоретическое (идеальное) КПД такого фотоэлемента составляет  $\eta = 40\%$ . Данное значение даёт основание в срочном порядке создать опытные образцы плоских вакуумных фотоэлементов и приступить к их исследованиям.

Методы повышения КПД вакуумной фотопанели.

В специализированной литературе указывается, что фототок возрастает, если в пространство между катодом и анодом ввести газ и ионизировать его. Учитывая использование фотоэлемента без внешних (искусственных) воздействий, ионизация должна происходить под действием солнечного света. В качестве подходящего «газа» могут послужить пары того же цезия, т.к. они ионизируются под светом длиной волны  $\lambda = 0,3184 \text{ мкм}$ . Это уже ультрафиолетовая часть спектра, причём присутствующая в спектре, т.к. у поверхности земли спектр обрывается примерно на  $\lambda = 0,29 \text{ мкм}$ . Чтобы эффект ионизации происходил, необходимо верхнюю (прозрачную для света) часть фотоэлемента изготавливать из кварцевого стекла, прозрачного для ультрафиолета. Кроме того, данная конструктивная мера повышает диапазон рабочих длин волн, захватывая ультрафиолетовую часть спектра, что в соответствии с (4) увеличивает разность потенциалов катода и анода фотоэлемента и, как следствие, увеличивает выдаваемую мощность. Возможной мерой увеличения фототока может быть концентрация солнечного излучения путем зеркал, но тут есть ограничение на рабочую температуру цезия, это мягкий щелочной металл, с температурой плавления всего  $t = 28^\circ\text{C}$ . На практике применяют сплавы цезия с другими металлами, что улучшает его температурные и прочностные характеристики. Ещё один метод повышения фототока состоит в применении сложных катодов, которые значительно (иногда даже в десятки раз!) увеличивают фототок, но недостатком таких катодов является быстрая усталость, т.е. загрязнение эмитирующей поверхности и как следствие снижение фототока.

#### Выводы

Рассмотрена теоретическая возможность использования вакуумного фотоэлемента в качестве источника тока. С учётом использования небольшого количества щелочных металлов (см. таблицу 3), и других недорогих составляющих, существует возможность создать более эффективную конструкции по сравнению с кремниевыми фотоэлементами. В любом случае, данная технология получения фотоэлементов перспективна для дальнейших исследований.

#### Литература

1. Н.А. Капцов «Электрические явления в газах и вакууме» ОГИЗ Гостехиздат 1947;
2. Б.Яворский, А.Детлаф «ФИЗИКА» учебное пособие, Дрофа, 2000;

## СБОРКА И ПРЕПАРИРОВАНИЕ ПРИБОРОВ

Терентьев Е.Н., Терентьев Н.Е.

*Физический факультет МГУ, The University of Queensland, Australia*

В работе вводятся индикаторы обращений Аппаратных Функций. Продемонстрированы резонансные свойства Дискретного Преобразования Фурье относительно ширины полосы пропускаемых частот и вида АФ. Показано, как можно использовать эти резонансные свойства для обращения сложных абберационных 2D и 3D искажений без использования априорной информации о свойствах решений. Вводятся новые математические методы: Сборка и Препарирование Приборов для решения задач компенсации искажений АФ. Используются новые математические методы работы над массивами отсчетов как с непрерывными функциями. Резонансные свойства ДПФ используются и для организации распараллеливания вычислений при сверхразрешении больших изображений

**Введение**

Пусть Аппаратная Функция или Функция Рассеяния Точки (ФРТ) типа “ступеньки” представлена на  $N=25$  точках. В оптике принято ФРТ  $O$  сопоставлять Модуляционную Передаточную Функцию МПФ  $M=M(O)$ , которая получается как решение задачи на собственные значения [1-3] на множестве функций - базиса  $H$ , состоящего из Фурье гармоник, заданных на области определения ФРТ  $O$ :

$$O * H = MH \quad (1)$$

Таким образом, операция свертки  $*$  сводится к умножению. Для области определения с  $N=25$  точек МПФ  $M=M(O)$  имеет два значения близкие к нулю. Это не позволяет вычислить разрешающую функцию  $R=R(O)$ , те реализовать обращение искажений ФРТ или компенсировать искажения ФРТ, например, в изображении

$I_y$ , полученном в линейной модели формирования изображений:

$$I_y = O * I_x \quad (2)$$

где  $I_x$  – сигнал или изображение на входе прибора,  $I_y$  – на выходе. Ошибку измерений  $I_y$  или аддитивный шум, практически присутствующий в правой части (2) в обозначении не выделяем. Поэтому можно еще говорить, что данные на входе и выходе прибора  $O$  связывает система уравнений (2) типа свертки.

Если разрешающую функцию  $R=R(O)$  применим к изображению  $I_y$ , представленному на  $N=25$  точках, то на сверхразрешенном изображении  $R * I_y$  получим муар или сетку с потерянными пространственными частотами, на которых  $M(O) \sim 0$ , примерно такую, как в изображении  $R * O$  см. Рис.1.



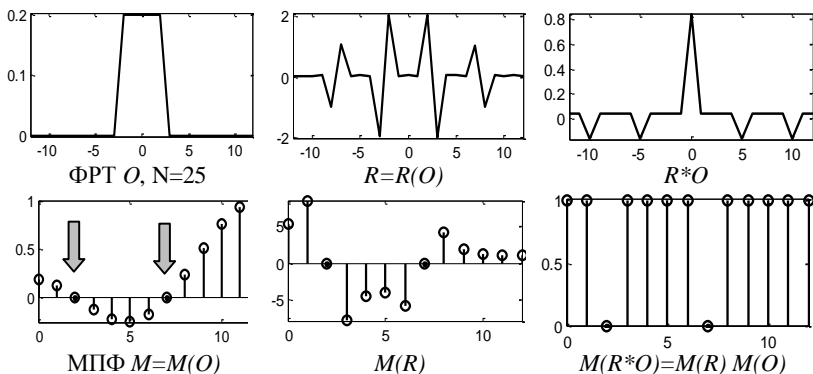


Рис.1. Два значения из МПФ  $M(O)$  попали в окрестность нуля:  $0 \pm 10^{-13}$ , имеет место не полное обращение ФРТ  $O$ . Область определения ФРТ  $O$  содержит  $N=25$  точек.

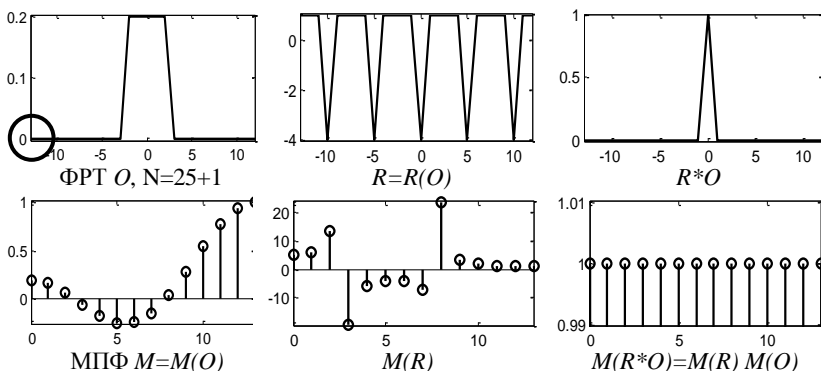


Рис.2. Добавление слева нулевой точки в область определения ФРТ  $O$  привело к устранению нулевых особенностей у МПФ  $M(O)$ , это позволило реализовать полное обращение ФРТ  $O$ .

Если в область определения ФРТ  $O$  добавим одну нулевую точку – расширим область определения  $N=25+1$ , то МПФ  $M(O)$  изменится, а в этих двух точках исчезают нулевые особенности и как следствие разрешающая функция  $R=R(O)$  реализует идеальное сверхразрешение - обращение ФРТ  $O$  в изображении  $I_y$ :

$$I_x = R * I_y = R * O * I_x \quad (2)$$

После этого вспомним классиков, которые говорили о том, что для решения обратных задач требуется “априорная информация, гладкость решений и т.п.”.

При  $N=26$  имеет место полная обратимость по всем значениям МПФ  $M=M(O)$ . Разрешенная ФРТ  $R^*O$  есть символ Кронекера. При  $N=25$ , обратимости по двум значениям МПФ  $M(O)$  нет и разрешенная ФРТ  $R^*O$  имеет значение в нуле меньше единицы, так как среди положительных слагаемых в нуле, представляющих  $M(R^*O)$  два слагаемых имеют нулевые значения.

В качестве индикатора обратимости будем использовать максимальные значения функций  $R^*O$  для различных значений  $N$  длин областей определения

$$I = \max(R^*O(N)) \tag{3}$$

Пусть в исходных данных,  $I_y$  (1) присутствует аддитивный однородный белый нормальный шум со стандартным отклонением  $\sigma$ . Будем исходить из того, что ошибка или стандартное отклонение  $SD$  в задании  $O$  значительно меньше  $\sigma$  - ошибки исходных данных.

Норма разрешающей функции  $\|R\|$  представляет нам коэффициент усиления  $\sigma$  стандартного отклонения или сигма  $\sigma$  шума. Отсюда получаем коридор или ошибку для оценки сверх разрешенных изображений  $\tilde{I}_x$ :

$$\tilde{I}_x \in R^*I_y \pm \|R\| \sigma \tag{4}$$

В графиках индикаторов обращения и реакции на шум демонстрируемые не-обратимые ситуации будем выделять квадратиком, а обратимые – кружком.

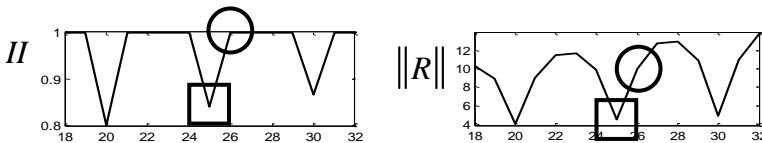


Рис.3. Индикатор обращения и реакции на шум в зависимости от  $N=18-32$

Посмотрим, что получится, если эту проблему обращения ФРТ  $O$  решать методом регуляризации с параметром  $\alpha = 0.001$ .

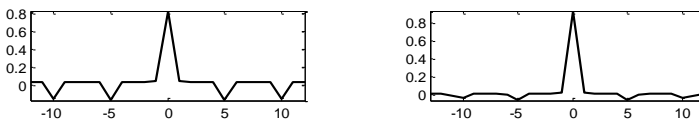


Рис.4. Разрешенная ФРТ -  $R^*O$  в методе регуляризации с  $N=25$  и  $N=26$ .

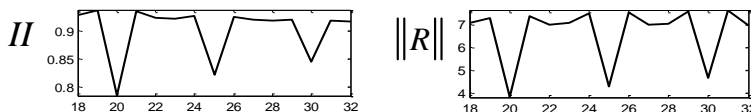


Рис.5. Индикатор обращения и реакции на шум для регуляризации.

В регуляризации с параметрами  $\alpha > 0$ ,  $II < 1$  - теряется обратимость!

### Сборка и Препарирование 2D Приборов

Принцип Resonance Windows Inversion (RWI) позволяет решать задачи обращения искажений, путем математической “Сборки”, как уже рассматривалось, добавлением нулевых значений в область определения. - в Band Pass of Discrete Frequencies (BPDF).

Математическая “Сборка”  $O$  состоит в исследовании RWI, задаваемой параметром ND – Neutralization Distance или толщина рамки Windows, с выбором значений ND, при которых имеет место обратимость. Гораздо более эффективно – математическое “Препарирование”, те переходу от массива данных  $O$  к функции (массив данных + область определения или полоса частот прибора) - Прибору

$\tilde{D} : O \xrightarrow{\tilde{D}} \tilde{O} \xrightarrow{BPDF} \tilde{D}$  в пределах погрешностей его задания

$$\|O - \tilde{O}\|^2 \leq \varepsilon \tag{5}$$

с его обращением  $\tilde{O}^{-1} = R(\tilde{O})$  с минимизацией реакции на шум:

$$\min \left\{ \|O - \tilde{O}\|^2 \mid \|O \tilde{O}^{-1} - \varepsilon\| \right\} \tag{6}$$

Обратимость Приборов при “Сборке” и “Препарировании” выявляется с помощью индикаторов обращения:

$$II_{cc} = \min(R_{cc} * Q_{cc}(ND)), II_{ss} = \min(R_{ss} * Q_{ss}(ND)), \tag{7}$$

соответственно, по четно-четной  $O_{cc}$  и нечетно-нечетной  $O_{ss}$  частям аппаратной функции абберационного типа

$$O = O_{cc} + O_{ss}.$$

По построению, если значения индикаторов равны 1, то Прибор  $\tilde{D} = \tilde{O} + BPDF$  обратим. Смысл простой: в первом равенстве (5) при обрати-

мости получается двумерный символ Кронекера  $\Pi_{cc} = \delta_{cc}$ , а во втором -  $\Pi_{ss} = \delta_{ss}$  равно его безымянному двумерному нечетно-нечетному аналогу с условной единичной амплитудой. В приведенных обозначениях буква  $C$  взята от функции  $\cos()$ , а  $S$  взята от  $\sin()$ . Для учета полного абберрационного искажения не хватает четно-нечетного и нечетно-четного слагаемых  $O_{cs}$  и  $O_{sc}$  с соответствующими индикаторами  $\Pi_{cs}$  и  $\Pi_{sc}$ .

В примерах ниже при RWI Сборке Прибора мы имеем неполное обращение по четно-четной части  $O_{cc}$  с ND=10, неполное обращение по нечетно-нечетной части  $O_{ss}$  с ND=11 (не показано) и полное обращение абберрационной PSF  $O = O_{cc} + O_{ss}$  при ND=12.

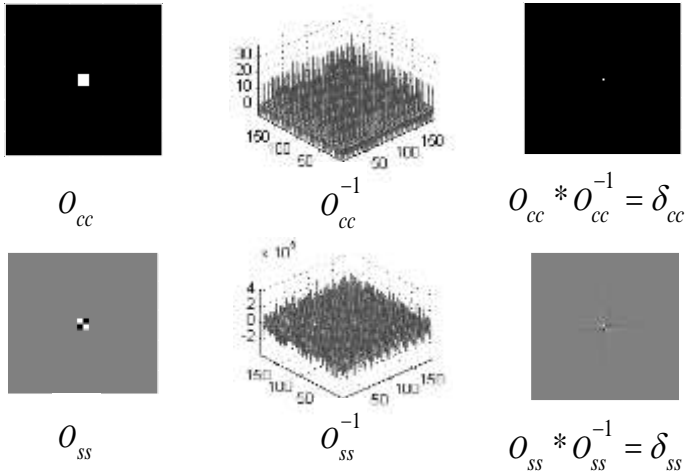


Рис.6. Значения  $O * R(O)$  в обратимом случае с ND=12

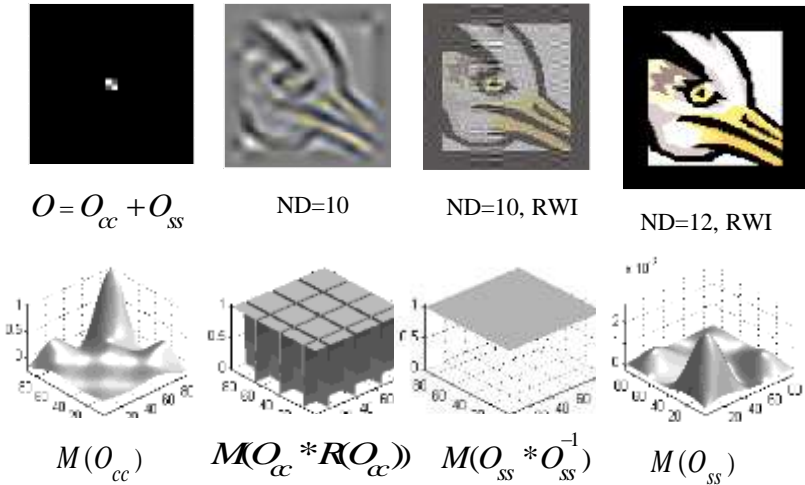


Рис.7. Аберрационная PSF  $O$ , выход с  $O$  и результаты RWI с ND=10 и ND=12.

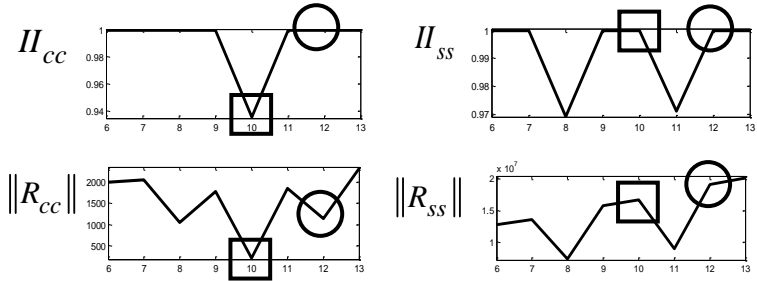


Рис.8. Индикаторы и реакции на шум в зависимости от ND=6-13

Метод регуляризации приводит к потере обратимости, “глушит” RWI и в этом случае не применим.

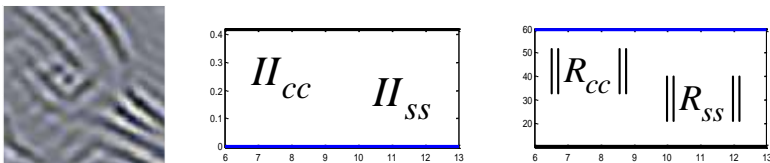


Рис.9. Обращение регуляризацией, индикаторы обращения и реакции на шум для регуляризации с  $\alpha = 0.001$  и ND=5-13.

**Сборка и Препарирование 3D Приборов**

Сборка и препарирование 3D Приборов осуществляется точно так же как и в двумерном случае (5-6). Аналогично вводятся индикаторы обращений:

$$I_{cc} = \tilde{M}R_{cc} * O_{cc}(ND), I_{sss} = \tilde{M}R_{sss} * O_{sss}(ND), \quad (8)$$

В примерах на Рис.10 и Рис.11 при RWI Сборке Прибора мы имеем необратимый Прибор по  $O_{ccc}$  и  $O_{sss}$  с  $ND=6$  и обратимый - с  $ND=7$ .

Конечно, в полном абберрационном случае



следует рассматривать восемь индикаторов обращений, а не два как в (8).

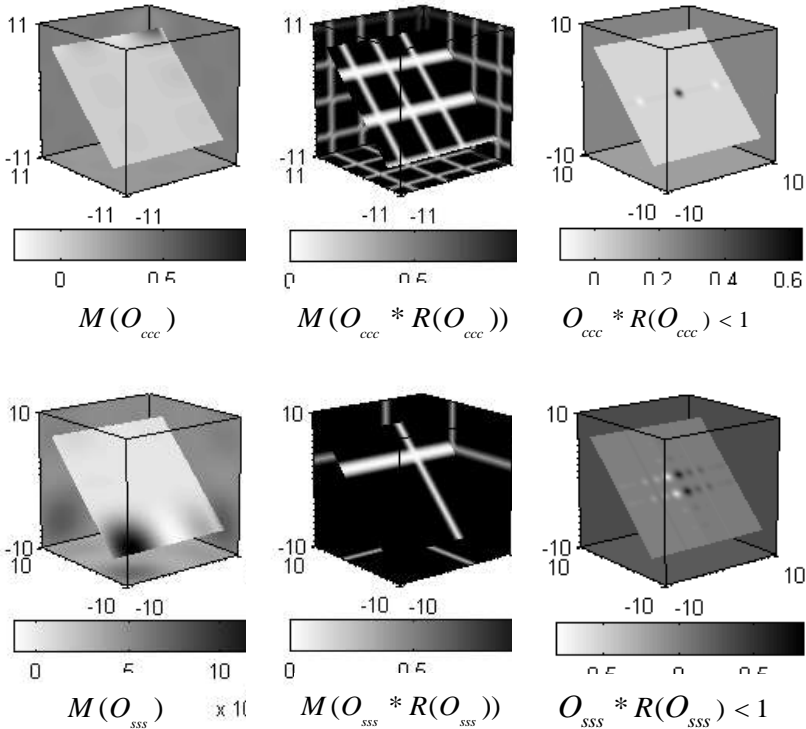


Рис.10. Значения  $O * R(O)$  в случае необратимого прибора с  $ND=6$ .

Препарирование 3D Приборов (6) в частотной области означает, что подбирается такой Прибор  $\tilde{D} = \tilde{O} + BPDF$ , у которого  $M(\tilde{O} * R(\tilde{O})) = 1$  или имеет место обратимость во всем кубе, который при этом еще наименее поражен шумом.

На Рис.11 не показано, что области обратимости  $M(O^*R(O))=1$  есть все частоты куба.

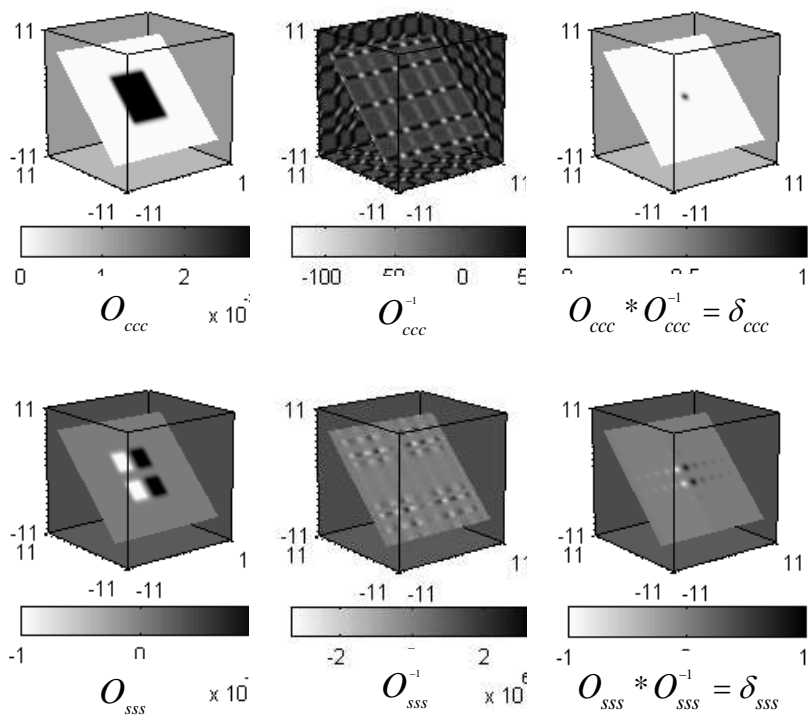


Рис.11. Значения  $O^*R(O)$  в случае обратимого прибора с ND=7.

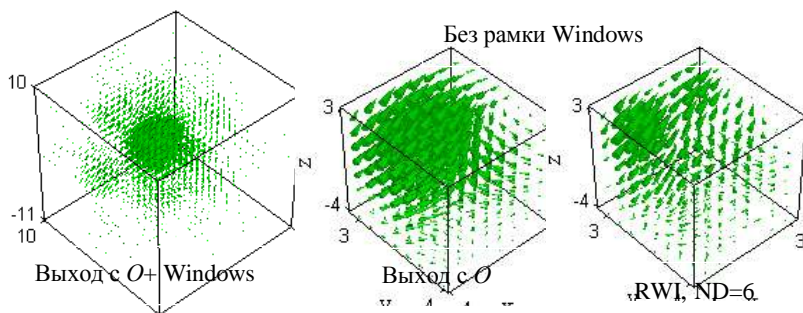


Рис.12. Выходы с O и RWI необратимого Прибора с ND=6

Планировать Настройку Прибора следует по индикаторам обратимости и реакциям на шум.

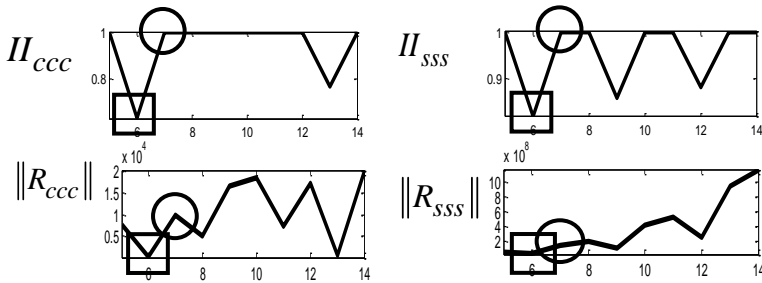


Рис.13. Индикаторы и реакции на шум, в зависимости от ND=5-14

В регуляризации с параметрами  $\alpha > 0$ ,  $H_{SSS} < 1$  и  $H_{CCC} < 1$  - теряется обратимость!

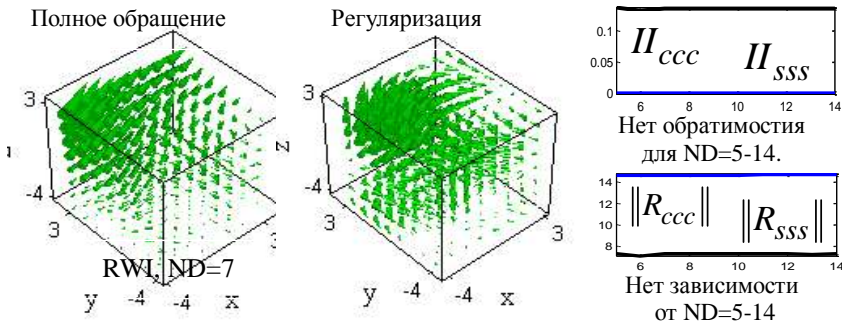


Рис.14. Индикаторы обращения и реакции на шум для регуляризации с  $\alpha = 0.001$

Метод регуляризации приводит к потере обратимости, “глушит ” RWI и в этом случае не применим.

### Препарирование Приборов и многолучевые системы

В публикациях 1999-2000 годов мы использовали следующий принцип организации исходных данных: “Данные с однолучевой системы радиовидения преобразуем к виду, как если бы они были получены в многолучевой системе”. Таким образом, задача большой размерности сводится к совокупности устойчивых, мало-размерных задач [1]. Возможно, подобные процедуры реализуются в фасеточных глазах насекомых.



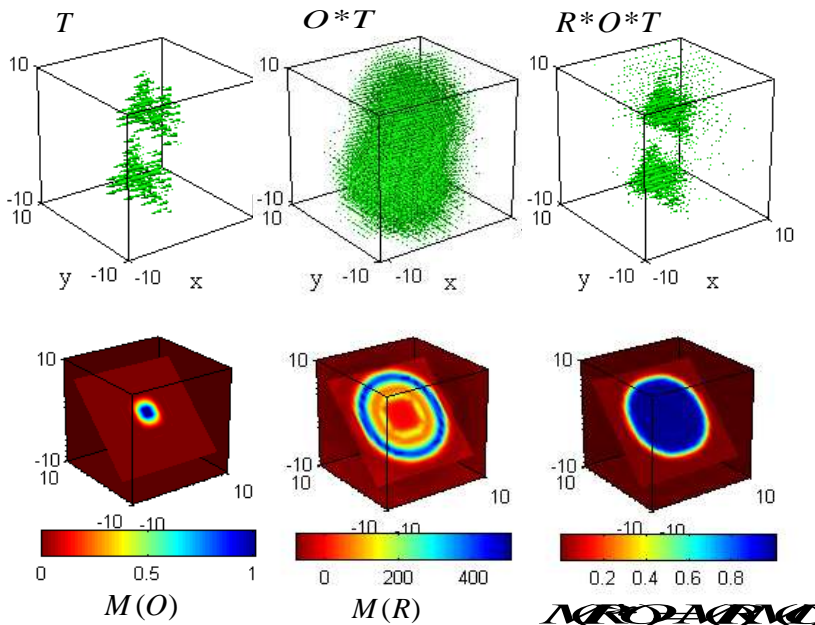


Рис.15. Сверхразрешение целей, сигнальные части и МПФ Прибора, соответствующего одному лучу в многолучевой системе

В приведенных картинках на Рис. 15-16 рассматриваются такие малоразмерные задачи для одного луча. Задачи сверхразрешения целей и указание точкой объектов или целей, реализованы методом типа регуляризации [2,3,6]. Сейчас мы вместо регуляризации планируем RWI Сборку и Препарирование Прибора для практической реализации еще более устойчивых, помехозащищенных методов сверхразрешения изображений и индикации объектов. Изображения большой размерности можно представить как с многолучевой системы регистрации и соответствующие задачи реализовать по лучам - небольшим частям со склейкой их внутренностей. В новом подходе не требуется априорная информация о свойствах решений и вдобавок Аппаратная Функция, ФРТ, “диаграмма направленности” или луч могут не обладать, например, четной симметрией, те могут быть абберационными. Возможен учет и переменной глубины резкости.

Смысл операций: частоты, ослабленные МПФ  $M(O)$ , усиливаются МПФ  $M(R)$ . Область усиления  $M(R*O) \sim 1$  есть шар в кубе см. в Рис. 15.

Корреляционные методы дают слишком большое пятно при индикации целей, объектов  $T$  и поэтому не приемлемы. Предлагается для индикации целей, объектов использовать функции  $R(T)$ , а сам объект указывать малоразмерной точкой получаемой в результате операции  $R*T$ . С таким однолучевым Прибором можно получить малоразмерную индикаторную точку с минимальной реакцией на шум. В

данном случае область обратимости  $M(R^*T) \sim I$  почти весь куб пространственных частот, см. в Рис. 16.

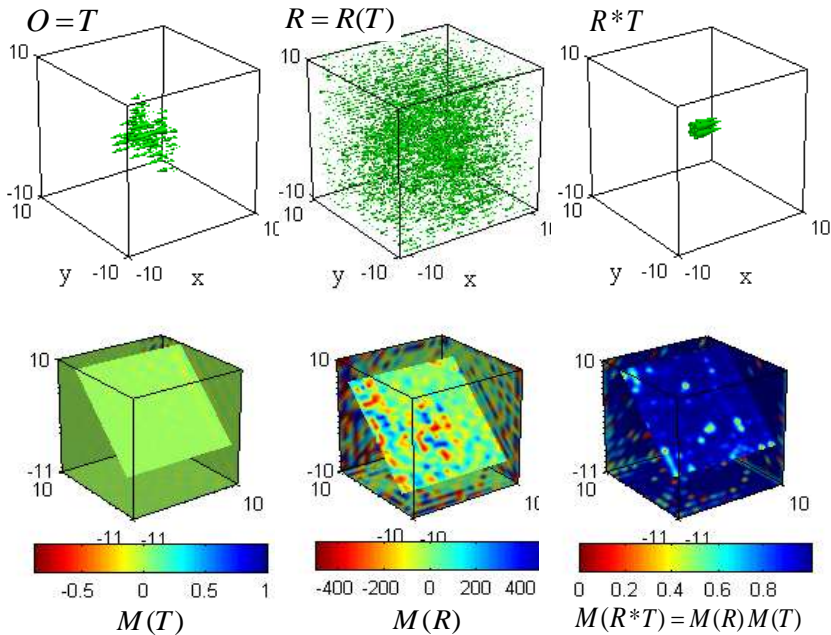


Рис. 16. Индикация цели точкой, векторный вид результатов пространственных операций. Модуляционные Передаточные Функции представлены проекциями на плоскость.

### О компенсации искажений ФРТ и сверхразрешении изображений

В традиционных постановках методов решения обратных задач обычно исходят из системы уравнений типа Фредгольма 1-го рода или линейной модели формирования изображений (1) и стандартного требования решения задачи в целом, которое, практически невозможно согласовать с быстрым убыванием коэффициентов Фурье. Для двумерных данных соответствующие матрицы со скользящими по диагонали двумерными ФРТ есть четырехмерные, для трехмерных - матрицы девятимерные. Операция свертка в модели (1) позволяет представлять разрешающие функции  $R$  в размерности данных.

Двумерные и трехмерные задачи для компенсации искажений ФРТ по сравнению с матричными остаются "малоразмерными". Сборка и Препарирование Приборов реализуется в размерах порядка области определения -  $BPDF$ , те по числу точек в 1.5- 2 размера носителя ФРТ  $O$ . Это означает, что мы реализуем вычисления в окрестностях диагоналей четырехмерных и девятимерных матриц и не выполняем большую часть вычислений с нулями.

### Технологии вычислений, точность операций

Все расчеты реализованы в новой технологии Mathematical Analysis of Numerical Array Intellectual Tools (MANA IT) для массивов отсчетов + *BPDF*, которая базируется на теореме отсчетов. В MANA IT мы можем от массива отсчетов точно вычислить производную или интеграл как от непрерывной функции с результатом в той же полосе частот, те представимым массивом той же размерности [4,5], см. Рис. 17.

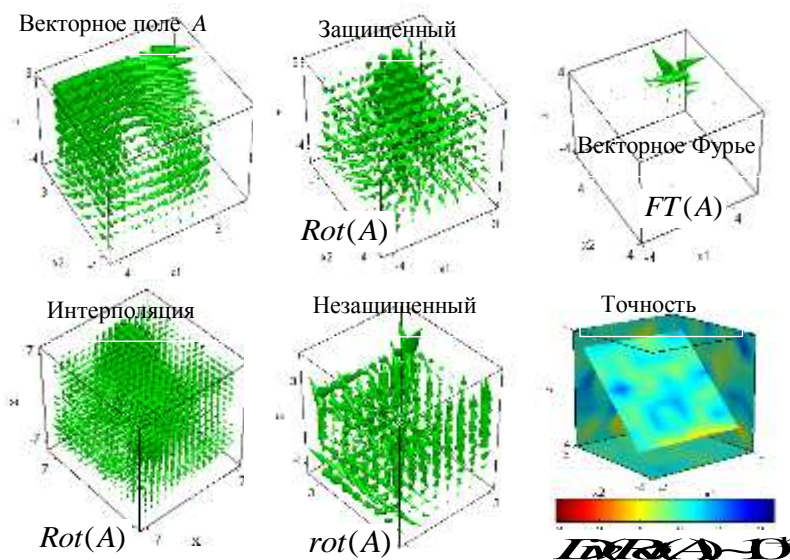


Рис.17. Операции дискретной теории поля, интерполяция и точность

### О сути проблемы

При постановках задач типа регуляризации мы должны ответить на вопрос “Почему так ставится задача?”, “ведь фиксированный прибор”  $O+BPDF$ , как правило, не обратим, а если обратим, то нет необходимости в соответствующей вариационной задаче. Попытки требования гладкости решений приводят к потере обратимости Аппаратных Функций. Да и вообще, в вариационных задачах следует оговаривать недопущение нерегулярных объектов типа “фиксированный прибор”.

Предлагаемый подход с RWI основан на резонансных свойствах дискретного преобразования Фурье в зависимости от *BPDF*. Поэтому в ответе на вопрос по сути проблемы “Как понимать решения обратных задач?” мы предлагаем обратные задачи рассматривать как обратимые по “Сборке” или как “Препарированные” под обратимые.



Рис.18. Распараллеливание вычислений по ядрам GPU

Это приводит к тому, что пространственные частоты, ослабленные МПФ  $M(O)$ , усиливаются МПФ  $M(R)$  с областью усиления  $M(R*O)=1$  в  $BPDF O$  – во всем кубе частот. В регуляризации  $M(R*O) \sim 1$  в шаре  $BPDF O$ .

Для исследования возможностей компенсации искажений Прибора достаточно его Аппаратной Функции. Только после этого можно говорить о приеме снижения размерности задачи - множестве АФ Приборов или данных с Многолучевой Системы. Все это соответствует новому методу решения уравнения Фредгольма 1 рода с заданной матрицей – ядром и правой частью – сигналом и интервальной оценкой решений. Возможно, что подобная процедура реализуется в фасеточных глазах насекомых.

#### Обсуждение

Исходя из ошибок задания ФРТ  $O$  и сигнала - экспериментальных данных, можно оценить ошибку (4) сверх разрешенного изображения. Подчеркнем, что никакие предположения о гладкости решений не требуются.

Все расчеты реализованы в технологии MANA IT. Такая технология необходима при точном моделировании размывания луча лазера и его последующей фокусировки в турбулентной среде [4] и для точного моделирования сверхразрешения и индикации в радарх с АФАР.

#### Литература

1. E.N. Terentiev, Yu. A. Pirogov, V.V. Gladun, et al., *Additional enhancement of resolution in multiray radio vision system*, Proc. SPIE, Vol. 4032: Passive Millimeter-Wave Imaging Technology IV, July 2000.
2. E.N. Terentiev, N.E. Terentiev: *Characterization of ultra-resolution method*, Proc. SPIE, Vol. 6246 (2006).
3. E.N. Terentiev, N.E. Terentiev: *Ultra-resolution and indication of objects*, Proc. SPIE, Vol. 6211 (2006).
4. F.V. Shugaev, E.N Terentiev, ...: *On the problem of beam focusing in turbulent atmosphere*, Proc. SPIE, vol. 6747 (2007).
5. E.N. Terentiev, N.E. Terentiev *Mathematics for characterization, modeling of vortex flows*, (PSFVIP-8) The 8<sup>th</sup> Pacific Symposium on Flow Visualization and Image Processing, Moscow, Russia, August 21<sup>st</sup>-25<sup>th</sup>, 2011.
6. E.N. Terentiev, N.E. Terentiev, Yu.V. Poluyanov *Super resolution, indication of 3D vector fields*, PSFVIP-8, 2011

ЛАБОРАТОРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КЛЮЧЕВЫХ ПРОЦЕССОВ В  
ГИДРОСФЕРЕ И АТМОСФЕРЕ С УЧЕТОМ ЭФФЕКТОВ  
СТРАТИФИКАЦИИ И ВРАЩЕНИЯ НА СТЕНДАХ  
УСУ «ГФК ИПМЕХ РАН»

Чашечкин Ю.Д.<sup>1</sup>, Чаплина Т.О.<sup>2</sup>, Левицкий В.В.<sup>1</sup>, Бардаков Р.Н.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Институт проблем механики РАН*

<sup>2</sup>*Физический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова*

**Введение.** Необходимость решения задач экологии, повышения надежности и точности прогноза погоды, оценки климатической изменчивости требует существенного повышения точности расчетов, как скоростей и сил, так и процессов переноса вещества. В сложных системах с физико-химическими процессами часто протекают взаимосвязанные процессы, чувствительные к значениям физических параметров среды. В результате тонких исследований ранее было установлено, что традиционно изучаемые макроскопические крупномасштабные течения, вихри и волны в реальных жидкостях дополняются тонкоструктурными компонентами, оказывающими большое влияние на геометрию и энергетику течения. Именно с такими сингулярно возмущенными компонентами связывается формирование вращающих моментов на препятствиях, фронтов и тонкой структуры течений в атмосфере и океане, «сверхдиффузионный» и «контргradientный» переносы.

Для прогноза динамики и идентификация условий формирования критических и катастрофических явлений в океане и атмосфере необходимо объединение математических моделей природных процессов с данными текущих контактных и дистанционных измерений. В существующих программах расчета используются осредненные модели (теории турбулентности, методы крупных вихрей), в которых мелкомасштабные процессы учитываются при подсеточной параметризации. Качество прогнозов не удовлетворяет сегодняшним практическим запросам.

В последние годы значительные результаты достигнуты на основании фундаментальных моделей течений однородных (гидродинамика) и сжимаемых (газовая динамика) сред, однако их результаты имеют ограниченное применение в физике океана. Реальные среды не являются однородными вследствие непостоянства фундаментальных параметров – плотности, температуры, концентрации растворенных веществ и взвешенных частиц. Хотя вариации плотности сравнительно невелики, градиенты плотности достигают больших значений и существенно влияют на структуру, динамику и энергетику протекающих процессов.

В механике океана фундаментальную роль играет изучение моделирования взаимодействия микроструктурных сингулярных и макроструктурных регулярных компонент течений, динамики их формирования, распространения и распада в широком диапазоне пространственно-временных масштабов и энергетических свойств процессов.

## 1. История лабораторного моделирования

В течение долгих лет основным объектом исследований в гидродинамике служило обтекание препятствий потоком однородной жидкости с целью определения действующих сил и моментов. В середине 19 века в Англии начало развиваться моделирование поверхностных волн с целью оптимизации формы корпусов судов, в том числе и с учетом действия пропульсивных механизмов.

Отдельные работы по изучению эффектов плавучести периодически появлялись в литературе, начиная с конца 18 века (опыты Б. Франклина, воспроизводящие колебания границы воды и слоя масла в корабельной осветительной лампе, Джевонса наблюдавшего “солевые пальцы” при попытке моделирования перистых облаков, У. Бревера и К. Баруса, открывших слоистые структуры боковой конвекции в суспензиях).

Систематическое применение лабораторного моделирования для изучения стратифицированных течений в геофизической гидродинамике началось с работ В. Экмана, который, по предложению Ф. Нансена изучал эффект “мертвой воды”. Во время своего знаменитого путешествия в Арктику в 1893-1896 годах Ф. Нансен несколько раз наблюдал “гайштенное” уменьшение скорости хода судна “Фрама” с 6 до 1,5 узлов. До этого потеря скорости и управляемости парусных судов наблюдалась в норвежских фьордах. Наблюдаемый эффект, который связан с возбуждением движущимся судном внутренних волн на границе раздела пресных и соленых вод, был изучен и проанализирован В. Экманом во всех деталях [1]. Через двадцать лет начали появляться отдельные экспериментальные работы по изучению многокомпонентной конвекции [2], в середине 40-х годов – по моделированию внутренних волн.

Лабораторное моделирование стало систематически развиваться в 70-х годах нашего столетия как инструмент для решения экологических проблем. Теневая визуализация внутренних волн в непрерывно стратифицированных средах позволила существенно развить и дополнить теорию диспергирующих волн. Наблюдения ламинарных и турбулентных струй, следов, процессов термоконцентрационной конвекции [3] способствовали углублению понимания физики гидросферы и решению ряда прикладных задач динамики окружающей среды.

В настоящее время в мире активно работают несколько центров моделирования геофизических течений. В России центры лабораторного моделирования геофизических течений располагаются в Москве (МГУ им. М.В. Ломоносова, Институт океанологии им П.П. Ширшова Российской академии наук, Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова Российской академии наук, Институте проблем механики Российской академии наук (ИПМех РАН), Санкт Петербурге, Новосибирске (Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН, Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН), Нижнем Новгороде (Институт прикладной физики Российской академии наук).

В ИПМех РАН функционирует уникальный гидрофизический комплекс для моделирования гидродинамических процессов в окружающей среде и их воздействия на подводные технические объекты, а также распространения примесей в океане и атмосфере УСУ «ГФК ИПМех РАН».

Комплекс стендов предназначен для моделирования влияния стратификации и вращения на тонкую структуру и динамику течений жидкости. Особенность

комплекса – масштабный ряд бассейнов с одинаковыми системами визуализации и измерительными инструментами, позволяющими регистрировать общую картину и тонкую структуру течений с высоким разрешением (до 0, 1 мм). Каждый из стендов УСУ «ГФК ИПМех РАН» включает уникальные теневые приборы типа ИАБ-458, ИАБ-463, а также оптические элементы и оборудование, которое серийно не выпускается отечественной и зарубежной промышленностью, лабораторные эхолокаторы, гидрофоны, контактные инструменты.

Гидрофизический комплекс УСУ «ГФК ИПМех РАН» включает следующие стенды: ТСТ-1 и ТСТ-2 размерами  $0.50 \times 0.50 \times 0.15$  и  $0.70 \times 0.70 \times 0.25$  м соответственно, ЛПБ –  $2.4 \times 0.4 \times 0.6$  м, ЭСВПП –  $1.5 \times 0.6 \times 0.6$  м, ЛВК –  $9.0 \times 0.6 \times 0.6$  м, БЛИК –  $7.1 \times 1.2 \times 1.2$  м, ВТК –  $0.64 \times 0.45 \times 0.70$  м, а также вспомогательные устройства и механизмы: стенды создания и контроля стратификации, волнопродукторы, механизмы перемещения моделей, теневые приборы, оптические и акустические системы регистрации, измерители температуры, удельной электропроводности, компьютеризованные системы управления экспериментом и обработки данных.

Функциональные возможности комплекса позволяют моделировать крупномасштабные геофизические течения (с уменьшением размеров), а также нано- и микроструктурные течения с высоким временным и пространственным разрешением, а также выполнять междисциплинарные исследования, в частности, объединенные гидрофизические и медико-биологические по совершенствованию новых методов оценки здоровья человека и эффективности применяемого лечения.

От аналогов УСУ «ГФК ИПМех РАН» отличает высокая разрешающая способность оптических и акустических инструментов, техническая оснащенность, позволяющая синхронизовать данные различных измерителей с разрешением до 1 мкс. Экспериментальные возможности комплекса позволяют моделировать широкий круг гидрофизических, акустических, оптических явлений, и осуществлять верификацию существующих и разрабатываемых физико-математических моделей процессов в гидросфере и атмосфере, повышать степень их достоверности и адекватности реальным течениям.

Лабораторные установки ИПМех РАН используются как для проведения научных исследований, так и в образовательных целях: для ознакомления с методами и результатами моделирования процессов в окружающей среде, проведения лабораторных работ, прохождения практики студентами и аспирантами физического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова, а так же студентами и аспирантами МФТИ и МИФИ.

## **2. Фундаментальные уравнения механики неоднородных жидкостей, критерии подобия и условия моделирования течений неоднородных жидкостей.**

Необходимость использования полной системы уравнений механики жидкостей, учитывающей свойства жидкостей и влияние градиентов термодинамических потенциалов на динамику течений, обоснованная еще в фундаментальном курсе [4], постепенно стала общепринятой и в геофизической, и в промышленной аэрогидродинамике. При таком подходе теряется универсальность классической гидродинамики однородной жидкости, параметры однотипных течений оказываются зависящими от индивидуальных особенностей

среды, выраженных уравнением состояния, на что настойчиво обращал внимание Д.И. Менделеев. Параметризации уравнений состояния многих жидкостей и газов посвящен ряд работ Д.И. Менделеева, получивших в свое время высокую оценку и в нашей стране, и за рубежом [5, 6].

В механике жидкостей свойство конкретной среды описываются уравнением состояния, выражающим зависимость плотности среды  $\rho$  от давления  $p$ , температуры  $T$  и концентрации растворенных (или взвешенных) частиц  $S$ . Уравнение состояния обычно линеаризуется, эффектами сжимаемости пренебрегается

$$\rho = \rho_0 \left( 1 - \alpha (T - T_0) + \alpha_S (S - S_0) \right), \quad \alpha = -\frac{1}{\rho} \left( \frac{\partial \rho}{\partial T} \right)_S, \quad \alpha_S = \frac{1}{\rho} \left( \frac{\partial \rho}{\partial S} \right)_T \quad (1.1)$$

$\alpha$ ,  $\alpha_S$  – коэффициенты температурного расширения и солевого сжатия;

$T_0$ ,  $S_0$  – реперные температура и соленость. Устойчивые невозмущенные распределения температуры  $T_0(z)$ , солености  $S_0(z)$  и плотности  $\rho_0(z)$  характеризуются масштабами  $\Lambda_\rho = \left| d \ln \rho_0(z) / dz \right|^{-1}$ ,  $\Lambda_T = \left| d \ln T_0(z) / dz \right|^{-1}$ ,  $\Lambda_S = \left| d \ln S_0(z) / dz \right|^{-1}$ , частотой  $N = \sqrt{g / \Lambda_\rho}$ ,  $N_S = \sqrt{g / \Lambda_S}$ ,  $N_T = \sqrt{g / \Lambda_T}$ , и периодом плавучести  $T_b = 2\pi / N$  ( $g$  – ускорение свободного падения, ось  $z$  – вертикальна).

Система фундаментальных уравнений механики неоднородных жидкостей (или газов) включает уравнение состояния Менделеева (1.1) и дифференциальные уравнения неразрывности Даламбера, переноса импульса Навье-Стокса, температуры Фурье и вещества Фика в приближении линейной термодинамики неравновесных процессов принимает вид

$$\rho = \rho(T, p, S)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v}) = 0$$

$$\frac{d\mathbf{v}}{dt} = -\frac{1}{\rho} \nabla p + \nu \Delta \mathbf{v} + \left( \zeta + \frac{1}{3} \nu \right) \nabla \operatorname{div} \mathbf{v} + \mathbf{g} - 2\boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{v} \quad (1.2)$$

$$\frac{dT}{dt} - \frac{\alpha T}{\rho c_p} \frac{dp}{dt} = \kappa_T \Delta T + \left( \frac{\partial \mu}{\partial S} \right)_{T,p} \frac{k_T \kappa_S}{c_p} \left( \Delta S + \frac{k_T}{T} \Delta T + \frac{k_p}{p} \Delta p \right)$$

$$\frac{dS}{dt} = \kappa_S \left( \Delta S + \frac{k_T}{T} \Delta T + \frac{k_p}{p} \Delta p \right)$$

где  $\mathbf{v}$  – скорость,  $\nabla$  и  $\Delta$  – операторы Гамильтона и Лапласа,  $\nu$ ,  $\zeta$ ,  $\kappa_T$ ,  $\kappa_S$ ,  $k_T$ ,  $k_p$  – коэффициенты 1-й и 2-й кинематической вязкости,



температуропроводности, диффузии соли, термо- и бародиффузии, соответственно,  $\mu = \mu(p, T, S)$  – химический потенциал смеси,  $c_p$  – теплоемкость при постоянном давлении,  $\Omega$  – угловая скорость вращения жидкости, центробежные силы включены в выражение для градиента давления.

В качестве граничных в макроскопической гидродинамике на твердых стенках выбираются условия прилипания для скорости и непротекания для вещества и температуры (для адиабатических систем, в других случаях задаются значения температуры или поток тепла на границах).

Уравнения (1.2), в которых при членах со старшими производными присутствуют кинетические (малые) коэффициенты образуют, систему сингулярно возмущенных уравнений. В линейном приближении порядок системы определяется степенью характеристического (дисперсионного) уравнения.

Используя закон сохранения массы, уравнение неразрывности выражается через производные термодинамических величин,

$$\alpha_p \frac{dp}{dt} - \alpha_T \frac{dT}{dt} + \alpha_S \frac{dS}{dt} = -\operatorname{div} \mathbf{v} \quad (1.3)$$

определяющих величину расхождения скорости.

**Характерные масштабы фундаментальной системы уравнений.** Система (1.2) с физически обоснованными граничными условиями характеризуется набором масштабов длины геометрической и динамической природы. Естественным масштабом времени служит период плавучести  $T_b$ .

Макромасштабы  $\Lambda$ ,  $\Lambda_T$ ,  $\Lambda_S$  характеризуют исходную стратификацию (обычно слабую, так что данные масштабы большие), геометрию задачи  $L$  (размер препятствия) и длину внутренней  $\lambda = UT_b$  или поверхностной  $\lambda = 2\pi U^2/g$  волны,  $U$  – скорость потока на бесконечности.

Микромасштабы характеризуют поперечные размеры (толщину) тонкоструктурных компонент течений диффузионной ( $\delta_N = \sqrt{\nu/N}$ ,  $\delta_T = \sqrt{\kappa_T/N}$  и  $\delta_S = \sqrt{\kappa_S/N}$  – в полях скорости, температуры и солёности, соответственно – аналогов масштаба Стокса  $\delta_\omega = \sqrt{\nu/\omega}$ ) и динамической природы ( $\delta_U = \nu/U$ ,  $\delta_{U,T} = \kappa_T/U$ ,  $\delta_{U,S} = \kappa_S/U$  – аналогов масштабов Прандтля и Пекле). Сходный набор масштабов с заменой частоты плавучести на скорость  $\Omega$  характеризует закрученные течения ( $\delta_\Omega = \sqrt{\nu/\Omega}$ ).

Отношения макро и микромасштабов задают традиционные безразмерные комплексы – числа Рейнольдса  $\operatorname{Re} = UL/\nu = L/\delta_U \gg 1$  и Пекле по температуре

и солености  $Pe_T = UL/\kappa_T = L/\delta_{U,T} \gg 1$ ,  $Pe_S = UL/\kappa_S = L/\delta_{U,S} \gg 1$  и

специфические отношения для стратифицированных сред, характеризующие изменения плотности  $\Delta\rho_0(L)$  (обычно малые) на собственных масштабах задачи

–  $C = \Lambda/L = \rho_0/\Delta\rho_0(L) \gg 1$ , относительную малость вязкости,

температуропроводности и диффузии:  $C_N = L/\delta_N = \sqrt{L^2 N/\nu} \gg 1$  (как и

$C_T = L/\delta_T$  и  $C_S = L/\delta_S$ , для растворов солей  $C_S \gg C_T \gg C_N$ ).

Параметры типа чисел Фруда (традиционного  $Fr = U^2/gL$  для поверхностных

волн или  $Fr_i = U^2/N^2 L^2$  для внутренних волн или число Россби  $Ro = U/\Omega L$

для инерциальных волн) характеризуют отношение длины соответствующей волны к геометрическому масштабу.

Адекватность физического моделирования соблюдается при выполнении условий геометрического, кинематического и динамического подобия. Условие геометрического подобия, задающее отношение размеров исходного объекта и его модели  $M$ , совместимо с критерием динамического подобия или для крупномасштабных компонент, или для тонкоструктурных компонент. На практике в качестве основного выбирается один из динамических параметров – число Рейнольдса при моделировании картины обтекания препятствия или число Фруда при изучении картины волн. При этом вводятся специальные ограничения на значение другого параметра, т.е. на величину предельного масштаба  $M$  и фиксируется значение величины стратификации  $N_m = N_n \sqrt{M}$  из условия инвариантности по числу Фруда и отношению масштабов  $C$  (или угловая скорость глобального вращения).

Значения масштабов макрокомпонент определяют минимальные размеры установки и поля зрения наблюдательного инструмента. Они должны быть достаточно большими, чтобы одновременно следить за несколькими волнами. Разрешающая способность инструментов определяется условиями регистрации тонкоструктурных элементов: сингулярных компонент (типа течения Стокса толщиной  $\delta_\omega = \sqrt{\nu/\omega}$  или Прандтля –  $\delta_U = \nu/U$ ). Среди них наиболее тонкими оказываются структуры в полях температуры и концентрации в силу малости коэффициентов переноса.

Наряду с системой (1.2) для расчета течений жидкости применяются конститутивные модели, среди которых наибольшее распространение получили уравнения теории нелинейных волн (солитонов), пограничного слоя в аэродинамике и турбулентности (во внутренней гидроаэродинамике или механике окружающей среды). На их основе получен ряд практически важных результатов. Однако прогностические возможности таких моделей ограничены, поскольку инфинитезимальные симметрии конститутивных моделей существенно отличаются от симметрий системы (1.2), отражающих инвариантные свойства

пространства, законы сохранения массы, импульса и энергии, эквивалентность инерциальных систем (преобразование Галилея). Расчеты картин течений на основе теорий турбулентности согласуются с наблюдениями в заданном диапазоне параметров. Однако такие модели не позволяют определять положения четких границ между структурными компонентами и параметры мелкомасштабного переноса вещества с требуемой степенью точности.

Следует подчеркнуть, что система уравнений (1.2), имеющая высокий порядок по пространственным переменным, содержит малые коэффициенты в членах со старшими производными и относится к сингулярно возмущенным уравнениям. Решения таких систем включают как регулярно, так и сингулярно возмущенные функции. Влиянием последних ранее априорно пренебрегалось.

В общем случае, сингулярно возмущенные решения, существенно расширяющие класс допустимых компонент течений, играют такую же важную роль, как и регулярно возмущенные. Их учет необходим при расчете и структуры, и динамики течений. В частности, состояние полного покоя, которое естественно выбирается в качестве начального в теории однородной жидкости, не существует в общем случае в стратифицированной среде. Вследствие прерывания потока стратифицирующей компоненты на твердой стенке, около неровностей рельефа или на наклонных твердых стенках возникают горизонтальные градиенты плотности и давления, которые формируют специфические течения, индуцированные диффузией.

### **3. Лабораторные установки для моделирования эффектов стратификации и вращения**

Для моделирования природных процессов во всем диапазоне параметров создаются комплексы лабораторных установок, с учетом требований, вытекающих из масштабного анализа определяющих уравнений. Лабораторный гидрофизический комплекс ИПМех РАН состоит из пяти установок различной конструкции для моделирования эффекта стратификации и двух установок для исследования динамики вихревых течений.

Для оценки влияния масштабных факторов эксперименты проводятся по единой методике в бассейнах различного размера, что позволяет оценивать влияние среды на точность динамических измерений. Методика предусматривает возможность одновременного применения эффективных дистанционных методов (оптических и акустических) и контактных измерителей параметров стратифицированных течений в выбранных точках пространства. Все бассейны оборудованы сходными вспомогательными, регистрирующими и измерительными системами, к которым относятся: система заполнения бассейнов стратифицированной жидкостью с заданным законом распределения плотности, механизм протяжки моделей, перемещения контактных измерительных преобразователей, волнопродукторы внутренних волн, инструменты визуализации на основе интерференционно-теневых приборов, а также система сбора и обработки информации на базе компьютерной техники.

К измерительной аппаратуре, работающей в стратифицированной среде, предъявляются особые требования, связанные с особенностью взаимодействия чувствительных элементов с окружающей средой и существенным изменением их динамических характеристик. Для визуализации профиля скорости применяются

подкраска среды, плотностные метки, взвешенные частицы, которые оказывают некоторое возмущающее воздействие на течение и не всегда строго отслеживают контролируемые параметры.

Минимальное возмущение в исследуемую среду вносят бесконтактные оптические теневые методы. Теневые приборы типа ИАБ (измеритель аберрации) позволяют реализовать различные методики: нож-щель, щель-нить, наклонная щель-нить, цветной теневой метод и шпирен-интерферометрию. Различные методики раскрывают фазовую картину поля внутренних волн, выявляют структуры в поле течения, позволяют провести количественные и качественные оценки градиента оптического коэффициента преломления и линейно связанного с ним градиента плотности. Система установки теневого прибора предусматривает возможность его полной юстировки в ходе каждого эксперимента для компенсации влияния начальной линейной стратификации.

В силу надежности основных элементов и высокого уровня автоматизации комплекс поддерживается в рабочем состоянии и эксплуатируется небольшим числом экспериментаторов. Отдельные установки комплекса эксплуатируются более десяти лет, при этом дополняются и совершенствуются. Наиболее важные научные направления, в которых используется комплекс: моделирование волновых процессов, изучение стратифицированных течений, термоконцентрационной конвекции, распространения акустических волн.



Рисунок 1. Стенд для моделирования эффектов в толще и на поверхности стратифицированной жидкости с аэро- и гидроакустической системой и теньевым прибором ИАБ-451 (ЭСВПШ).

Стенд ЭСВПШ включает в себя: генераторы поверхностных капиллярных волн электродинамического типа и внутренних волн с механическим генератором; дозатор для создания капель заданного размера; гидрофон для регистрации подводного звука; микрофон для регистрации звука в воздухе, сопровождающего течение жидкости (рис.1); лазерный измеритель параметров поверхностного волнения; теневой прибор ИАБ-451 для визуализации течений в толще жидкости; ком-

пьютерную систему для управления экспериментом, синхронизации контактных и дистанционных средств измерений, одновременной регистрации данных оптических, акустических и контактных измерений и визуализации процессов в реальном масштабе времени.

Для расширения функциональных возможностей установки и регистрации картины быстропротекающих процессов в нескольких направлениях в состав стенда ЭСВПИ введена скоростная видеокамера 5 типа Optronis CR3000x2 в дополнение к ранее использованной видеокамере Photron Fastcam 1024 PCI, позволяющая регистрировать быстропротекающие процессы и короткоживущие компоненты различных течений.

Для исследования обтекания препятствий изготовлен стенд «Лабораторный передвижной бассейн» (ЛПБ), рабочий бассейн которого можно сдвигать относительно теневого прибора непосредственно в ходе опытов. Его размеры составляют 2,2 x 0,4 x 0,6 м (рис. 2). Корпус бассейна выполнен из оргстекла, а по длинным боковым сторонам вставлены по три иллюминатора из оптического стекла. Бассейн установлен на подвижной раме, которая может перемещаться по неподвижному основанию.

ЛПБ оснащен эхолотами, излучателями и приемниками звука для проведения одновременных гидрофизических и гидроакустических работ. Трехкоординатное устройство перемещения датчиков имеет дистанционное управление. Контроль за всеми электромеханическими устройствами осуществляется с единой приборной стойкой, которая может перемещаться вокруг бассейна для удобства эксперимента.

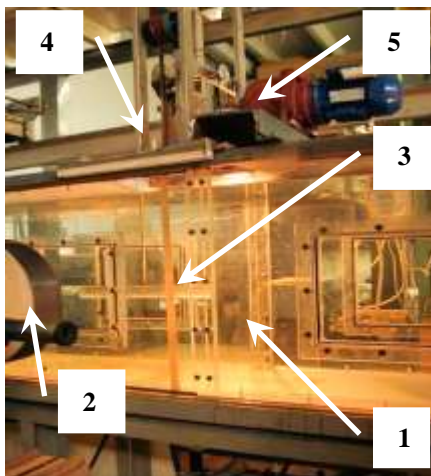


Рисунок 2. Общий вид модернизированного бассейна ЛПБ.

Теневые изображения, иллюстрирующие эволюцию картины течения при начале работы генератора приведены на рисунке 5.

Для изучения турбулентных пятен, турбулентных струй и следов, дискретных вихрей и вихревых систем, а также для повторения отдельных экспериментов,

Бассейн 1 (рис. 2) оснащён теневым прибором 2 модели ИАБ – 458 для визуализации картин течения в экспериментах (на рисунке видна его приёмная часть). В поле зрения прибора установлен исследуемый цилиндр 3, закреплённый на кривошипно-ползунном механизме 4. Привод механизма осуществляется через планетарный редуктор 5 асинхронным двигателем.

Преобразователь частоты для питания электродвигателя предусматривает как ручное управление, так и управление с помощью внешнего устройства (при разработке соответствующего программного обеспечения).

выполненных в бассейнах меньшего размера с целью оценки масштабных факторов, используется наиболее сложная установка – Большой Лабораторный Измерительный Комплекс (БЛИК) (рис. 3).

Как и все предыдущие установки, БЛИК включает бассейн размером 7,0 x 1,2 x 1,2 м, боковые стенки которого частично изготовлены из оптического стекла, систему создания стратификации, трехкоординатное устройство перемещения датчиков, отдельные электромеханические генераторы поверхностных и внутренних волн, механизмы протяжки моделей, систему оптической визуализации, а также устройство генерации кольцевых и примыкающих вихрей. Оптические иллюминаторы высокого качества позволяют использовать все известные оптические методы (прямой теневой, шлирен-интерферометрический, теневой) по всей высоте бассейна.



Рисунок 3. Бассейн стенда БЛИК 7×1.25×1.25 м с волнопродуктором, кареткой и теневым прибором ИАБ-463.

Система заливки бассейна предусматривает как непрерывную заливку методом непрерывного вытеснения, так и послойную. В систему входят баки, центробежный насос, соединительные шланги, клапаны и вентили. Общий объем бассейна составляет 8,4 м<sup>3</sup>, время его заполнения – 11 часов.

Система заполнения позволяет создавать линейно стратифицированную жидкость с периодом плаучести  $T_b = 6 \div 25$  с, а также другие типы стратификации – двухслойную, многослойную, с произвольным законом изменения плотности по высоте. При разрушении стратификации раствор из нижних слоев перекачивается в баки для повторного использования.

Установка БЛИК, так же как и остальные стенды, оснащена устройством трехкоординатного позиционирования контактных датчиков для установки их в заданную точку внутри бассейна, сканирования датчиками по трем координатам при измерении пространственных профилей гидрофизических параметров, или их перемещения на заданном расстоянии от модели. Погрешность установки датчиков составляет около 1 мм, скорость их перемещения находится в пределах 0,1÷1 см/с. Бассейн позволяет применять как лабораторные приборы, так и малогабаритные типы измерителей параметров и процессов в морской среде (в частности зонды и буксируемые датчики).

Установка БЛИК, так же как и остальные стенды, оснащена устройством трехкоординатного позиционирования контактных датчиков для установки их в заданную точку внутри бассейна, сканирования датчиками по трем координатам при измерении пространственных профилей гидрофизических параметров, или их перемещения на заданном расстоянии от модели. Погрешность установки датчи-

ков составляет около 1 мм, скорость их перемещения находится в пределах  $0,1 \div 1$  см/с. Бассейн позволяет применять как лабораторные приборы, так и малогабаритные типы измерителей параметров и процессов в морской среде (в частности зонды и буксируемые датчики).

Системы буксировки обеспечивают перемещение моделей по направляющей или на ноже, закрепленном на каретке на определенном горизонте. Диапазон скоростей буксировки моделей составляет  $0,1 \div 10$  см/с. Измерения могут осуществляться как в фиксированных точках бассейна, так и на заданном расстоянии от модели. Буксировка модели может осуществляться не только по линейной, но и по сложной пространственной траектории. Управление всеми электроприводами сведено в единый блок управления исполнительными механизмами, имеющий выход на ЭВМ.

С целью проверки эффективности различных методов возбуждения внутренних волн в комплект бассейна включены два генератора внутренних волн: вытеснительный и осциллирующий. Волнопродукторы работают в диапазоне частот  $0,03 \div 1$  Гц, амплитуда смещений излучателя устанавливается в диапазоне  $0,2 \div 15$  см.

Для визуализации поля плотности используется интерференционно-теневого прибор ИАБ-463 с диаметром поля зрения 400 мм, позволяющий реализовать все основные методы исследований оптических неоднородностей. Ввиду того, что приемная и передающая части прибора ИАБ - 463 громоздки и весят 450 кг каждая, разместить их по классической схеме невозможно, в том числе и вследствие трудности его перенастройки при изменении стратификации. При толщине слоя исследуемой жидкости 1,2 м лучи могут отклоняться на значительные углы (до  $6^\circ$ ) в зависимости от величины градиента плотности среды. Вследствие этого к механизмам юстировки теневого прибора предъявляются противоречивые требования: они должны быть достаточно мощными, но в то же время обеспечивать необходимую точность.

В состав экспериментального комплекса Лаборатории механики жидкостей ИПМех РАН входит еще один стенд, предназначенный для изучения формы свободной поверхности жидкости над вихревым течением в вертикальном цилиндрическом контейнере, вблизи нижнего торца которого вращается индуктор, приводя в движение жидкость.

Экспериментальный стенд представляет собой бассейн из прозрачного полиметилметакрилата, выполненный в виде параллелепипеда размерами  $636 \times 446 \times 700$  мм без верхней грани (рис. 4). Все грани параллелепипеда выполнены из листового органического стекла толщиной 20 мм. Сквозь геометрический центр нижней грани проходит вал, соединенный напрямую с электромотором, ось вала совпадает с осью вращения электромотора. Для сохранения жесткости всей конструкции, она заключена в раму из металлического швеллера. Бассейн закрепляется внутри рамы при помощи винтов. Электромотор может вращать индуктор равномерно с различными угловыми скоростями в пределах от 200 до 2300 об/мин. Измерение частоты вращения вала двигателя (соответственно и диска) проводится с помощью оптического датчика, соединенного с частотомером. Плавная регулировка частоты вращения вала двигателя осуществляется с помощью кругового реостата, рычаг регулировки которого располагается на передней панели блока управления двигателем. Там же находится тумблер включения двигателя.



Рисунок 4. Общий вид экспериментальной установки «Вихревые течения с кручением» (ВТК).

Бассейн заполняется отстоянной водопроводной водой комнатной температуры. Уровень жидкости задается отдельно для каждой серии экспериментов. Для сохранения постоянного объема жидкости внутри обечайки нижний ее торец устанавливается на резиновое кольцо-прокладку, исключающую переток между внутренним объемом обечайки и остальной частью бассейна. Верхний фиксирующий механизм обеспечивает герметичность данного соединения. Освещение рабочего объема жидкости производится галогеновым прожектором мощностью 500 Вт.

Условия освещения (угол и высота расположения прожектора) подбираются так, чтобы при дальнейшей обработке изображения все детали свободной поверхности жидкости были видны и различимы (граница свободная поверхность – воздух должна быть видна очень четко на всем своем протяжении).

Управление экспериментом, сбор и обработка информации осуществляется с помощью блока управления и регистрации на базе ЭВМ, позволяющем автоматизировать измерения, решать различные модельные задачи, устанавливать соответствие теоретических моделей и экспериментальных данных.

В настоящее эксплуатируется большое число бассейнов с температурной и солевой стратификацией. Данный комплекс отличается от них несколькими особенностями:

- наличием масштабного ряда бассейнов, позволяющих проводить опыты при одной и той же стратификации с моделями различного размера;
- возможностью реализовать все виды высокоразрешающих оптических методов, включая теневые и интерферометрические;
- широким набором вспомогательных устройств и механизмов, позволяющих создавать основные формы свободных движений стратифицированных сред (струи, вихри, следы, турбулентные пятна, внутренние волны, конвективные течения) и их комбинации.

Возможности комплекса УСУ «ГФК ИПМех РАН» с его уникальным оборудованием далеко не исчерпаны и могут быть расширены, например, путем проведения интеркалибровок измерительных преобразователей, применяемых для натуральных исследований, а также сравнительных динамических и статических градуировок различных океанических приборов. Конструкция стендов допускает оснащение оптическими и радиолокационными приборами, моделирующими авиационные и спутниковые системы дистанционного зондирования океана.



#### 4. Результаты экспериментальных исследований лабораторного моделирования течений и волн в стратифицированных средах

В 30 годы прошлого века теневой метод, разработанный для исследований астрономической оптики, стал широко применяться в газовой динамике, где коэффициент преломления меняется незначительно, а вариации его градиента велики [7]. В конце 60 годов прошлого века теневые приборы стали применяться для визуализации стратифицированных течений, где и коэффициент преломления, и его производные не являются медленно меняющимися величинами [8]. При этом изменилась процедура настройки теневого прибора. Угловое положение осветительной и приемной частей выбирается с учетом величины отклонения луча в исследуемой среде, которая в свою очередь зависит от величины стратификации. Среда является эквивалентом оптической призмы, разлагающей белый свет на спектральные компоненты, что используется для получения цветного теневого изображения, обладающего повышенной информативностью по сравнению с черно-белым.

В качестве примера на рис. 5 приведены теневые изображения, иллюстрирующие эволюцию картины течения на цилиндре, совершающем вертикальные колебания в непрерывно стратифицированной жидкости.

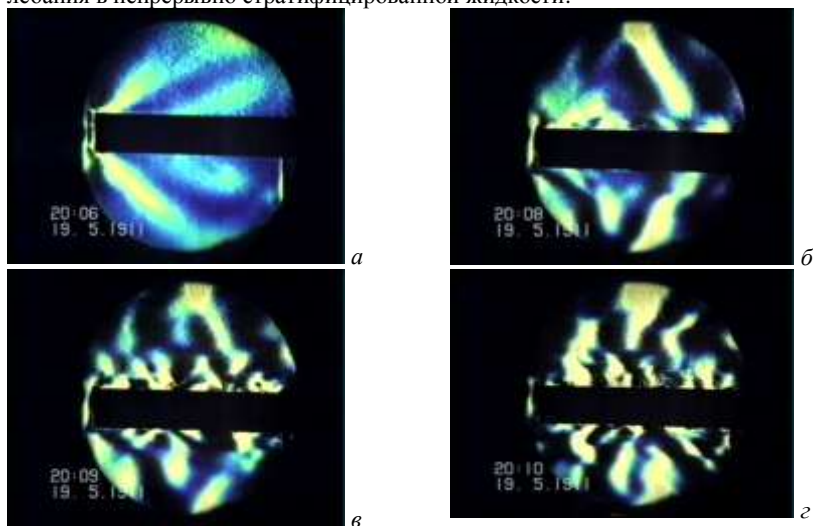


Рисунок 5. Эволюция картины течения на цилиндре, совершающем вертикальные колебания в непрерывно стратифицированной жидкости:  $a - z) - t = 1.0; 1.75; 3.5; 6.0$  мин, период плавучести  $T_b = 12$  с, диаметр цилиндра  $D = 4$  см, период и амплитуда колебаний  $T_\omega = 13.7$  с;  $A = 1.6$  см.

Сразу же после начала движения на концах цилиндра начинают формироваться пучки внутренних волн (темная и светлая наклонные полосы), распространяющиеся вдоль поверхности цилиндра (рис. 5, *a*). Спустя 1 минуту и 44 секунды по-

сле начала движения тела первый клин внутренних волн достигает свободной поверхности жидкости в бассейне, отражается от нее и доходит до осциллирующего тела. Такая же картина наблюдается и в нижней части изображения, где волновой пакет отражается от дна бассейна (рис. 5, б).

Спустя 3.5 минуты однородной течения вдоль поверхности цилиндра нарушается. Появляющиеся вихревые элементы служат источниками собственных групп волн, образующих последовательность темных и светлых полос (рис. 5, в). Со временем картина еще более усложняется, в ней оказываются выраженными относительно длинные внутренние волны, более короткие внутренние волны и вихревые системы, околтуренные высокоградиентными оболочками (рис. 5, г).

Опыты показывают, что непрерывность эволюции структуры течения свидетельствует об устойчивости работы волнопродуктора, что является необходимым условием для проведения количественных измерений в будущем.

Теневые картины, полученные различными методами, не являются подобными. Метод ножа является наиболее чувствительным, но изображения волн, попадающие за границы рабочего диапазона прибора, затемняют менее контрастные мелкомасштабные элементы течения. Метод нити визуализируют только линии гребней и впадин волн и позволяют на их фоне регистрировать более тонкие структуры. Чувствительность и разрешение цветного теневого метода можно регулировать, меняя шаг и тип визуализирующей решетки. Таким образом, применение трех независимых методов повышает достоверность и надежность результатов [7].

Высокоразрешающие теневые методы позволяют выделить в поле внутренних волн новые структурные элементы – уединенные висячие разрывы, изображения которых приведены на рис. 6. Специфические вихревые слои образуются непосредственно в поле внутренних волн и не контактируют с препятствием или стенками бассейна.

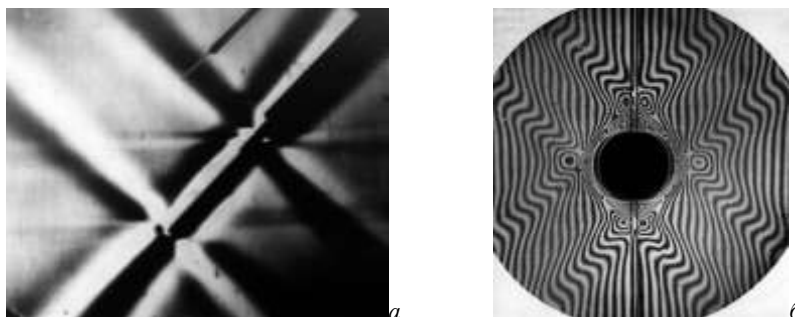


Рисунок 6. Теневое (а) и интерферометрическое (б) изображения пучков двумерных внутренних волн, возбуждаемых осциллирующей наклонной пластиной (а) и горизонтальным цилиндром (б).

Типичная эволюция картина течения около горизонтального диска, совершающего гармонические кругильные колебания в жидкости с периодом плавучести  $T_b = 10$  с, приведена на рис. 7. В ходе установления течения в теневой картине

наблюдается последовательность прослоек, расположенных параллельно плоскости диска, и внешних вложенных кольцевых структур, к которым примыкают наклонные диффузные полосы (рис. 7, б, два полных колебаний диска). Горизонтальные прослойки визуализируют высокоградиентные тонкоструктурные компоненты течения.

Система кольцевых структур, примыкающих к внешнему краю диска, визуализирует два семейства кольцевых вихрей, образующихся с каждой стороны диска. Жидкость в этих вихрях совершает сложное движение. Она вращается в вертикальной плоскости вокруг круговой оси каждого кольца: против часовой стрелки выше диска и по часовой – ниже.

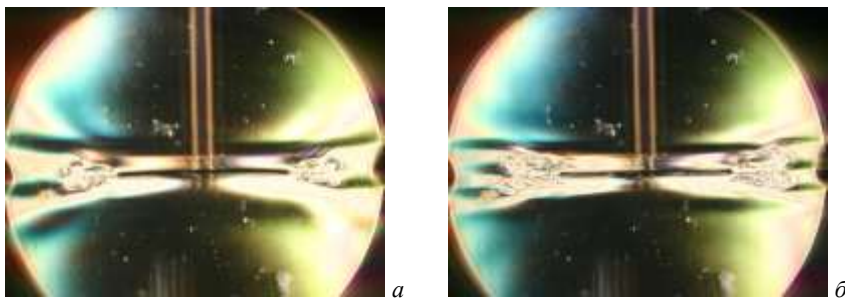


Рисунок 7. Эволюция картины течений в стратифицированной жидкости около диска, совершающего крутильные колебания а, б) -  $t = 54, 110$  с,  $R = 5$  см,  $h = 3$  мм,  $\omega = 0.23$  с<sup>-1</sup>,  $A = 3/2\pi$ ,  $N = 0.63$  с<sup>-1</sup>.

Кроме того, вся структура вращается как целое вокруг вертикальной оси, следуя движению диска. Все вихри являются нестационарными, ускоряющимися в фазе формирования и замедляющимися после отторжения от кромки диска новой парой колец, вращающихся в противоположную сторону. Пара примыкающих к диску вихревых колец фактически является тороидальным диполем, в центре которого располагается плоское отходящее течение.

При большей амплитуде колебаний диска рис. 8 система кольцевых структур, примыкающих к внешнему краю диска, через два-три периода колебаний начинает дробиться вдоль края диска, образуя систему вертикальных вихревых колец "наннанных" на основную кольцевую структуру.

Так же как и в однородной среде, диск формирует среднее течение [9], в котором жидкость подтекает вдоль вертикальной оси и отбрасывается в окрестности плоскости диска, формируя в стратифицированной среде пучок диссипативно-гравитационных волн.

Поскольку тонкоструктурные элементы – остатки внешних колец – существуют длительное время, они накапливаются в окрестности внешней кромки диска и формируют область частично перемешанной жидкости, в которой и происходит торможение сходящих с кромки колец.

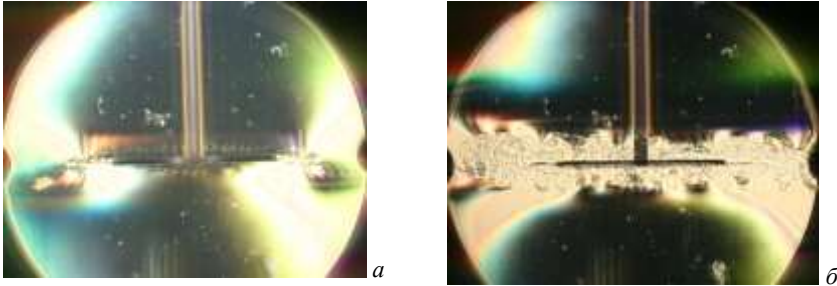


Рисунок 8. Теневое изображение течений, вызванных крутильными колебаниями диска  $A=3/2\pi$ ): а, б) -  $t = 10, 50$  с,  $T_b = 10$  с,  $R = 10$  см,  $h = 0.3$  см,  $\omega = 0.23$  с<sup>-1</sup>.

### Заключение

Гидрофизический комплекс для моделирования гидродинамических процессов в окружающей среде и их воздействия на подводные технические объекты, а также распространения примесей в океане и атмосфере УСУ «ГФК ИПМех РАН» предназначен для моделирования свободных стратифицированных течений, механизмов образования тонкой структуры природных систем в гидрооптических бассейнах различного объема (от 0,04 м<sup>3</sup> до 10 м<sup>3</sup>). С целью обеспечения единства измерений во всех бассейнах используются единые методики наблюдений и измерений параметров процессов.

Комплекс оборудован современной компьютерной системой сбора, анализа и представления измерительной информации, синхронизации оптических, акустических и контактных инструментов. Совместное применение разнообразных методов оптической визуализации, эхолокации, микроконтактных преобразователей удельной электропроводности, температуры и скорости звука позволяет получать уникальные результаты.

Вспомогательные механизмы позволяют проводить динамическую и статическую градуировку измерительных преобразователей для лабораторных и натурных условий, интеркалибровку измерительной техники, применяемой для натурных исследований, проверку ее возможностей при измерении тонкой структуры природных динамических процессов.

Комплекс используется для решения интегрированных экологических задач. Основная особенность данного комплекса – применение высокоразрешающих оптических систем (на базе ИАБ-451, 458, 463) и полевых методов, обеспечивающих непрерывное измерение скорости и плотности среды.

Одним из основных экспериментальных достижений является идентификация тонкоструктурных компонент во всех типах течений непрерывно стратифицированных сред. Характерные масштабы таких компонент определяются диссипативными свойствами и частотой плавучести среды и совпадают с масштабами течений, индуцированных диффузией на непроницаемых наклонных поверхностях в покоящихся непрерывно стратифицированных средах.

Возможности комплекса с его уникальным оптическим и акустическим оборудованием исчерпаны далеко не полностью и могут быть значительно расширены как в части номенклатуры изучаемых процессов, так и состава дополнительно привлекаемых измерительных систем. Отдельные установки комплекса, которые эксплуатируются более пятнадцати лет, постоянно дополняются и совершенствуются. Уточняется методика переноса лабораторных результатов на природные условия, базирующаяся на анализе полной системы уравнений термогидромеханики стратифицированных сред. Комплекс может быть дооснащен оптическими и радиолокационными приборами, моделирующими авиационные и спутниковые системы дистанционного зондирования океана.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (Проект 12-01-00128а) на стендах УСУ «ГФК ИПМех РАН».

### Литература

1. Ekman H.W. On dead water // The Norwegian North Polar Expedition 1883-1886. Christiania. 1904. V.V. Ch. XV.
2. Mendelhall C.E., Mason M. The stratified subsidence of fine particle // Proc. of Natl. Acad. of Sci. of the USA. 1923. V. 9. № 6. P. 199-202.
3. Лайтхилл Дж. Волны в жидкостях. М.: Мир. 1981. 598 с.
4. Ландау Л. Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика. Т. 3. Механика сплошных сред. Гидродинамика и теория упругости. М.-Л-д: ОГИЗ ГИТТЛ. 1944. 736 с.
5. Менделеев Д.И. О сопротивлении жидкостей и о воздухоплавании. СПб: Тип. Демакова. 1880.
6. Менделеев Д.И. Исследование водных растворов по удельному весу. СПб: Тип. Демакова. 1887. 520 с.
7. Максудов Д.Д. Теневые методы исследования оптических систем. Серия «Проблемы новейшей физики». Л-Д, М.: ГТТИ. 1934. Выпуск XXIII. 172 с.
8. Скотников М.М. Теневые количественные методы в газовой динамике. М.: Наука. 1976. 160 с.
9. Кистович Ю.В., Чашечкин Ю.Д. Точное решение одной линеаризованной задачи излучения монохроматических внутренних волн в вязкой жидкости // Прикладная математика и механика. 1999. Т.63. Вып. 4. С. 611-619.

УДК 551.46

## ЭВОЛЮЦИЯ КАРТИНЫ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПРИМЕСЕЙ В ВИХРЕВЫХ ТЕЧЕНИЯХ

Чашечкин Ю.Д.<sup>1</sup>, Степанова Е.В.<sup>1</sup>, Чаплина Т.О.<sup>2</sup>, Беседина А.В.<sup>1</sup><sup>1</sup>Институт проблем механики РАН<sup>2</sup>Физический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова

### Введение

Вихревые течения остаются одним из постоянно изучаемых объектов на протяжении всей культурной истории человечества. Интерес обусловлен их распространенностью, четкой структурой и медленным затуханием. Структурные особенности вихревых течений – замкнутые или спиральные геометрии (и такие же траектории выделенных частиц), позволяют идентифицировать отдельные вихри на фоне сложных процессов и разрабатывать их теорию. Масштабы вихревых течений простираются от галактических до молекулярных размеров (квантовые вихри в сверхпроводящей жидкости). Изучение вихревых течений представляет большой практический интерес. Гигантские атмосферные вихри (тайфуны, ураганы) и более компактные вихри (торнадо) обладают огромным разрушительным действием, наносимый ими ущерб трудно оценить [1]. Наблюдаются и более мелкие вихри, по форме напоминающие колонны – смерчи в атмосфере и водовороты в водной толще (наиболее известны водовороты Мальстрема и Наруто). Вихревые течения в толще жидкости приводят к формированию характерных структур на свободной поверхности, содержащих информацию об их геометрии и динамике.

Развитие методов дистанционного зондирования способствовало получению большого числа впечатляющих изображений вихревых течений в атмосфере и океане с выраженными спиральными рукавами, разделенными полосами базового вещества (рис. 1). Выраженные спиральные рукава регистрируются как в установившихся течениях, так и в нестационарных, созданных волнами цунами после сильного землетрясения.

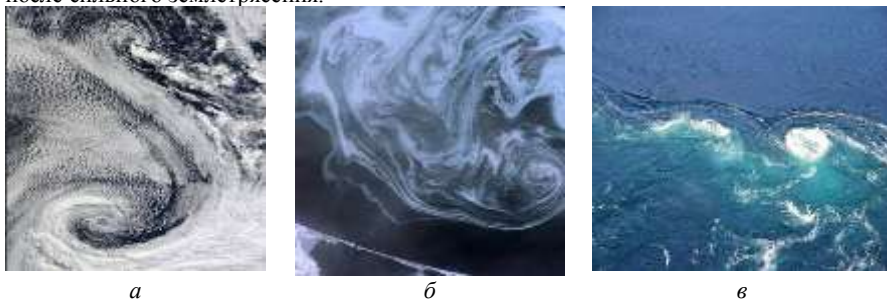


Рис. 1. Вихревые структуры различных масштабов: а) – циклон над Атлантикой [2], б) - спутниковое изображение плавучего льда в Охотском море (NASA), в) – водоворот Сальстраумен (Норвегия) [2].

Особый практический интерес представляет изучение процессов переноса вещества в атмосфере и океане. По мере роста экономики и развития производств в природную среду попадает все большее количество химически активных веществ и соединений, в том числе экологически опасных, которые попадают и в воздушный бассейн, и в гидросферу. Для контроля уровня загрязненности и обеспечения экологической безопасности или даже для планирования эвакуации людей необходимо оценивать перенос вещества из компактного источника в сложившихся гидрометеорологических условиях. На перенос вещества влияют течения в гидросфере – аналог ветра в атмосфере, вихри и волны (стоков дрейф). Необходимые условия стационарности и воспроизводимости достаточно сложно реализовать и в естественных условиях и в эксперименте: многие типы вихрей обладают самодвижением, и затухают под действием ряда факторов. Стационарное вихревое движение реализуется в установках, обеспечивающих глобальное вращение жидкости, которые размещаются на вращающейся платформе [3] или в контейнерах с равномерно вращающимися индукторами [4]. Обычно примесь используется в качестве индикатора поля скоростей, условия ее введения контролируются недостаточно полно.

Результатам экспериментального изучения переноса маркирующей примеси в вихре при заданных условиях ее введения, посвящено всего несколько работ. В первой из них [5], где в качестве источника использовалось окрашенное пятно на поверхности, уже было замечено образование спиральных структур на поверхности и “стены краски” в ее толще. В следующей близкой работе, которая появилась спустя более чем тридцать лет [6], была отмечена аналогия между эффектами вращения и стратификации, которая позднее была обоснована математически [7]. Хотя впечатляющие фотографии из первой публикации [5] вошли в известные монографии [8], процесс переноса маркирующей примеси из компактного источника в вихревом течении систематически не изучался.

Для реализации условия стационарности вихревого течения в качестве объекта исследования выбран составной вихрь, образующийся при равномерном вращении диска, установленного на дне цилиндрического контейнера. Подобный источник движения использовался во многих работах [4], однако, контейнер закрывался твердой крышкой. В данных исследованиях свободная поверхность жидкости оставалась открытой, что позволяло реализовать различные способы дозированного введения маркирующей примеси и контролировать ее перенос и вдоль свободной поверхности, и в толще жидкости.

#### **Экспериментальная установка и параметры изучаемого течения.**

Эксперименты проводились на стенде «Вихревые течения с кручением» (ВТК), которых входит в состав уникального гидрофизического комплекса для моделирования гидродинамических процессов в окружающей среде и их воздействия на подводные технические объекты, а также распространения примесей в океане и атмосфере УСУ «ГФК ИПМех РАН». Установившееся вихревое течение создается вращающимся диском, установленным на дне цилиндрического контейнера, который для уменьшения оптических искажений помещался в открытый прямоугольный бассейн из прозрачного полиметилметакрилата. Схема установки ВТК и физические характеристики рабочих сред приведены в [9].

Поддержание неизменными условий эксперимента (глубины слоя жидкости, размеров и частоты вращения диска, диаметра цилиндрического контейнера) обеспечивало воспроизводимость картины вихревого течения в широком диапазоне режимов. Открытая свободная поверхность позволяла применять различные типы маркирующих примесей и контролировать условия их введения.

В качестве растворимых маркеров использовались анилиновые чернила различных цветов, нерастворимым маркером служило рафинированное подсолнечное масло.

Маркирующая примесь заданного объема в одних экспериментах предварительно помещалась на чистую поверхность покоящейся жидкости, затем индуктор приводится во вращение с постоянной угловой скоростью. В другой же серии опытов маркирующая примесь вводилась уже во вращающуюся жидкость. Измерения проводились после установления течения и окончания всех переходных процессов.

### Параметры изучаемого течения.

В простом по геометрии эксперименте возникало достаточно сложное течение, включающее как вихревую, так и волновые компоненты и в толще, и на свободной поверхности жидкости. Схема течения показана на рис. 2.

Равномерно вращающийся диск, вследствие условия прилипания, закручивает жидкость вокруг вертикальной оси и одновременно отбрасывает ее вдоль своей поверхности к стенке контейнера. Ускоренная жидкость поднимается вдоль стенок контейнера, смещается к центру вдоль свободной поверхности и погружается в окрестности оси вращения, формируя подтекающее к центру диска течение, компенсирующее постоянный перенос вещества вдоль его поверхности. Непосредственно над поверхностью диска частицы вращаются и одновременно смещаются от центра к кромке.

Наблюдаемую картину течения можно схематично свести к комбинации двух вихрей, один из которых вертикальный цилиндрический (вокруг вертикальной оси, угловая скорость  $\omega_c$ ), а другой – тороидальный, с круговой осью, охватывающей центральную вертикальную ось с локальной угловой скоростью  $\omega_t$  (рис. 2, а). В результате их совместного действия формируется сложное течение, в котором частицы жидкости движутся по спиральным и винтовым траекториям. Композиционное течение, образованное наложением двух вихрей, характеризуется суммарной частотой  $\omega = \omega_c + \omega_t$ .

Вихревое течение формирует поверхность сложной формы, характеризующей распределение давления в жидкости (рис. 2, б). Глубина каверны зависит от радиуса цилиндрического контейнера  $R_0$ , частоты вращения диска-активатора  $\Omega$ , его размеров  $R$  и шероховатости, глубины слоя жидкости  $H$ .

Форма центрального сечения каверны характеризуется функцией  $\zeta(r, \varphi)$  (рис. 2, б), на которую накладываются периодические возмущения – волны различного вида (инерциальные, гравитационные, капиллярные), амплитуды и длины. Для их классификации используются характерные пространственно-временные масштабы, позволяющие разделить крупномасштабные (инерциальные



волны) и более короткие спиральные волны меньшей амплитуды (рис. 2, б), которые в данной работе детально не изучались.

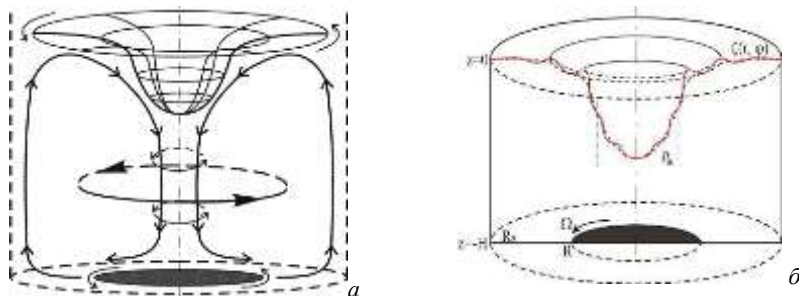


Рис. 2. Постулируемая схема течения, возникающего в цилиндрическом контейнере под действием диска: а) – общий вид, б) – центральное сечение свободной поверхности составного вихря с волновыми возмущениями.

Собственные вертикальные колебания слоя жидкости глубиной  $H$  в поле силы тяжести  $g$  характеризует частота основной моды в приближении мелкой воды  $\Omega_H = \sqrt{g/H}$ . Равенство гравитационного  $g$  и центробежного  $\Omega^2 R$  ускорений на кромке диска задает критическое значение инерциальной частоты  $\Omega_I = \sqrt{g/R}$ . Другая критическая частота задается условием  $\Omega_E = \sqrt{gH/R}$ . Приведенные частоты связаны соотношением  $\Omega_I^2 = \Omega_H \Omega_E$ . При переходе частоты вращения диска через указанные критические значения может меняться картина течения.

Система фундаментальных уравнений для течения однородной несжимаемой вязкой жидкости, включающая уравнения Навье-Стокса и неразрывности Даламбера, а также граничные условия прилипания на твердых стенках и постоянства давления на свободной поверхности, представлена в [9].

В течении с мгновенной угловой скоростью вращения жидкости  $\omega$ , которое возбуждается диском, вращающимся с угловой скоростью  $\Omega$ , определяющими служат инерциальные масштабы, задаваемые отношениями ускорения свободного падения к угловой скорости вращения диска –  $\Delta_\Omega = g/\Omega^2$  и частиц жидкости –  $\Delta_\omega = g/\omega^2$  и микромасштабы, характеризующие сингулярно возмущенные компоненты (пограничные слои Стокса) на диске –  $\delta_\Omega = \sqrt{\nu/\Omega}$  и других контактных поверхностях –  $\delta_\omega = \sqrt{\nu/\omega}$ , в том числе и на свободной поверхности.

Динамические условия опыта характеризует основные безразмерные параметры – числа Рейнольдса  $Re = (R^2 \Omega)/\nu$  (также используется число Экмана  $Ek = 1/Re$ ) и Фруда  $Fr = (R^2 \Omega^2)/gH$ . Течение двухслойной среды

дополнительно характеризуют числа Атвуда  $At = (\rho_1 - \rho_2) / 2(\rho_1 + \rho_2)$  и Бонда  $Bo = gH^2(\rho_1 - \rho_2) / \sigma$ , где  $\rho_1$  и  $\rho_2$  – плотности составляющих жидкостей. Дополнительные безразмерные параметры задачи определяются отношениями характерных линейных размеров:  $\xi_H = R_0 / H$  – относительная глубина контейнера,  $\xi_R = R_0 / R$  – относительный радиус индуктора. При значениях  $\xi_H \gg 1$  контейнер считается мелким, а при  $\xi_H \ll 1$  – глубоким.

Изучаемые в данных опытах течения характеризуются числами Рейнольдса в диапазоне  $5\,000 \div 50\,000$ , Фруда –  $50 \div 1800$ , Атвуда –  $0.009 \div 0.2$ , Бонда –  $1 \div 4.5$ . Такие значения отчасти соответствуют параметрам океанических течений, что позволяет предположить схожесть результатов лабораторного моделирования с натурными данными.

### Составной вихрь в чистой воде

В данной серии экспериментов радиусы контейнера  $R_0$  и диска-активатора  $R$ , также глубина исследуемого слоя жидкости  $H$  поддерживались постоянными, последовательно увеличивалась только частота вращения диска  $\Omega$ . В данном случае размеры и форма поверхностной каверны зависят от значений радиальной и тангенциальной компонент скорости жидкости у кромки диска.

Гладкий диск малого радиуса ( $\xi_0 \gg 1$ ) формирует узкую протяженную каверну в широком диапазоне значений глубины слоя жидкости и частоты вращения (рис. 3).

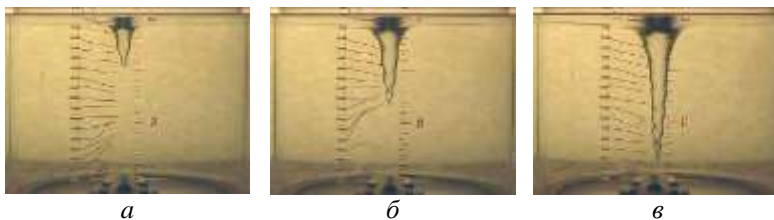


Рис. 3. Характерные формы поверхности жидкости над вращающимся диском: *a - в*) –  $\Omega = 560, 680, 870$  об/мин соответственно ( $H = 20$  см,  $R = 2,5$  см).

При малых частотах вращения узкая каверна имеет гладкую форму. Как только глубина каверны превышает характерный масштаб длины инерциальных волн, что наблюдается на средних частотах вращения диска, проявляются возмущения, обусловленные инерциальными волнами ( $\xi_H = H / R \gg 1$ ,  $\xi_0 = R_0 / R = 6$ , рис. 3, *a*). При увеличении частоты вращения диска, одновременно углубляется каверна и растет число волн на ее поверхности, хотя амплитуда их мала. Дальнейший рост частоты вращения активатора приводит к углублению каверны и проявлению на поверхности жидкости волн, амплитуда

которых нарастает вдоль поверхности каверны с увеличением глубины (рис. 3, б). Такой характер возмущений свидетельствует о неоднородности основного течения в окрестности диска. Дальнейшее увеличение частоты вращения ведет к появлению и росту амплитуды спиральных волн на поверхности каверны (рис. 3, в).

Установка на диски даже небольших прямых ребер в радиальном направлении существенно увеличивает радиальную компоненту скорости, частоту вращения жидкости в тороидальном вихре, а следовательно и глубину каверны. Типичный пример такого течения, возбуждаемого диском с тремя радиальными ребрами высотой 1 мм, приведен на рис. 4. Интенсификация тороидального компонента вихревого течения стабилизирует форму каверны, которая остается гладкой в более широком диапазоне параметров задачи (рис. 4, а).

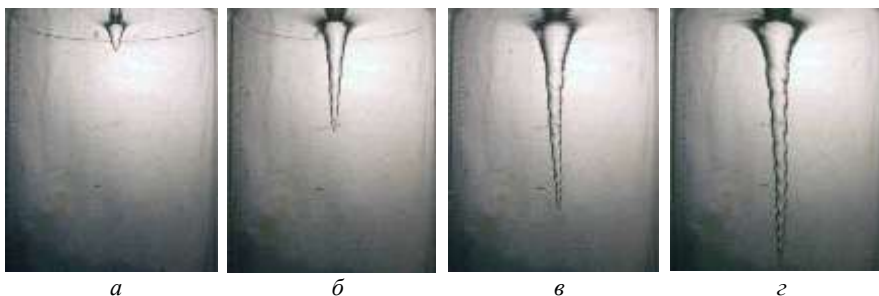


Рис. 4. Характерные формы поверхности жидкости над вращающимся ребренным диском ( $H = 40$  см,  $R = 2,5$  см, высота ребра 1 мм): а - з) –  $\Omega = 470, 1170, 1530, 1790$  об/мин.

При дальнейшем увеличении частоты вращения растет амплитуда инерциальных волн, спиральные волны проникают внутрь каверны (рис. 4, б, в). Регулярная последовательность спиральных волн на поверхности каверны наблюдается даже тогда, когда волнение поверхности жидкости, примыкающей к обечайке, становится нерегулярным (рис. 4, з).

Во всех случаях глубина каверны растет с частотой быстрее, чем для модели вихря Рэнкина с плоскими линиями тока, что отражает совместное деформирующее действие как осесимметричного цилиндрического, так и тороидального вихревого течения, обусловленного радиальным выносом жидкости с кромки диска.

#### Эволюция картины растворимой примеси в составном вихре

Практический интерес представляет изучение структурной устойчивости спиральных рукавов, в которые трансформируется компактное пятно, помещенное на поверхности составного вихря [10], которая может проверяться последовательным нанесением маркера в одну и ту же или разные области течения.

Проведенные опыты по детектированию положения окружающей центральный столб тонкой цилиндрической окрашенной области показывают, что

распространение красителя в ней происходит намного более интенсивно в вертикальном направлении, а также что ее положение более сложно для определения вследствие небольшого поперечного размера на отдельном изображении течения (рис. 5). Фоновая картина освещенности представлена на рис. 5, *а*.

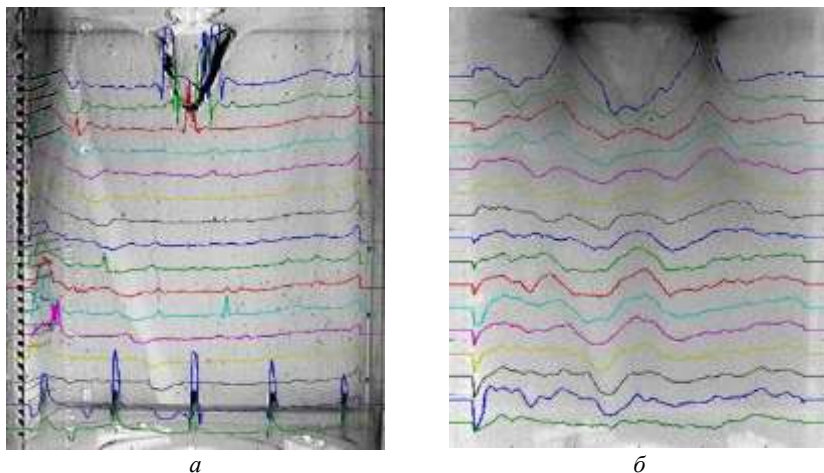


Рис. 5. Характерные изображения цилиндрической окрашенной оболочки в потоке, изменение окрашивания со временем ( $H = 40$  см,  $\Omega = 650$  об/мин,  $R = 7.5$  см): *а*) – фоновая картина освещенности  $t = 0$  с; *б*) – добавление новой порции красителя (от начала окрашивания 60 с, после добавления порции красителя – 5 с).

На рис. 5, *б* приведена картина течения, куда дополнительно была внесена порция красителя (полное время распространения красителя 60 с, время, прошедшее после добавления второй порции красителя – 5 с), на которой четко прослеживается увеличение интенсивности окрашивания центральной области потока (окрашенный столб), и слабо выделяются интенсивно окрашенные, но сравнительно тонкие прослойки, соответствующие цилиндрической оболочке диаметром около 10.8 см, окружающей центральный столб (на расстоянии около 5.4 см от оси вращения).

В различное время по данным регистрации горизонтальный размер цилиндрической оболочки колеблется от 10.4 до 10.9 см в диаметре. Поперечный размер центрального столба сохраняется таким же, как и при более низкой частоте вращения активатора, а именно 3.85 см в диаметре.

Отличие интенсивности нарастания количества витков спирали, образовавшихся из капли, внесенной на вращающуюся свободную поверхность, иллюстрирует рис. 6.

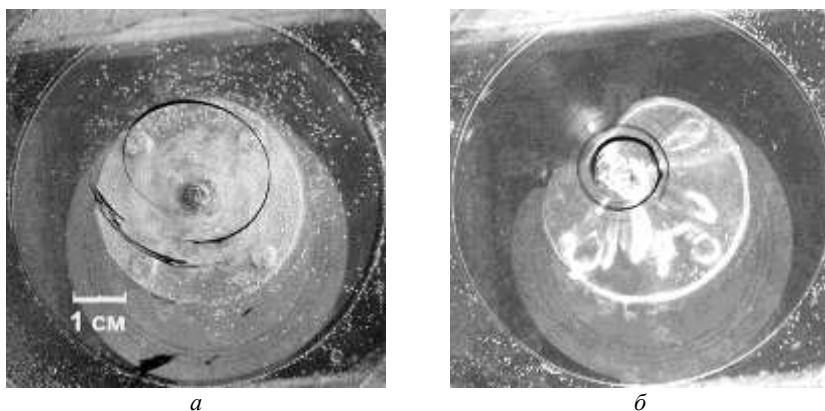


Рис. 6. Спиральные рукава на поверхности вращающейся жидкости в момент времени  $t = 3$  с на различных частотах вращения диска-активатора ( $R = 7.5$  см,  $H = 10$  см): а)  $\Omega = 100$  об/мин, б)  $\Omega = 300$  об/мин.

При меньшей частоте вращения диска-активатора (рис. 6, а) длина рукавов, вытянутых из капли красителя вдоль поверхности меньше, чем на более высокой частоте вращения активатора (рис. 6, б). В один и тот же момент угловой размер спиральной структуры для частоты  $\Omega = 100$  об/мин составляет около  $360^\circ$ , в то время как на частоте  $\Omega = 300$  об/мин за то же время спираль имеет 2.5 витка (около  $900^\circ$ ). С увеличением частоты вращения активатора также убывает эксцентриситет области, занятой спиральными рукавами.

#### **Эволюция картины нерастворимой примеси в составном вихре.**

Введение в поток несмешивающейся вязкой примеси существенно влияет на форму свободной поверхности и интенсивность движений на ней, несмотря на мизерный относительный объем самой добавки (объем жидкости превышает объем внесенной примеси  $V_k$  более чем в 200 раз). В данной серии экспериментов исследована деформация объема несмешивающейся вязкой примеси (подсолнечного масла), образующего компактную область неправильной формы на свободной поверхности рабочей жидкости. Физические параметры использованных веществ приводятся в [11]. В проведенных опытах пятно маркирующей жидкости (подкрашенное подсолнечное масло) заданного объема  $V_k$  помещалось на поверхность покоящейся воды, затем индуктор приводится во вращение с постоянной угловой скоростью. Измерения проводились после установления течения и окончания всех переходных процессов.

В толще жидкости большая часть примеси собирается в масляное тело в окрестности оси вращения. Как и в случае растворимой примеси [10], масло на поверхности жидкости формирует спиральные рукава, разделенные полосами чистой воды. Геометрические параметры структуры: размеры и форма рукавов,

положения контактных поверхностей – зависят от радиуса и угловой скорости вращения диска, глубины слоя воды  $H$  и количества примеси  $V_k$  [12].

В ходе исследования распределения несмешивающейся примеси по поверхности и в толще составного вихря были получены данные о положении примеси как в толще, так и на свободной поверхности рассматриваемого вихревого течения. Представленные на рис. 7 фотографии профиля составного вихря с добавлением нерастворимой примеси иллюстрируют изменение положений границ воздух-жидкость и масло-вода в зависимости от количества примеси на поверхности  $V_k$  и глубины слоя воды  $H$ . На изображениях, полученных в ходе экспериментов, хорошо различаются контактные поверхности вода-масло и масло-воздух.

При умеренных частотах вращения диска ( $\Omega \approx 300$  об/мин) на поверхности воды с добавлением различного количества масла образуется каверна, глубина которой  $h_f$  зависит как от объема масла, так и от глубины слоя воды  $H$ . Для таких небольших частот вращения уже существенно влияние количества примеси. При частоте вращения активатора 320 об/мин и добавлении 30 мл подкрашенного подсолнечного масла прогиб поверхности воздух-жидкость имеет наибольшее значение, периферическая часть свободной поверхности покрыта небольшими каплями масла, вытянутыми в направлении вращения поверхности жидкости (рис. 7, а). С увеличением добавленного объема масла сокращается прогиб свободной поверхности и возрастает площадь отдельных капель масла, движущихся по периферии (рис. 7, б). Дальнейшее увеличение объема масла приводит к уменьшению прогиба поверхности воздух-жидкость, помимо этого возрастает объем масла не стянутого в центральное масляное тело (рис. 7, в).

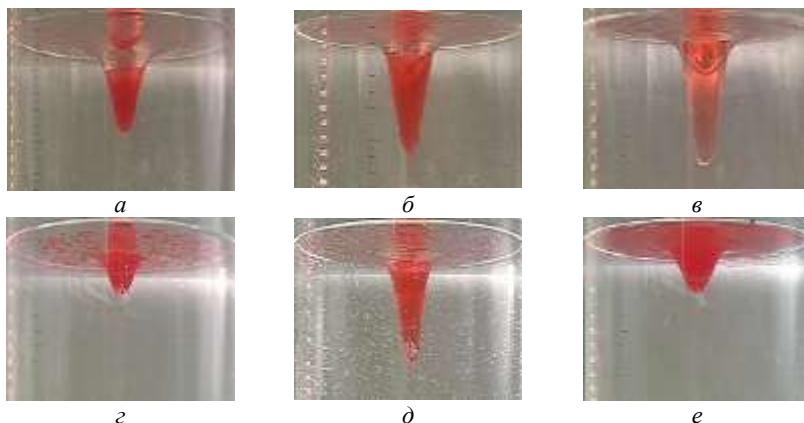


Рис. 7. Формы осевого сечения поверхности жидкости на близких частотах ( $R = 7.5$  см): а - в) –  $H = 20$  см,  $\Omega = 320, 310, 320$  об/мин,  $V_k = 30, 90, 150$  мл; г - е) –  $H = 40$  см,  $\Omega = 300, 320, 260$  об/мин,  $V_k = 30, 90, 150$  мл.

Большая глубина жидкости также существенно влияет на распределение легкой примеси в составном вихре. Небольшая порция масла (рис. 7, *з*) почти целиком собирается в окрестности оси вращения, масляное тело имеет высоту 2.3 см, а поверхность раздела воздух-жидкость остается почти плоской. Периферия поверхности занята масляными каплями. Большое количество масла  $V_k = 150$  мл создает масляное тело, по форме напоминающее шляпу, края которой образованы спиральными рукавами, вытягивающимися в направлении, противоположном вращению активатора (рис. 7, *е*). Промежуточное количество масла  $V_k = 90$  мл приводит к прогибу свободной поверхности и затягиванию масла вглубь составного вихря (рис. 7, *д*).

Форма спиральных рукавов, а также их количество и толщина изменяются в зависимости от частоты вращения активатора (рис. 8). При средних частотах вращения диска ( $\Omega = 750$  об/мин) край масляного пятна на поверхности раздела воздух-жидкость имеет нерегулярную форму. От края основного пятна отделяются широкие спиральные рукава (поперечный размер от 1.0 до 2.5 см), удлиняющиеся в направлении противоположном основному течению, и частично примыкающие обратно к центральному пятну (рис. 8, *а*). Увеличение частоты вращения активатора до 1370 об/мин ведет к уменьшению ширины масляных рукавов (поперечный размер от 0.5 до 1.5 см) и возрастанию количества витков спирали вокруг центра. От крайних точек спиральных рукавов интенсивно отделяются капли масла, различной формы (рис. 8, *б*).

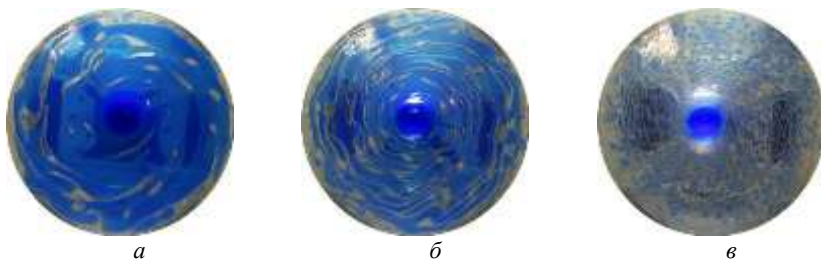


Рис. 8. Формы поверхностного пятна ( $R = 5.0$  см,  $H = 40$  см,  $V_k = 150$  мл):  
*а – в*)  $\Omega = 750, 1370, 1470$  об/мин.

Более интенсивное течение, в данном случае при частоте вращения  $\Omega = 1470$  об/мин (рис. 8, *в*), приводит к разбиению периферических частей спиральных рукавов на отдельные капли, имеющих в основном вытянутую форму, и истончению прилегающих к центральному пятну коротких спиральных рукавов. Размеры масляных капель составляют от 0.3 до 0.9 см, диаметр центрального пятна – 4.4 см. Между спиральными рукавами, отдельными каплями и центральным пятном располагаются участки чистой поверхности воды.

Основная масса экспериментов была проведена с добавлением несмешивающейся примеси на покоящуюся поверхность воды, перед началом формирования вихря. Для изучения структурной устойчивости процесса переноса нерастворимой примеси проводились дополнительные серии экспериментов с

изменением условий введения маркера в поток, а именно – маркирующая примесь аналогичного объема вводилась на поверхность установившегося вихревого течения тонкой струей. При таком способе введения примеси сохраняется общая структура распределения подкрашенного масла по поверхности воды: центральное пятно окружено вытянувшимися из него спиральными рукавами и отделившимися каплями, средний размер которых составляет 2.0 см (рис. 9, а).



Рис. 9. Формы поверхностного пiana ( $H = 40$  см,  $V_k = 30$  мл,  $\Omega = 310$  об/мин):  
а, б)  $R = 5.0$  см,  $R = 7.5$  см.

Более интенсивное течение, возникающее при увеличении размера диска-активатора, приводит к увеличению числа более мелких капель масла (средний размер 1.0 см) на периферии поверхности раздела фаз (рис. 9, б). Также наблюдается уменьшение поперечных размеров спиральных рукавов и более интенсивное затягивание легкой примеси в центральной части вихря.

С целью изучения влияния объема несмешивающейся примеси на характер переноса маркера в составном вихре проведена серия экспериментов с добавлением большого количества масла ( $V_k = 2000$  мл). В этом случае соотношение объема примеси и объема воды в цилиндрическом контейнере составляет 1/14 и в экспериментальной установке возникает система двухслойной жидкости со свободной поверхностью (рис. 10).

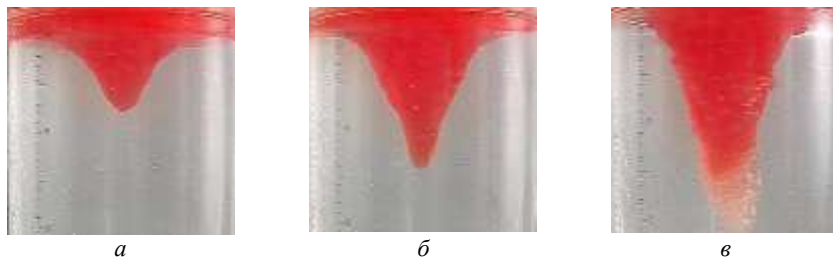


Рис. 10. Формы осевого сечения поверхностей раздела в двухслойной жидкости ( $R = 7.5$  см,  $H = 40$  см,  $V_k = 2000$  мл): а - в)  $\Omega = 320, 520, 720$  об/мин.



Аналогично случаю с небольшим количеством примеси на поверхности раздела вода-масло образуется каверна, глубина и форма которой нелинейно зависят от частоты вращения активатора.

Формы осевого сечения поверхности раздела двух несмешивающихся жидкостей в двухслойной системе в зависимости от частоты вращения активатора приведены на рис. 10.

Добавленный поперек слоя воды объем масла  $V_k = 2000$  мл формирует слой толщиной 2.8 см. При раскручивании такой двухслойной системы плоскопараллельный слой масла деформируется (рис. 10, а), в центральной части возникает утолщение, по форме напоминающее каверну в чистой жидкости ( $\Omega = 320$  об/мин). Поверхность раздела масло-вода не имеет общих точек с поверхностью раздела фаз. Поверхность раздела жидкости и воздуха остается плоской и искажается только вблизи края контейнера под действием эффектов поверхностного натяжения.

Увеличение частоты вращения активатора до 520 об/мин приводит к увеличению различия толщины слоя масла по краям контейнера и в его центре (рис. 10, б). В этом случае разность уровней поверхности раздела масло-вода составляет 14.9 см. Поверхность раздела фаз остается практически плоской, в то время как на поверхности раздела жидкостей четко прослеживаются периодические возмущения, обусловленные влиянием волн, существующих на границе раздела.

При высоких частотах вращения активатора ( $\Omega = 720$  об/мин) разность положения крайних и центральных точек поверхности раздела масло-вода увеличивается и составляет 17.3 см (рис. 10, в). Ширина каверны на половине глубины существенно увеличивается, легкая примесь стягивается к оси контейнера и на его периферии появляются участки, где контактная линия масло-вода соприкасается с воздухом. Таким образом, двухслойная система при увеличении частоты вращения диска опять становится системой типа «основная жидкость + несмешивающаяся примесь».

Сравнение форм центрального сечения масляного тела и положения поверхностей раздела жидкостей и различных фаз представлены на рис. 11.

На больших частотах вращения диска-активатора ( $\Omega = 750$  об/мин) в чистой глубокой жидкости ( $H = 40$  см,  $R = 7.5$  см) образуется каверна (символы 1, рис. 11, а), глубина которой составляет  $h_c = 11.8$  см. При добавлении 30 мл подсолнечного масла, большая часть примеси оказывается сосредоточенной внутри центральной области, ограниченной сверху поверхностью вращения глубиной  $h = 10$  см (символы 2, рис. 11, а), то есть, меньшей, чем глубина каверны в чистой жидкости, высота масляного тела составляет  $h_k = 7.8$  см (символы 3, рис. 11, а). Хотя поверхность воды покрыта пленкой масла, линия контакта масляного тела с поверхностью воды идентифицируется достаточно четко.

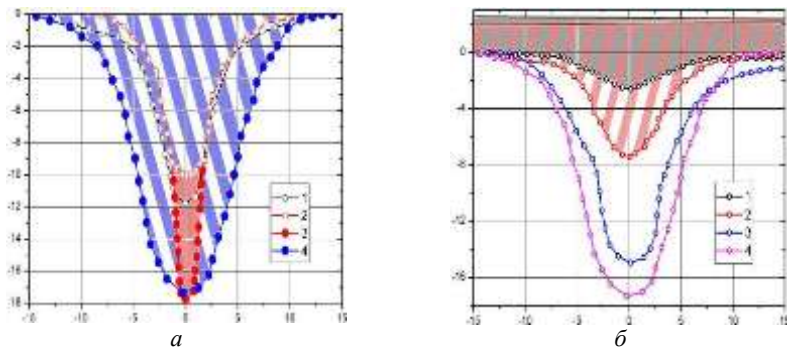


Рис. 11. Формы поверхностей раздела масло-вода и жидкость воздух в составном вихре ( $H = 40$  см,  $R = 7.5$  см): а) 1 – чистая вода  $\Omega = 750$  об/мин, 2 –  $V_k = 30$  мл – граница масляного тела  $\Omega = 770$  об/мин, 3 –  $V_k = 30$  мл – граница жидкость – воздух  $\Omega = 770$  об/мин, 4 –  $V_k = 2000$  мл – граница масляного тела  $\Omega = 720$  об/мин; б)  $V_k = 2000$  мл, 1 – 4:  $\Omega = 220, 320, 520, 720$  об/мин.

Добавление большого количества масла ( $V_k = 2000$  мл) приводит к исчезновению контактной линии масло-вода-воздух при аналогичных частотах вращения (символы 4, рис. 11, а). Высота масляного тела вращения существенно больше глубины каверны в чистой жидкости  $h_t = 17.3$  см (символы 4, рис. 11, а).

Центральные сечения поверхностной каверны в двухслойной жидкости при различных частотах вращения диска-активатора представлены на рис. 11, б. При низких и умеренных частотах вращения активатора (рис. 11, б, символы 1 и 2) система представляет собой двухслойную жидкость: верхний слой масла над слоем воды. Граница составляющих системы и контактная поверхность жидкость-воздух разделены в пространстве. На рис. 11, б толщина слоя масла обозначена серой заливкой для частоты 220 об/мин, и красной штриховкой для частоты 320 об/мин.

При увеличении частоты вращения активатора до 520 об/мин высота масляного тела увеличивается до  $h_k = 14.9$  см, формируется участок контактной линии масло-вода-воздух вблизи стенки контейнера, который изменяет свое положение с вращением системы (рис. 11, б, символы 3). Дальнейшее увеличение частоты вращения (рис. 11, б, символы 4) до 720 об/мин приводит к затягиванию масла в центральную область течения и переходу системы из состояния двухслойной жидкости к системе вода – примесь на поверхности.

### Заключение

Проведены экспериментальные исследования динамики изменчивости картины распределения примесей (растворимой – чернил и нерастворимой – подсолнечного масла) в составном вихре, образованным вращающимся диском в наполненном водой цилиндрическом контейнере.

На поверхности жидкости примеси (как растворимые красители, так и масла) образуют спиральные рукава.

Размеры и темп эволюции спиральных структур зависят от всех параметров эксперимента (радиуса и скорости вращения диска, глубины жидкости, количества примеси). В толще жидкости масло образует компактное тело, форма поверхности которого зависит от параметров течения.

Во всех проведенных экспериментах примесь не может считаться пассивной, смещения отдельных окрашенных полос, положения капель масла и ориентация спиральных рукавов не отражают картину течения в составном вихре.

Наблюдаемые картины течения устойчиво воспроизводятся в пределах точности опытов.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Гранта Президента РФ МК-4650.2011.1.

### Литература

7. Наливкин Д.В. Ураганы, бури и смерчи. Л.: Наука, 1969. 487 с.
8. [http://www.nasa.gov/multimedia/imagegallery/image\\_feature\\_735.html](http://www.nasa.gov/multimedia/imagegallery/image_feature_735.html)
9. Flor J.B, Bush, J.W.M. & M. Ungarish An experimental study on the spin up of a stratified fluid. (Publications) Geoph. Astr. Fluid Dyn. 98(4), 277-296 (2004)
10. Алексеев С.В., Куйбин П.А, Окулов В.Л., Введение в теорию концентрированных вихрей, Новосибирск: ИТФ СО РАН, 2003, 504 с.
11. Taylor G.I. Experiments with rotating fluids // Roy. Soc. Proc. A. 1921. V. 100. Pl. 2. P. 114-121.
12. Long R. R. Note on Taylor's "ink walls" in a rotating fluid // Journal of the Atmospheric Sciences. 1954. V. 11. No. 3. P. 247-249.
13. Veronis G. The analogy between rotating and stratified flows. // Ann. Rev. of Fluid Mech. 1970. V. 2. P. 37-67.
14. Бэтчелор Дж., Введение в динамику жидкости, 1973, М: Мир, 760 с.
15. Степанова Е.В., Чаплина Т.О., Чашечкин Ю.Д. Перенос масла в составном вихре // Изв. РАН: Механика жидкости и газа. № 2. 2011. С. 52-64.
16. Степанова Е.В., Чашечкин Ю.Д. Анизотропный перенос примеси в составном вихре // Доклады АН. 2008. Т.423. № 4. С. 474-478.
17. Степанова Е.В., Чаплина Т.О., Чашечкин Ю.Д. Моделирование морских разливов нефти в лабораторных условиях //Физические проблемы экологии (Экологическая физика). Сб. научн. тр. МГУ. М.: Макс Пресс. 2011. Вып. 17. с. 438-450, ISBN 978-5-317-03502-0.
18. Чаплина Т.О., Чашечкин Ю.Д., Степанова Е.В. Деформация компактного масляного пятна в каверне составного вихря // Доклады АН. 2010. Т. 432. № 2. С. 1 - 4.

## СОДРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	3
Трухин В.И.	
ГЕОФИЗИКА И ЭКОЛОГИЯ .....	4
Байдулов В.Г.	
ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ВРЕМЕННЫХ РЯДОВ В ЗАДАЧАХ ФОРМИРОВАНИЯ ТЕЧЕНИЯ НА ЦИЛИНДРЕ, ДВИЖУЩЕМСЯ В СТРАТИФИЦИРОВАННОЙ ЖИДКОСТИ .....	24
Барбанова Е.С., Самолубов Б.И.	
ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ АПВЕЛЛИНГА И ПРОМЕЖУТОЧНОЙ СТРУИ В СИСТЕМЕ ТЕЧЕНИЙ .....	47
Баркин Ю.В.	
ОБЪЯСНЕНИЕ ЭНЕРГЕТИКИ И ЦИКЛИЧНОСТИ ЭНДОГЕННОЙ АК- ТИВНОСТИ ЗЕМЛИ, ИНВЕРСИОННЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА .....	54
Белоусов А.В., Осипов А.С.	
ОТНОСИТЕЛЬНАЯ БИОЛОГИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ НИЗКО- ЭНЕРГЕТИЧНОГО РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ .....	70
Берёзкин М.Ю.	
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ И ИННОВАЦИОННЫЕ ПЕРСПЕКТИВЫ СОЛ- НЕЧНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ .....	78
Блохина Н.С., Горшкова Н.А.	
ВЛИЯНИЕ ВЕТРА НА РАЗВИТИЕ ТЕЧЕНИЙ В ВОДОЕМЕ В ПЕРИОД ФОРМИРОВАНИЯ ВЕСЕННГО ТЕРМОБАРА .....	87
Бортникова Г.И.	
ГЕОМЕТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ГРАВИТАЦИОННОГО ПОЛЯ ЗЕМЛИ В ПРИЛИВНОЙ ДИНАМИКЕ МОРЯ И ЭКСПРЕССИИ ГЕНОВ .....	96
Букатов А.Е., Букатов Анд.А.	
НАРАСТАНИЕ И ТАЯНИЕ ЛЬДА В УСЛОВИЯХ АЗОВСКОГО МОРЯ .....	108
Букатов А.Е., Павленко Е.А.	
ВЕРТИКАЛЬНОЙ УСТОЙЧИВОСТИ ВОД АЗОВСКОГО МОРЯ.....	121
Воронина Е.В.	
ВАРИАЦИИ СЕЙСМОТЕКТОНИЧЕСКИХ НАПРЯЖЕНИЙ В ОБЛАСТИ ПОДГОТОВКИ СИЛЬНОГО ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ .....	133
Гаврилов А.А.	
ВОЗМУЩЕНИЕ ЗОНАЛЬНОЙ ЦИРКУЛЯЦИИ В ТРОПСФЕРЕ И НИЖ- НЕЙ СТРАТОСФЕРЕ АТМОСФЕРНЫМИ ЛУННЫМИ .....	142
Гордиенко В.А. , Показеев К.В., Старкова М.В.	
ПРЕОДОЛЕНИЕ ГЛОБАЛЬНОГО ЭКОЛОГИЧЕСКОГО КРИЗИСА И ВОЗМОЖНОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ МИРОВОЗЗРЕНИЯ НОВОГО ТИПА	153
Гусев В.А.	
ЛОКАЛИЗАЦИЯ ПОВЕРХНОСТНОЙ ВОЛНЫ НА ГРАНИЦЕ РАЗДЕЛА УПРУГОГО ПОЛУПРОСТРАНСТВА И ЖИДКОГО СЛОЯ ПРИ НАЛИЧИИ ТЕЧЕНИЯ .....	172

Доленко Т.А., Буриков С.А., Доленко С.А., Персианцев И.Г., Сабиров А.Р., Фадеев В.В.	
ДИСТАНЦИОННОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ И СОЛЕННОСТИ МОРСКОЙ ВОДЫ МЕТОДАМИ ЛАЗЕРНОЙ СПЕКТРОСКОПИИ .....	181
Есюкова Е.Е., Чубаренко И.П., Гурова Е.С., Степанова Н.Б.	
ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЕ ВЫХОЛАЖИВАНИЕ НАД ПРИБРЕЖНЫМИ ПОДВОДНЫМИ СКЛОНАМИ ЮГО-ВОСТОЧНОЙ БАЛТИКИ В ОСЕННИЙ ПЕРИОД ПО ДАННЫМ СПЕКТРОРАДИОМЕТРОВ MODIS .....	190
Жуков А.Н., Лебедев Н.Е., Сизов А.А.	
ВНУТРИГОДОВЫЕ И МЕЖГОДОВЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ УРОВНЯ АРАВИЙСКОГО МОРЯ .....	200
Запевалов А.С., Пустовойтенко В.В., Показеев К.В.	
О ПАРАМЕТРИЗАЦИИ ШИРИНЫ УГЛОВОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЭНЕРГИИ МОРСКИХ ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОЛН .....	210
Иванова И.Н., Самолюбов Б.И., Будников А.А., Барбанова Е.С., Барбанов Н.Ф., Жаворонков А.В., Шлычков Д.С.	
ВЛИЯНИЕ АПВЕЛЛИНГА НА РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ СОСТАВА ВОДЫ В ВОЛХОВСКОЙ ГУБЕ .....	218
Игнатъев С.Г., Киселева С.В.	
АНАЛИЗ СОВРЕМЕННЫХ МЕТОДОВ ОЦЕНКИ ВЕТРО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ РЕСУРСОВ .....	225
Килесо А.В., Кашенко Н.М., Гриценко В.А.	
ПРОСТАЯ МОДЕЛЬ ВЗВЕШИВАНИЯ И ПЕРЕНОСА ОСАДОЧНОГО МАТЕРИАЛА .....	241
Кистович А.В.	
КОГЕРЕНТНЫЕ КОНВЕКТИВНЫЕ СТРУКТУРЫ .....	248
Кистович А.В.	
ИЗЛУЧЕНИЕ ВНУТРЕННИХ ВОЛН В СРЕДЕ С ПЕРЕМЕННОЙ ЧАСТОТНОЙ ПЛАВУЧЕСТИ .....	255
Коваленко Л.А., Кондратьева О.Е., Скибенко В.В.	
АНАЛИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ В ПРАКТИЧЕСКИХ РАБОТАХ ПО ЭКОЛОГИИ И ОХРАНЕ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ ДЛЯ СТУДЕНТОВ ТЕХНИЧЕСКОГО ВУЗА .....	267
Кузнецов В.В.	
СПЕКТРАЛЬНЫЕ СВОЙСТВА СТОХАСТИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ ОСЦИЛЛЯТОРА .....	274
Кузнецов В.В., Кузнецова Ю.В.	
ИНТЕНСИВНОСТИ РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ .....	286
Кукушкин А.С.	
МНОГОЛЕТНИЕ СЕЗОННЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ ПРОЗРАЧНОСТИ ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОД В ЧЕРНОМ МОРЕ ЗА ПЕРИОД 1923 – 2000 гг. ....	297
Масленникова А.Д., Сергеева И.А., Петрова Г.П.	
ТОКСИЧЕСКОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ ИОНОВ СВИНЦА НА МОЛЕКУЛЫ БЕЛКА КОЛЛАГЕНА В ВОДНЫХ РАСТВОРАХ .....	307
Матасова О.Е., Скибенко В.В.	
ЭКОЛОГИЧЕСКОЕ НОРМИРОВАНИЕ ДЛЯ ЛАНДШАФТНОЙ ЭКОСИСТЕМЫ .....	312

Мошенцева А.В., Носов М.А. ГОРИЗОНТАЛЬНЫЕ ДВИЖЕНИЯ ВОДНОГО СЛОЯ, СОПРОВОЖДАЮЩИЕ ГЕНЕРАЦИЮ ЦУНАМИ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЕМ .....	324
Назарова Л.Е., Каменская Е.А. ВЛИЯНИЕ ИЗМЕНЧИВОСТИ ОСНОВНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК КЛИМАТА НА СТОК С ВОДОСБОРА РЕКИ КЕМЬ (РЕСП. КАРЕЛИЯ) .....	332
Нефедова Л.В. ПРОГРАММЫ ПОДДЕРЖКИ МЕЖДУНАРОДНЫМИ ЭКОЛОГИЧЕСКИМИ ОРГАНИЗАЦИЯМИ ОСВОЕНИЯ ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ В РАЗВИВАЮЩИХСЯ СТРАНАХ .....	340
Нечаев А.М. О МЕХАНИЗМЕ ИЗВЕРЖЕНИЯ ВУЛКАНА .....	351
Нурисламова Г.Н., Большакова А.В., Носов М.А. ПАРАМЕТРЫ ОСТАТОЧНЫХ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ В ОЧАГЕ ЦУНАМИ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ МОМЕНТ-МАГНИТУДЫ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ .....	368
Петрунин Г.И., Попов В.Г. МОДЕЛЬ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕПЛОВЫХ СВОЙСТВ В ОКЕАНИЧЕСКОЙ ЛИТОСФЕРЕ, СОДЕРЖАЩЕЙ СЛОЙ СЕРПЕНТИНИЗИРОВАННЫХ УЛЬТРАБАЗИТОВ .....	375
Плаксина Ю.Ю., Уваров А.В. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПОЛЕЙ ВБЛИЗИ ПОВЕРХНОСТИ РАЗДЕЛА ВОДА-ВОЗДУХ: ТЕНЕВОЙ ФОНОВЫЙ МЕТОД И ТЕРМОГРАФИЯ .....	380
Погарский Ф.А., Полников В.Г. ИЗМЕНЧИВОСТЬ ВЕТРА И ВОЛНЕНИЯ ПО ДАННЫМ БУЙКОВЫХ ИЗМЕРЕНИЙ И ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ В ИНДИЙСКОМ ОКЕАНЕ .....	390
Потапов А.А. ПОВЫШЕНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАЗРЕШЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ВАРИАЦИЙ РАДИАЦИОННОГО ФОНА ЗА СЧЕТ ПРИМЕНЕНИЯ ГИС ТЕХНОЛОГИЙ .....	402
Рождественский А.Е. КПД РЕАЛЬНОЙ ПРИРОДНОЙ ТЕПЛОВОЙ МАШИНЫ В АТМОСФЕРЕ И ОКЕАНЕ .....	412
Саввин В.Л., Пирогов Ю.А., Казарян Г.М., Михеев Д.А. ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ НАЗЕМНОЙ МИКРОВОЛНОВОЙ ЛИНИИ ПЕРЕДАЧИ ЭНЕРГИИ .....	419
Самолубов Б.И., Шлычков Д.С. РОЛЬ ВОЛНОВЫХ ПОТОКОВ В СИСТЕМЕ СТРАТИФИЦИРОВАННЫХ ТЕЧЕНИЙ .....	425
Самолубов Б.И., Перескок Н.А. РАЗВИТИЕ ОБЛАКОВ МУТНОСТИ В СИСТЕМАХ ТЕЧЕНИЙ .....	435
Самсонова В.В., Карпенко О.И., Копчик С.В., Перов Н.С., Родионова В.В., Бенедиктова А.И. ИССЛЕДОВАНИЕ МАГНИТНЫХ СВОЙСТВ ПОЧВ В ЗОНЕ ВЛИЯНИЯ КОМБИНАТА «СЕВЕРОНИКЕЛЬ» .....	442

---

Синюгин О.А. ПАРАМЕТРЫ ИННОВАЦИОННОГО ПРОЦЕССА В ВОЗОБНОВЛЯЕМОЙ ЭНЕРГЕТИКЕ .....	447
Соловьев А.А., Чекарев К.В. ЭКРАНИРУЮЩИЙ ЭФФЕКТ КОНДЕНСАЦИИ .....	451
Соловьев Д.А., Александрова М.П. ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ПРИПОВЕРХНОСТНОЙ КОНДЕНСАЦИИ В АТЛАНТИЧЕСКОМ ОКЕАНЕ .....	459
Соловьев Д.А., Нигматулин Р.И. ВОДНЫЕ РЕСУРСЫ ДЛЯ ЦЕЛЕЙ ЭНЕРГЕТИКИ: ЭФФЕКТИВНОСТЬ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ .....	467
Соломонов С.В., Кропоткина Е.П., Розанов С.Б., Игнатьев А.Н., Лукин А.Н. МОНИТОРИНГ ВЕРТИКАЛЬНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ОЗОНА НА МИЛЛИМЕТРОВЫХ ВОЛНАХ НАД МОСКВОЙ ПРИ ВОЗМУЩЕНИЯХ ОЗОНОСФЕРЫ в 2010 и 2011 гг. ....	472
Степанова Е.В., Аниконов М.И. АВТОМАТИЗАЦИЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ОКРАШЕННЫХ ОБЛАСТЕЙ В СОСТАВНОМ ВИХРЕ .....	485
Тебуев В.В. ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ВАКУУМНЫХ ФОТОЭЛЕМЕНТОВ В СОЛНЕЧНОЙ ЭНЕРГЕТИКЕ .....	493
Терентьев Е.Н., Терентьев Н.Е. СБОРКА И ПРЕПАРИРОВАНИЕ ПРИБОРОВ .....	498
Чашечкин Ю.Д., Чаплина Т.О., Левицкий В.В., Бардаков Р.Н. ЛАБОРАТОРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КЛЮЧЕВЫХ ПРОЦЕССОВ В ГИДРОСФЕРЕ И АТМОСФЕРЕ С УЧЕТОМ ЭФФЕКТОВ СТРАТИФИКАЦИИ И ВРАЩЕНИЯ НА СТЕНДАХ УСУ «ГФК ИПМех РАН» .....	511
Чашечкин Ю.Д., Степанова Е.В., Чаплина Т.О., Беседина А.В. ЭВОЛЮЦИЯ КАРТИНЫ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПРИМЕСЕЙ В ВИХРЕВЫХ ТЕЧЕНИЯХ .....	528

*Авторский указатель*

Александрова М.П.	459	Матасова О.Е.	312
Аниконов М.И.	485	Михеев Д.А.	419
Байдудлов В.Г.	24	Мошенцева А.В.	324
Барбанов Н.Ф.	218	Назарова Л.Е.	332
Барбанова Е.С.	47, 218	Нефедова Л.В.	340
Бардаков Р.Н.	528	Нечаев А.М.	351
Баркин Ю.В.	54	Нигматуллин Рс.И.	467
Белоусов А.В.	70	Носов М.А.	324, 368
Бенедиктова А.И.	442	Нурисламова Г.Н.	368
Берёзкин М.Ю.	78	Осипов А.С.	70
Беседина А.В.	528	Павленко Е.А.	121
Блохина Н.С.	87	Перескок Н.А.	435
Большакова А.В.	368	Перов Н.С.	307
Бортникова Г.	96	Персианцев И.Г.	181
Будников А.А.	218	Петрова Г.П.	307
Букатов А.Е.	108, 121	Петрунин Г.И.	375
Букатов А.А.	108	Пирогов Ю.А.	419
Буриков С.А.	181	Плакшина Ю.Ю.	380
Воронина Е.В.	133	Погарский Ф.А.	390
Гаврилов А.А.	142	Показеев К.В.	153, 210
Гордиенко В.А.	153	Полников В.Г.	390
Горшкова Н.А.	87	Попов В.Г.	375
Гриценко В.А.	241	Потапов А.А.	402
Гурова Е.С.	190	Пустовойтенко В.В.	210
Гусев В.А.	172	Родионова В.В.	442
Доленко С.А.	181	Рождественский А.Е.	412
Доленко Т.А.	181	Розанов С.Б.	472
Есюкова Е.Е.	190	Сабиров А.Р.	181
Жаворонков А.В.	218	Саввин В.Л.	419
Жуков А.Н.	200	Самолюбов Б.И.	47, 218, 425, 435
Запелалов А.С.	210	Самсонова В.В.	442
Иванова И.Н.	218	Сергеева И.А.	307
Игнатъев А.Н.	472	Сизов А.А.	200
Игнатъев С.Г.	225	Синюгина О.А.	447
Казарян Г.М.	419	Скибенко В.В.	267, 312
Каменская Е.А.	332	Соловьев А.А.	451
Карпенко О.И.	442	Соловьев Д.А.	459, 467
Кашенко Н.М.	241	Старкова М.В.	153
Килесо А.В.	241	Соломонов С.В.	472
Киселева С.В.	225	Степанова Е.В.	485, 511, 528
Кистович А.В.	248, 255	Степанова Н.Б.	190
Коваленко Л.А.	267	Тебуев В.В.	493
Кондратьева О.Е.	267	Терентьев Е.Н.	498
Копчик С.В.	442	Терентьев Н.Е.	498
Кропоткина Е.П.	472	Трухин В.И.	4
Кузнецов В.В.	274, 286	Уваров А.В.	380
Кузнецова Ю.В.	286	Фадеев В.В.	181
Кукушкин А.С.	297	Чаплина Т.О.	511, 528
Лебедев Н.Е.	200	Чашечкин Ю.Д.	511, 528
Левичкий В.В.	528	Чекарев К.В.	451
Лукин А.Н.	472	Чубаренко И.П.	190
Масленникова А.Д.	307	Шлычков Д.С.	218, 425



*Научное издание*

ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ ЭКОЛОГИИ  
(ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ ФИЗИКА)

№ 19

Сборник научных трудов

Под ред. В.И. Трухина, Ю.А. Пирогова, К.В. Показеева

Научные труды публикуются в виде, представленном авторами  
Названия организаций приведены в авторской форме

Физический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова  
119899, Москва, Ленинские горы, МГУ имени М.В. Ломоносова

Корректоры: Савина Е.К., Чаплина Т.О., Степанова Е.В.  
Макет: Берёзкин М.Ю.

Напечатано с готового оригинал-макета