

Московский государственный университет  
им. М.В. Ломоносова

---

Физический факультет

**ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ  
ЭКОЛОГИИ  
(ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ ФИЗИКА)**

**№ 13**

Москва  
2005

---

## Физические проблемы экологии N 13

### Физические проблемы экологии (экологическая физика). № 13

Под ред. В.И. Трухина, Ю.А. Пирогова, К.В. Показеева. М.: Физический факультет МГУ, 2005.— Стр. 200

Сборник научных трудов четвертой Всероссийской конференции «Физические проблемы экологии (экологическая физика)».

В докладах конференции изложены последние результаты исследований в области физических проблем экологии, дано описание новых методов мониторинга природных сред, изложены новые подходы к динамике окружающей среды.

Для специалистов, работающих в области физических проблем экологии, студентов и аспирантов, изучающих экологическую физику.

© Авторы, 2005

© Физический факультет МГУ им.  
Ломоносова, 2005

## РЕШЕНИЕ ТРЕТЬЕЙ ВСЕРОССИЙСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ «ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ ЭКОЛОГИИ ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ ФИЗИКА»

22–23 июня 2004 г. на физическом факультете МГУ прошла Четвертая Всероссийская конференция “Физические проблемы экологии (Экологическая физика)”. Конференция была организована физическим факультетом МГУ, Институтом проблем механики РАН, при поддержке РФФИ, ФЦП «Интеграция».

Конференция посвящается 250-летию МГУ и проведена во исполнение решения третьей Всероссийской конференции “Физические проблемы экологии (Экологическая физика)”.

Конференция вызвала большой интерес среди ученых-физиков: на приглашение откликнулись сотрудники десятков НИИ РАН, около 50 вузов, другие организации. В работе конференции активное участие приняли сотрудники нескольких факультетов МГУ: географического, биологического, геологического, ВМК, механики и другие. Это подчеркивает междисциплинарный характер конференции.

Хотя конференция носит статус Всероссийской, по сути, она была Всесоюзной, так как в ее работе приняли участие научные работники и преподаватели из ряда стран СНГ, зарубежные гости.

Работа нынешней конференции будет проходить на Пленарном заседании (7 докладов) и в 7 секциях:

Секция 1. Экология околоземного космического пространства и атмосферы

Секция 2. Физические проблемы экологии гидросферы

Секция 3. Экологические проблемы физики Земли

Секция 4. Биофизическая экология

Секция 5. Физические методы мониторинга природных сред

Секция 6. Прикладные аспекты экологической физики

Секция 7. Вопросы экологического образования.

Было представлено всего 262 доклада.

К началу конференции физический факультет издал труды предшествующей конференции (“Физические проблемы экологии (Экологическая физика)” том № 6-11).

Таким образом, с начала первой конференции издано уже 12 томов. Создана серия (“Физические проблемы экологии (Экологическая физика)”. К сожалению, тираж издания мал.

Осуществлено второе издание учебного пособия «Введение в экологическую геофизику» (авторы В.И. Трухин, К.В. Показеев, В.Е. Куницын, А.А. Шрейдер).

Продолжено совершенствование геофизического полигона «Волго-Верховье», созданного совместно с МГУ им. М.В. Ломоносова и ТверГУ.

Практически все решения предшествующей конференции выполнены.

Участники конференции отмечают актуальность и своевременность проведения широкого научного обсуждения проблем экологической физики. Анализ материалов конференции показывает, что в сфере экологических проблем существует

обширная область, в решении задач которой физики должны принимать активное участие.

В докладах конференции изложены последние результаты исследований в области физических проблем экологии, дано описание новых методов мониторинга природных сред, изложен новый подход к динамике окружающей среды, позволяющий надежно предсказывать эволюцию природных систем.

Успешной работе конференции способствовала большая предварительная работа Программного комитета, сотрудников лаборатории экологических проблем геофизики, помощь администрации, инженерно-технических и учебных служб физического факультета, четкая работа Рабочей группы.

Конференция постановила:

продолжить регулярное проведение конференций по физическим проблемам экологии,

всемерно способствовать расширению экологической компоненты образования при подготовке студентов, в частности студентов-физиков,

просить физический факультет МГУ продолжить разработку программы по экологическому обучению студентов физических специальностей,

просить физический факультет МГУ выступить с инициативой проведения следующей конференции по экологической физике в 2006г.,

просить физический факультет МГУ организовать издание избранных трудов конференции,

просить администрацию факультета выступить с инициативой об организации журнала “Физические проблемы экологии (Экологическая физика)”,

просить Министерство образования и науки РФ о выделении средств на развитие геофизического полигона «Волго-Верховье» для использования его как объекта коллективного пользования,

организовать общефакультетский экологический семинар,

Сопредседатель Программного Комитета конференции  
ректор МГУ, академик  
*В.А. Садовничий*

Сопредседатель Программного комитета конференции  
декан физического факультета, профессор  
*В.И. Трухин*

Ученый секретарь Программного комитета конференции, профессор  
*К.В. Показеев*

## СЕКЦИЯ 1

ЭКОЛОГИЯ ОКОЛОЗЕМНОГО КОСМИЧЕСКОГО  
ПРОСТРАНСТВА И АТМОСФЕРЫ

## СВЯЗЬ КОЛЕБАНИЙ ОЗОНОВОГО СЛОЯ ЗЕМЛИ

## С ИЗМЕНЧИВОСТЬЮ МИРОВОГО ОКЕАНА

Борисов Ю.А., Гальченко А.А., Галкина И.Л.,

Перов С.П., Показеев К.В.

*Московский государственный университет им. М.В.Ломоносова*

**ВВЕДЕНИЕ**

В 1996 году Геофизическим отделением физического факультета МГУ им. М.В.Ломоносова была организована и проведена конференция «Взаимодействие в системе литосфера-гидросфера-атмосфера», цель которой состояла в том, чтобы сконцентрировать внимание исследователей на назревшей необходимости рассмотрения оболочек Земли (сфер) как единой системы с акцентом на процессы контактных зон или поверхностей раздела. За прошедшие годы не достигнуто существенного продвижения в этом направлении, несмотря на появление ряда заслуживающих внимание работ, например [8].

В общей проблеме изучения взаимодействия геосфер и воздействия на них внешних факторов важно найти наиболее чувствительные связи и индикаторы таких связей. В этом смысле уникальными особенностями обладает озон земной атмосферы. Консервативность озона в тропосфере и нижней стратосфере, т.е. его большое время жизни в этих слоях по сравнению с временем синоптических процессов делает его естественным трассером широкого спектра атмосферных движений. В верхней части озоносферы (средняя и верхняя стратосфера и вся мезосфера) время жизни озона исчисляется минутами и часами, и здесь он находится в фотохимическом равновесии с радиационным полем Солнца и Земли, что также позволяет исследовать динамические процессы. Например, при распространении, отражении и взаимодействии внутренних атмосферных гравитационных волн, поскольку эти движения влияют на перераспределение озонактивных малых газо-

вых составляющих (МГС) – окислов азота, водорода, галогенов, по-разному реагирующих с озоном. В данной работе это демонстрируется на примере анализа фазы развития мощного явления Эль-Ниньо в августе 1997 года, когда в фотохимическом слое произошло перемешивание всех МГС, что привело к абсолютно аномальной ситуации - практически полному отсутствию антикорреляции озона и температуры в глобальной озоносфере (30-50 км) (рис. 1).

В работе исследуются колебательные процессы в озоносфере и возникающие при этом квазистационарные структуры (рис.2) и их возможная связь с когерентными структурами в океане. Заметим, что термин «когерентные структуры» применяется для обозначения спонтанно возникающих устойчивых образований, сохраняющих некоторые закономерные свойства на фоне хаотических флуктуаций. Появление когерентных структур типа стоячих волн хорошо идентифицируется при анализе полей общего содержания озона (ОСО) по данным спутниковых наблюдений, а также при анализе данных, полученных при уникальных орбитальных наблюдениях с помощью аппаратуры CRISTA в ноябре 1994 и августе 1997 годов [2, 3-5].

В работе сопоставлены пространственно-временные структуры в полях температуры и уровня поверхности океана со структурами в полях ОСО и характеристиками озоносферы на различных высотных уровнях. При этом были использованы данные спутников ASTRO-SPAS-CRISTA-1, -2), Earth Probe (TOMS), TOPEX/POSEYDON, Jasson (Altimeters). Наибольший интерес для поставленной задачи представляет 1997 год, период формирования и развития явления Эль-Ниньо, самого мощного природного явления такого типа в XX веке, повлиявшего на динамику всей озоносферы.

## **ТРЕНДЫ И КОЛЕБАНИЯ ОЗОНОВОГО СЛОЯ**

Данные наблюдений многочисленных (более 100) наземных станций и озонометрических орбитальных приборов (TOMS, SAGE, BUVS, TOVS), ведущих наблюдения за динамикой озоносферы, общим содержанием озона - ОСО, его вертикальным распределением и приземной концентрацией озона регулярно публикуются и обсуждаются научной общественностью и позволяют делать определенные выводы об эволюции озонового слоя за последние 30-40 лет. Первые регулярные наблюдения ОСО на нескольких станциях начались по инициативе английского геофизика Добсона еще в конце 20-х годов прошлого века, однако достаточно массовый уровень они приобрели после начала Международного геофизического года в 1957 году. Генерация озона происходит в основном там, где существует избыток ультрафиолетового излучения - в тропической стратосфере на высотах 30-40 км, где озон образуется при фотолизе молекулы кислорода. Разрушается же озон при фотолизе его молекулы солнечным светом с длиной волны менее 1 мкм и в каталитических циклах (цепных реакциях) с участием гидроксила, окислов азота, хлора, брома и ряда других соединений. Из тропической стратосферы озон разносится воздушными течениями в средние и полярные широты. Таким образом, строение и динамика озонового слоя определяются фотохимией и динамикой атмосферы. Расчеты и наблюдения свидетельствуют: в последние 20-25 лет за счет естественных и антропогенных факторов характеристики динамики атмосферы, ее циркуляция и химический состав газов-катализаторов, определяющих фотохимический сток озона, изменяются. При этом определяющим фактором,

по-видимому, является глобальный процесс изменения циркуляции в атмосфере [6,7], а частое появление отрицательных аномалий озона в средних широтах (т.н. «мини-дыр») можно объяснить вторжениями воздуха нижней тропической стратосферы, обедненной озоном, в стратосферу умеренных, а иногда и полярных широт [1, 3, 4].

В пользу точки зрения, в соответствии с которой наблюдаемые изменения озонового слоя являются последствиями атмосферно-динамических процессов, в частности, глобального изменения циркуляции, свидетельствуют следующие факты:

- наблюдаемые изменения озонового слоя хорошо согласуются с изменениями метеорологических параметров климатообразующих центров действия атмосферы (Азорский, Сибирский антициклоны и др.);

- озоновые аномалии, возникающие в Северном полушарии, отличаются существенной незональностью, что представляется необъяснимым, если исходить из предположения о глобальном истощении озоновой продуктивности фотохимически активного слоя;

- при аномально низких содержаниях общего содержания озона на всех станциях Северного полушария основной дефицит парциального давления озона наблюдается в области ниже озонового максимума, что находится в полном соответствии с атмосферно-динамическим механизмом, описанным ранее.

Этот же механизм подтверждается и тем фактом, что высота озонового максимума на всех станциях Северного полушария имеет значимый положительный тренд.

В [11] методами вейвлет-анализа были проанализированы ряды ОСО по данным TOMS с 1978 по 2000 год, зонально усредненные с шагом 10 градусов по широте и 1 месяц по времени. Целью анализа являлось уточнение природы медленных изменений (трендов), наблюдаемых в рядах общего содержания озона и установление взаимосвязей между этими изменениями в различных широтных зонах. Кроме того был проведен анализ статистической значимости различного вида трендов, что также важно для проблемы климата. Полученные вейвлет-образы зональных рядов и остатки разложения прежде всего были исследованы на наличие линейных и параболических трендов. Оказалось, что остатки разложения статистически значимых трендов не имеют, что еще раз подтвердило эффективность использования версии вейвлет-анализа с точки зрения улучшения соотношения сигнал/шум в рядах данных наблюдений. Применительно к вейвлет-образам параболические тренды оказались значимыми на 95% уровне для всех широтных, а линейные - для всех кроме двух, прилегающих к экватору. Временной ход этого минимума от экваториальной зоны к полюсам заставляет предположить, что возможный источник таких долговременных изменений озонового слоя планеты расположен в приэкваториальной зоне и может быть связан с долговременным изменением циркуляционных (в т.ч. и волновых) характеристик тропической атмосферы [3], зависящих от параметров экваториальных и тропических вод океана. На базе вейвлетной модели, учитывающей незональные особенности, по тем же самым данным TOMS Г.М.Крученицким созданы два компьютер-ных анимационных фильма, визуализирующих эволюцию озонового слоя, в которых пока-зана главная роль глобальных климатических событий (Эль-Ниньо, Ла-Ниньо, извержения вулканов) в возникновении, развитии и исчезновении озоновых аномалий с вре-

менным масштабом несколько месяцев - год в различных районах Земли. Их можно рассматривать как возникающие и исчезающие стоячие волны, причем хорошо видно разделение озоно-сферы на тропическую и внетропические части. В тропической части хорошо заметна структурирования, часто охватывающая все долготы, с несколькими типами положительных и отрицательных вытянутых вдоль экватора вейвлетов: +/-, -/+, +/-/+, -/+/-, + и -. При этом отрицательные аномалии более интенсивны, особенно после извержения вулканов (Эль-Чичон, 1982 и Пинатубо, 1991) и событий Эль-Ниньо (1983, 1987), Ла-Ниньо (1988) и наблюдаются в основном над Тихим океаном. Сильные положительные вейвлеты наблюдались только в периоды 1978-1982 гг. и 1988-93 гг., т.е. в максимумы 21-го и 22-го 11-ти летних солнечных циклов и тоже в основном над Тихим океаном. Отметим, что для периода минимума активности Солнца 1984-1987 гг. характерна в целом более спокойная обстановка со слабыми аномалиями обоих знаков, с преобладанием отрицательных. Во внетропических широтах наибольшие амплитуды аномалий характерны для зимнего и начала весеннего сезонов [3].

Таким образом можно утверждать, что физическими причинами эволюции озонового слоя Земли как части открытой системы, какой является атмосфера, являются глобальные изменения, происходящие в океане, во всех геосферах планеты, а также при воздействии внешних факторов. Последние, хотя и могут быть слабыми с энергетической точки зрения (например, космические лучи), однако могут приводить к реализации усилительных механизмов с большим энерговыделением. Одним из основных факторов, воздействующих на атмосферную динамику и эволюцию озонового слоя, можно считать глобальное потепление и связанное с ним изменение атмосферной циркуляции. Важную роль играет изменение океанической циркуляции. Все эти и другие факторы интерактивного и в общем случае нелинейного взаимодействия приводят к трансформации спектра колебаний атмосферы и в том числе озонового слоя. Прогнозирование такой сложной системы представляет в настоящее время неразрешимую задачу и поэтому необходимо искать новые подходы к анализу таких сложных систем, какой является наша Земля. Самым убедительным свидетельством о крайне ограниченной возможности современного модельного физико-математического (иногда его называют гидродинамическим, поскольку оно основано на классических уравнениях гидродинамики с применением различных версий теории турбулентности) прогнозирования может служить существенное расхождение между реальным и модельным состоянием атмосферы при численном эксперименте «из прошлого в настоящее», причем не только для климата тропосферы, но и для такой сравнительно простой среды как мезосфера и мезопауза, где за последние десятилетия зарегистрирован темп охлаждения воздуха около 1 градуса в год (!) [12].

Причиной отклонения прогноза от реальной динамики атмосферы и гидросферы является недостаточная изученность взаимосвязанных физико-химических процессов и неполнота учета в моделях “малых параметров”, обусловленных вращением Земли, стратификацией и диссипацией. Анализ натуральных наблюдений, лабораторных моделей стратифицированных течений и уравнений движения свидетельствует, что в течениях жидкости существуют крупномасштабные и тонкоструктурные сингулярные элементы. В общем случае динамика гидродинамических систем определяется как внешними факторами - астрономическими, атмо-



сферными, геосферными, так нелинейным взаимодействием всех структурных элементов течений, как регулярных – волновых, так и сингулярных – пограничных слоев. В силу больших значений завихренности, взаимодействующие пограничные слои (тонкоструктурные сингулярные элементы, являются эффективными генераторами вихревых движений [9].

Возможно, что изменения глобальной циркуляции атмосферы и океана и связанная с ними эволюция озонового слоя будут продолжаться и в XXI столетии (весь вопрос – в каком направлении!). Выше было показано, что временной ход минимума параболических трендов ОСО происходит от экваториальной зоны к полюсам. Это можно считать подтверждением ключевой роли энергонасыщенной тропической атмосферы в глобальных изменениях циркуляции.

## РОЛЬ МИРОВОГО ОКЕАНА

Пока еще плохо изученная изменчивость процессов в Мировом океане априори играет одну из основных ролей в климатической системе (в т.ч. озоносфере). Основное тепло океанской воды сосредоточено в экваториальной части между 15 градусами широты в обоих полушариях, где хорошо развит термоклин - слой воды с вертикальным градиентом температуры большим, чем в выше- и нижележащих слоях. Существование любого термоклина определяется притоком или отдачей тепла на поверхности вместе с процессами перемешивания, другими словами на него влияют метеорологические и геофизические процессы в атмосфере, гидросфере и твердой Земле. Термоклин подвержен суточным, сезонным и более долговременным вариациям. В последние десятилетия разработаны различные модели термохалинной циркуляции, в которых учитывается связь между циркуляцией и термоклинном. Важный результат моделирования Гольфстрима был представлен акад. А.С.Саркисяном на Кибелевских чтениях в октябре 2004 г.: совпадение численных экспериментов с наблюдениями возникает скачком при уменьшении шага пространственной сетки менее 100 км - весьма интересный факт и для моделирования атмосферных процессов. Ведь для корректного учета потоков тепла, импульса и примесей необходимо учитывать весь спектр пространственно-временных колебаний параметров среды - от самых малых до самых больших.

Крупномасштабная океаническая циркуляция состоит из потоков, управляемых ветрами (несколько сот метров верхнего слоя), течениями, управляемыми потоками тепла и свежей (пресной) воды через поверхность с последующим смешением теплой и соленой вод (т.н. термохалинная циркуляция), и из гравитационных лунных и солнечных приливов. Эти потоки, взаимодействуя между собой нелинейным образом (т.к. течения изменяют распределения теплой, холодной, пресной и соленой воды) и формируют достаточно стабильную циркуляцию. Однако при достаточных возмущениях в системе атмосфера-океан (на-пример, явления Эль-Ниньо, Ла-Ниньо, связанных с Южным колебанием [7, 13]) управляемые ветром поверхностные течения, могут влиять на авеллинг (подъем глубинных вод - дивергенция Экмана). Возмущение может быть связано с действием пресной поверхностной воды на механизм термохалинной циркуляции (с ее сильно нелинейной реакцией), приводящей к большим изменениям в транспорте тепловой энергии. Возмущающее действие приливов также необходимо учесть, поскольку они принимают участие в эволюции климатической системы, формируя один из главных источников турбулентной энергии для перемешивания океана (дополнительно к тому, который производится ветром).

Глобальная термохалинная циркуляция в сильно упрощенном виде состоит из замкнутых глобальных потоков: приповерхностного, глубоководного и придонного и связана с мощным антарктическим циркумполярным западным течением, охватывающем всю глубину океана вокруг ледяного континента. От этого течения ответвляется поток, следующий к экватору вдоль тихоокеанского побережья Южной Америки, далее по экватору через Индонезийский архипелаг и Индийский океан в Атлантический океан, огибая Африку и устремляясь через экватор в Мексиканский залив, где формируется мощный Гольфстрим. Эта система поверхностных течений заканчивается в трех основных районах формирования глубокого-

водных источников - Северной Атлантике и в Антарктических морях Росса и Уэдделла. Некоторые важные оценки мощности этих источников даны в [14]; там же показано, что поток тепла в субтропическом Гольфстриме увеличивает температуру воздуха в Северной Атлантике на 10 градусов.

Большую роль в современных исследованиях океана и климата вообще играют наблюдения высоты уровня океана со спутника TOPEX/POSEIDON (США/Франция), дополненными в последние годы наблюдениями с аналогичных спутников Jason. Они зафиксировали с 1992 г. подъем уровня мирового океана на несколько сантиметров (как считают из-за глобального потепления). Накоплен огромный статистический материал по пространственно-временной изменчивости уровня и обнаружены мезомасштабные, кластерные и крупномасштабные структуры (аномалии высоты обоих знаков от - 18 см до + 14 см), т.н. «холмы» и «долины», возникающие в различных областях Мирового океана и имеющие преимущественное движение в открытых частях океана на запад со средней скоростью несколько десятков км в сутки. В субполярных частях океанов может возникать противоположная или нулевая фазовая скорость, также как в крупных заливах или закрытых морях видны вращающиеся стационарные структуры [15]. При этом они могут в течении недель менять свои параметры, исчезать и появляться вновь.

Одна из ключевых ролей мирового океана в современных представлениях о климате обусловлена колоссальным количеством углекислого газа, содержащегося в нем (в 50 раз больше, чем в атмосфере), а также метана, связанного в донных осадках в газогидраты. Динамическое равновесие (или его нарушение) потоков  $\text{CO}_2$  между атмосферой и океаном, а также роль в этих процессах планктона, требуют отдельного рассмотрения в рамках глобального углеродного цикла. (Отметим, что реакция планктона в открытых антарктических водах на возросшую УФ-Б радиацию из-за возникающей там в сентябре-октябре озоновой аномалии («дырь») недостаточно изучена, хотя и не является однозначно катастрофической, как предсказывалось в 1980 годы [3]). По последним данным основной источник  $\text{CO}_2$  в океане находится в восточной тропической части Тихого океана между 5 град. с.ш. и 15 град. ю.ш. (до 12 молей/ $\text{m}^2$ год), а его сток - в умеренных широтах Атлантического, Индийского и Тихого океанов в обоих полушариях (до -10 молей/ $\text{m}^2$ год) [13].

Важную роль в пространственно-временной структуре озонового слоя играют изменения в облачных полях: во-первых, вследствие увеличения за счет альбедо уходящей фотохимически активной видимой (в основном) и УФ-радиации Солнца и, во-вторых, формирование и эволюция облаков связаны с выделением скрытой теплоты конденсации, воздействующей на формирование и распространение целого спектра внутренних гравитационных волн, воздействующих на озоносферу. Что касается первого фактора, то оценки показывают, что на высоте 35-40 км концентрация озона может уменьшиться на 10%, а температура - на 2-3 градуса. Таким образом, этот слой атмосферы является дополнительным к тропосферному источником возникновения внутренних волн, причем всех типов - экваториальных, приливных, гравитационных (если их период одного порядка с временем существования облачных масс). Формирование облаков и облачных масс (кластеров) во многом определяется процессами конвекции (особенно в тропиках), в т.ч. связанными с температурой поверхности океана, а также особенностями систем цир-

куляции в тропосфере (внутритропическая зона конвергенции, тропические циклоны, Эль-Ниньо и т.д.).

На рис. 2 приведены пространственно-временные спектры ОСО для экваториальной области для августа 1997 (а, б) и августа 2004 гг. (в, г), иллюстрирующие основные «гармоники» в распределении ОСО и альбедо (в основном облаков) по данным наблюдений прибором TOMS со спутника Earth Probe, сканирующем поле ОСО и суммарное альбедо в местный полдень, так что в течение одних суток получается 180 значений («минут») вдоль экватора. Полученный за месяц ряд из 5400 значений анализировался с помощью скользящего спектрального окна (метод СВАН диаграмм (см. [11]). Основная гармоника ОСО для августа 1997 г. (рис 3. а) имеет «период» одни сутки (0,06. 10(-1)) циклов в «минуту») с амплитудой около 5 е.Д., а другие гармоники с амплитудами 2 и 1 е.Д. – всего же регистрируется 8 гармоник; кроме того, в нижней части диаграммы видны 5-6 дневные периоды колебаний ОСО. 9 основных гармоник видны и для альбедных характеристик этой же зоны: наиболее мощная – третья, причем амплитуда меняется с течением времени для всех гармоник. В целом видна хорошая корреляция спектров на рис. 2 б с рис. 2 а. Другая картина наблюдается для августа 2004 года (рис 2 в и г): несмотря на большее число гармоник (11) пространственно-временного поля глобальной экваториальной облачности, вся мощность спектра ОСО сосредоточена в одной гармонике – это пространственное распределение одного максимума и одного минимума ОСО вдоль экватора [5].

## ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ГЕОСФЕР И ОЗОНОВЫЙ СЛОЙ

В тропической зоне обнаружены особенности распределения ОСО меридиональной направленности (0,180, +/-90 градусов долготы). Они проявляются преимущественно в виде волн ОСО с волновыми числами 1, 2, 3, 4-7 (Рис.9 в [2]). Эти данные интерпретируются как проявление тектонических регулярностей в геологическом строении Земли.

Известно, что предвестники землетрясений обнаруживаются не только в литосфере, но и в различных слоях атмосферы, ионо- и озоносфере. В нижней атмосфере над регионами подготовки (!) сильных континентальных землетрясений часто наблюдаются необычные перистые облака. Некоторые сезонные особенности сейсмоозонных эффектов, по-видимому, связаны с особенностями распространения высокочастотных гравитационных и акусто-гравитационных (инфразвуковых) волн. озона.

Земля подвергается постоянному воздействию сейсмо-акустических шумов даже в дни, когда не происходит землетрясений (диапазон частот 2 –7 мГц). Уровень ежедневного возбуждения этого гула соответствует величине около 6 землетрясениям и это невозможно объяснить суммированием всех землетрясений в это время. Источники этого гула находятся в северной части Тихого океана зимой и в Южном океане также в зимний период. Считается, что этот гул генерируется в результате взаимодействия между атмосферой, океаном и дном океана из-за преобразования энергии штормов в инфрагравитационные океанические волны, которые взаимодействуют с топографией дна [17].

Предварительный анализ поведения озонового слоя в период, предшествующий двум самым мощным за последние десятилетия землетрясениям в Индийском регионе (25.01.2001 и 26.12.2004) указывает на необходимость применения метода

анализа рядов наблюдений ОСО для их возможного прогноза. В связи с этим следует упомянуть результаты анализа пространственно-временных характеристик ОСО до Чернобыльской катастрофы и в день выброса радиоактивного облака из саркофага 4-го блока ЧАЭС 25.01.2001 (совпадение с мощным землетрясением в Индии!): в обоих случаях накануне над районом Чернобыля наблюдался хорошо выраженный локальный максимум ОСО [3].

На рис. 3 хорошо проявляются когерентные структуры в озоносфере, существовавшие по данным CRISTA-2 в течение 8 дней в районе австралийского сектора южной части Индийского океана: дана глобальная карта распределения высот максимального отношения смеси озон/воздух (шкала в км над уровнем океана – справа). Минимальные высоты 24-26 км наблюдаются в южном полушарии, плавно переходя к значениям 38-40 км, характерным для нескольких мелкомасштабных структур в районе 25-55 ю.ш. и 80-130 в.д. Тропическая область северного полушария характеризуется фоном 30-32 км, на котором наблюдается несколько ромбовидных мелкомасштабных (100-500 км) понижений до 28-30 км, южная часть тропиков, напротив, показывает квазипериодические структуры больших масштабов как в долготном, так и в широтном направлениях с характерными размерами 1000 и более км. Анализ полей температуры и отношения смеси озон-воздух в диапазоне высот 20-50 км с шагом 5 км показал присутствие в зимнем зональном стратосферном западном потоке Южного полушария распространяющихся в восточном направлении волн с волновыми числами 1- 3 и 2-х квазипостоянных вихревых структур.[1,4]. Предварительная интерпретация квазипостоянных мелкомасштабных структур заключается в эффекте взаимодействия распространяющихся в вихре волн друг с другом и с активными зонами в океане и мантии. Об этом также свидетельствуют, по-видимому, пяти, четырех и треугольные структуры хорошо различимые в антарктическом и других регионах Земли; возможной причиной их появления может служить феномен короткоживущих подкорковых локальных возмущений, предложенный в [8].

Анализ среднемесячных полей температуры и ОСО для августа 1997 г. в восточной части Тихого океана южнее экватора (-90 з.д. - 160 з.д., 0,5 – 40,5 ю.ш.) показал отсутствие пространственной корреляции аномалий этих двух параметров. Так, например, максимальная положительная аномалия температуры поверхности океана наблюдалась вблизи экватора (90-120 з.д., 0-5 ю.ш.) – до 5 градусов, а максимальная отрицательная аномалия ОСО (до 30 е.Д.) в области 90-110 з.д. и 20-35 ю.ш. В то же время хорошо просматриваются квазистационарные (в т.ч. мезомасштабные - порядка ста км и даже меньше) структуры в обоих полях, связанные с особенностями циркуляции в атмосфере и гидросфере в данный период

## ВЫВОДЫ

Анализ глобальных процессов в 1997 г. в средней атмосфере показал мощное воздействие Эль-Ниньо 1997/98 г. на озоновый слой, начиная с начальной фазы (апрель) вплоть до окончания процесса. Впервые обнаружено (в августе 1997 г.) нарушение фотохимического равновесия в фотохимически активном и обычно равновесном слое тропической озоносферы (35-50 км), что свидетельствует о необычайно сильной волновой активности в тропической средней атмосфере в этот период, как в тропической, так и в субполярной и среднеширотной (Южное полушарие) зонах.

Для экваториальных широт спектральные пространственно-временные (в т.ч. долготные) характеристики ОСО и суммарного альбеда для августа 1997 года показывают хорошую корреляцию ОСО.

Исследованы корреляционные связи между структурными характеристиками полей температуры и уровней (отклонений от нормы) поверхности океана и ОСО для некоторых, наиболее интересных районов Мирового океана и определены их масштабы. Прямой зависимости между явно выраженными мезомасштабными структурами в поле озона (рис. 3) и характеристиками подстилающей поверхности океана не обнаружено, что свидетельствует, по-видимому, о более сложных механизмах взаимодействия геосфер, чем предполагалось нами при постановке одной из основных задач этого исследования.

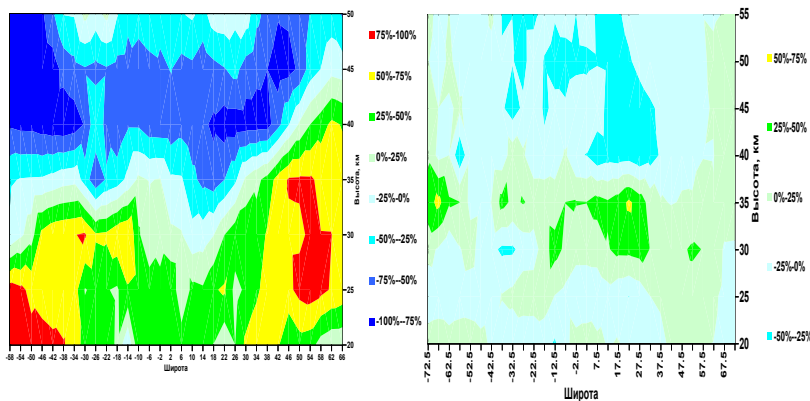
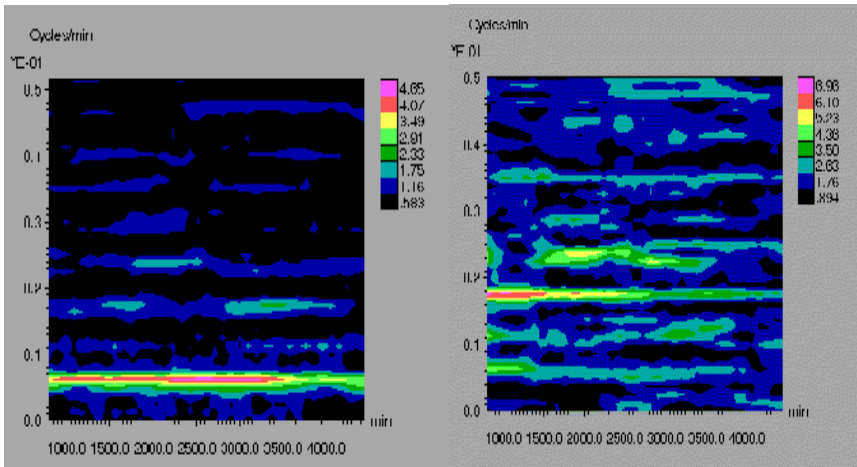
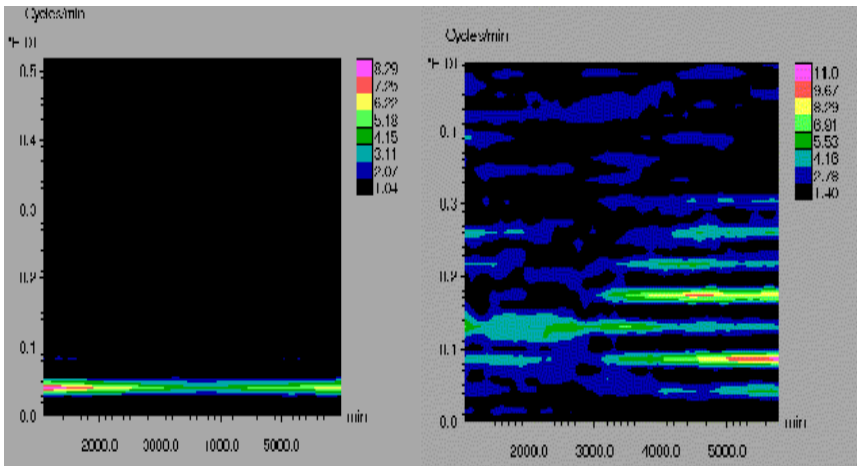


Рис.1. Среднезональный коэффициент взаимной корреляции КК температуры и озона как функция широты и высоты по результатам анализа данных космического эксперимента CRISTA-1 (ноябрь 1994 г. – справа) и CRISTA-2 (август 1997 г. период развития мощного Эль-Ниньо – слева). В нормальных условиях в средней и верхней стратосфере КК достигает 80-100% (самые темные области на рисунке слева), переходя (с шагом 25%) к положительным значениям на высотах 20-30 км. На рисунке справа корреляция практически отсутствует во всем слое 20-50 км; лишь в отдельных широтно-высотных зонах КК лежит в пределах -25-50% (выше 40 км) и 25-50% (ниже 35 км). Это указывает на преобладающую роль динамики в области фотохимического равновесия озона (с характерными временами от часа (на высоте 50 км) до суток (на высоте 30 км)). Впервые получено в [1,4].



а

б



в

г

Рис.2. Пространственно-временные спектры СО<sub>2</sub> (2 а, 2в) и альbedo (2б, 2г) для экваториальной области для августа 1997 (а, б) и августа 2004 гг. (в, г).

### Высота максимума отношения смеси озона

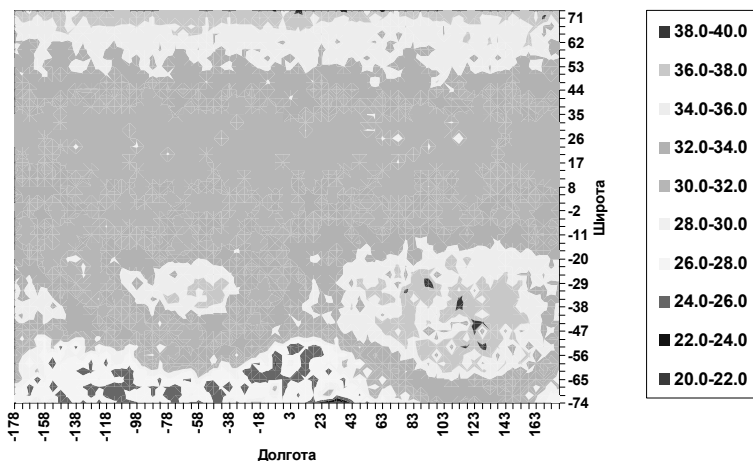


Рис.3. Когерентные структуры в озоносфере, существовавшие по данным CRISTA-2 в течение 8 дней в районе австралийского сектора южной части Индийского океана.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (Гранты 01-05-7452, 03-05-64790), ФЦП «Мировой Океан» № 43.634.11.0001-9.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Галкина И.Л., Крученицкий Г.М., Перов С.П. Трехмерные структуры полей озона и температуры по данным лимбового зондирования атмосферы// В кн.: Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. Физические основы, методы и технологии мониторинга окружающей среды, потенциально опасных явлений и объектов (Москва, 10-12 ноября 2003 г.). Сб. статей под ред. Е.А.Лупяна; М.: Полиграфсервис, 2004, с.409-414.
2. Stanford J.L., Ziemke J.R., McPeters R.D., Krueger A.J., and Bhartia P.K. Spectral Analysis, Climatology, and Interannual Variability of Nimbus-7 TOMS Version 6. Total Column Ozone, NASA Reference Publ. 1360, April 1995, 80 p.
3. Перов С.П., Показеев К.В. Физические основы глобальных изменений окружающей среды// В кн.: Глобальные изменения окружающей среды, МГУ им. М.В.Ломоносова. Под ред. Р.К. Клиге (в печати).
4. Галкина И. Л. Статистические свойства трехмерных полей озона и температуры по данным лимбовых спутниковых измерений. Диссертация на соискание уч. ст. кандидата физ.-мат. наук. Центральная аэрологическая обсерватория, г. Долгопрудный - 2004, 191 с.
5. Гальченко А. А. Взаимосвязь вариаций озонового слоя с параметрами Мирового океана, Дипломная работа. Физический факультет МГУ им.М.В. Ломоносова, 2004, 56 с.



6. Черников А.А., Борисов Ю.А., Звягинцев А.М., Крученицкий Г.М., Перов С.П. и др. Тенденции изменений озонового слоя по наблюдениям с помощью спутниковой аппаратуры TOMS и наземной озонометрической сети. Исследование Земли из космоса, 2000, № 5, с. 1-10.
7. Черников А.А., Борисов Ю.А., Звягинцев А.М., Крученицкий Г.М., Перов С.П., Стасюк О.Г. Воздействие явления Эль-Ниньо 1997-1998 гг. на озоновый слой Земли// Метеорология и гидрология. 1998. № 3, с. 104-110.
8. Беспрозванный П.А., Бородзич Э.В., Перов С.П., Тимашев С.Ф. О геодинамической обусловленности короткопериодной изменчивости озонового слоя Земли. Terra incognita и короткоживущие подкорковые локальные возмущения, М.: «Папирус ПРО», 2002, с. 34-59.
9. Чашечкин Ю.Д., Кистович А.В. Классификация трехмерных периодических течений в жидкости // Доклады АН. 2004. Т. 395. № 1. С. 55-58.
10. Перов С.П., Крученицкий Г.М., Ермаков В.И., Звягинцев А.М., Суббарайа Б.Х., Чакраварти С.Ц., Джайараман А., Гупта С.П., Лал С., Иванов А.В., Нерушев А.Ф., Арефьев В.Н., Васильев В.И., Кузнецов Г.И., Уткин Е.Ф., Вавилов Ю.Н., Ерлыкин А.Д., Черенкова Е.П., Тимашев С.Ф., Костюченко И.Г., Старик А.М., Хабаров О.С., Ходатаев К.В. Новое в проблеме глобальных изменений и физико-экологический подход к устойчивому (регулируемому) развитию, Физическая экология (физические проблемы экологии), М.: МГУ, Физический ф-т, т.5, 1999, с. 7-19.
11. Крученицкий Г.М., Перов С.П. Исследование глобальных озоносферных процессов методами вейвлет-анализа.- Атлас временных вариаций природных, антропогенных и социальных процессов. Природные и социальные сферы как части окружающей среды и как объекты воздействия, 2002 г., М.: «Янус-К», с. 364-369.
12. Лысенко Е.В., Перов С.П., Семенов А.И., Шефов Н.Н., Гивишвили Г.В. Долговременные тренды среднегодовой температуры на высотах от 25 до 110 км. Известия АН, Физика атмосферы и океана, т.35, No.4, 1999, сс. 435-443.
13. Takachashi T. Global sea-air CO<sub>2</sub> flux based on climatological surface ocean pressure CO<sub>2</sub> and seasonal biological and temperature effects. Deep-Sea Res. II, v.49, 2002, p.1601-1623.
14. Rahmstorf S. Ocean circulation and climate during the past 120,000 years. - Nature, v.419, n.12, 2002, p. 207-214.
16. Isern-Fontanet J., Garcia-Ladona E., and Font J, Identification of Marine Eddies from Maps.- Journ. Atm. and Ocean. Techn., 2003, p. 772-778.
17. Головки В.В. Новая климатическая эпоха – аномальное перераспределение составляющих радиационного баланса Земли. Исследование Земли из космоса, N.6, 2003, с. 3-12.
18. Rhie J., Romanovich B. Exitation of Earth's continous free oscillations by atmosphere-ocean-seafloor coupling. Nature, v. 431, 2004, p.552-556.

---

# РЕКОНСТРУКЦИЯ СДВИГОВЫХ ПОЛЕЙ ПО ЦИРКУЛЯЦИЯМ АТМОСФЕРЫ И ОКЕАНА

Бычков В.Л. (1), Низовцев В.В. (2)

*Московский государственный университет им. М.В.Ломоносова*

*(1) физический факультет; bychvl@orc.ru*

*(2) факультет почвоведения; latona@pochta.ru*

На конференции 2001 г. была предложена вихревая модель солнечной системы, согласно которой регулярная составляющая обращения небесных тел и вращение Солнца поддерживаются вихрем галактического происхождения. Параметры вихря: длина  $>11$  св. г. ( $\approx 700000$  а.е.); поперечник в зоне эклиптики  $\approx 100$  а.е.; скорость осевого течения 215 км/с. Вихрь состоит из ядра с примерно твёрдотельным вращением и зоны распределённой завихренности с кеплеровым профилем  $v \sim r^{-1/2}$  (рис. 1). Кинематический “привод” солнечной системы представляет собой типичный вязкий вихрь Озеена, наблюдающийся в циклонах [1].

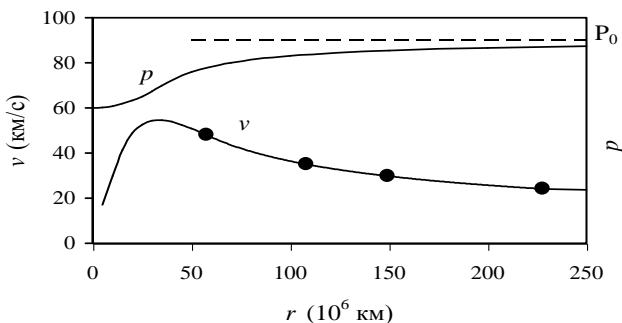


Рис. 1. Профиль скорости ( $v$ ) и ему соответствующий профиль давления ( $p$ ) в плоскости эклиптики. Точки соответствуют планетам земной группы.  $P_0$  – давление на бесконечности. В масштабе рисунка скорость на экваторе Солнца не показана.

Обращение планет имеет дрейфовый характер, поэтому эфирный ветер со скоростью 30 км/с не наблюдается. В начале 20-го столетия на средних широтах был обнаружен эфирный ветер со скоростью от 1 до 10 км/с в опытах Д.Миллера и других. Он связан с наличием у Земли вихревого привода, который поддерживает ротацию планеты и обеспечивает обращение её спутников. Наряду с этим он отвечает за ряд геофизических эффектов, в том числе – за зональные массопереносы на планете. В данном сообщении предпринята попытка провести реконструкцию течений эфирного ветра на поверхности Земли по дрейфовым течениям в атмосфере и океане.

Предварительно рассмотрим происхождение локальных вихрей. Примерное равенство объёмной плотности углового момента небесных тел (т.н. закон изоротации) означает, что привод их вращения связан с самим наличием вещества, слагающего тело. Генезис локальных вихрей, вращающих планеты, становится понятным в свете двух гипотез: гипотезы Кельвина о вихревой природе атомов, формирующихся в эфирной среде в виде динамических (спиновых) структур, и гипотезы В.А.Кривицкого о том, что генезис (и эволюция) ядер химических элементов на планетах происходит в ходе тектонохимических процессов [2]. В соответствии с теоремой Г.Гельмгольца о сохранении завихренности, возникновение изолированных вихрей невозможно, поэтому они формируются в паре, обладающей нулевой завихренностью. Генезис *in situ* вещества, слагающего планету, сопровождается появлением вихревых компенсационных течений в среде, где формируются химические элементы (спиновые частицы). Иными словами, при генерации вещества на планете химические элементы порождаются вращающимися как целое. Компенсационные течения диффундируют наружу и оформляются в виде автономного планетного вихря. Более подробное описание этих процессов можно найти в работе [2].

Косвенным доказательством гипотезы эндогенного происхождения локальных вихрей могут служить следующие особенности вращения планет и обращения

их спутников, не получившие пока рациональной интерпретации. Физико-химическая и геологическая эволюция вещества планеты сопровождается эволюцией вихря. Изменения суммарных угловых моментов вещества геологических пород вызывает медленное – из-за малой вязкости – изменение момента локального вихря. Так получают естественное объяснение различные наклоны планетных осей.

Особенно наглядно упомянутая эволюция и её темпы проявляется в картине обращений спутников планет-гигантов. На рис. 2 условно – в одной плоскости – показана ориентация орбит спутников Юпитера и Сатурна, где угол наклона вектора средней скорости обращения спутника равен углу наклона плоскости его орбиты к экваториальной плоскости планеты. Согласно общепринятой в аккреционном подходе точке зрения, всегда, впрочем, вызывавшей возражения механиков, нерегулярное обращение спутников свидетельствует об их захвате или пережитом столкновении на стадии аккреции протопланетного вещества. В рамках предлагаемой модели разница в ориентации орбит внутренних и периферийных спутников объясняется пространственной эволюцией планетного вихревого привода, последствия которой достигают внешних спутников со значительной задержкой.

Как видно из рис. 2, в предшествовавшие геологические эпохи локальные вихри, эволюционируя, оказывали влияние в первую очередь на обращение ближних спутников. Ныне внешние спутники планет-гигантов всё ещё обращаются в “старом” направлении, однако диффузионный фронт вихря в его новой ориентации достиг зоны их обращения. О последнем свидетельствует неустойчивость орбит внешних спутников: спутники 9 (Япет) и 10 (Феба) Сатурна демонстрируют переменные наклоны орбит. Неустойчивость орбит в случае внешних спутников Юпитера заметна по разбросам наклонов в пределах каждой из двух внешних групп. Разумеется, при этом планеты непрерывно отслеживают положение оси соответствующего вихря. В случае Земли об этом, видимо, свидетельствует чандлеровское раскачивание оси в пределах  $9,2''$ . Обнаруживается дополнительная причина несовпадения оси собственного вращения планеты и мгновенной оси вращения, на что обращено внимание в работе [7].

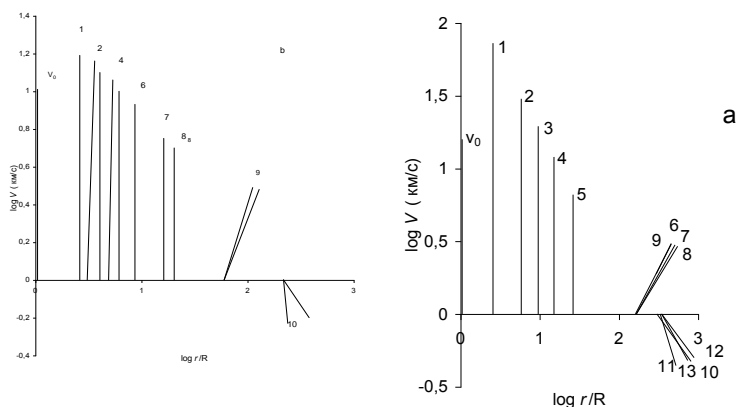


Рис. 2. Наклонение орбит спутников Юпитера (а) и Сатурна (б) к экваториальной плоскости планет. Вертикальные отрезки соответствуют нулевому наклонению. Длина

отрезка отражает среднюю скорость обращения спутника в логарифмическом масштабе. Спутники пронумерованы в порядке удаления от планеты.  $V_0$  – скорость поверхности планеты на экваторе. Отрицательные значения соответствуют обратному обращению; данные взяты из работ [3–4].

Таким образом, кинематика солнечной системы определяется суперпозицией глобального вихря галактического происхождения и локальных вихрей, генетически связанных с элементообразованием на небесных телах. Глобальный вихрь отвечает за регулярную составляющую обращения небесных тел, локальные – за их вращения и обращение спутников. Наряду с этим локальные вихри являются причиной целого ряда геофизических эффектов, остающихся в науках о Земле за пределами понимания: геомагнетизм, тектонические процессы, зональные течения в атмосфере и океане.

В геофизическом отношении представляет интерес выявление составляющих массопереноса в атмосфере и океанах, обусловленных вихревым приводом вращения Земли. Можно ожидать, что такие составляющие будут иметь облик зональных циркуляций, ибо действие течений эфемерной среды, какую представляет собой эфир\*, способно поддерживать лишь “долгие” процессы. Как мы видели, в случае обращения и вращения небесных тел эти течения обнаруживаются на космогонических временах.

Начнём наше рассмотрение с реконструкции профиля скорости течений вихря в экваториальной зоне. Как известно, в этой зоне на Земле и других планетах наблюдаются устойчивые циркуляционные течения преимущественно восточного направления. Экваториальный поток обладает большей плотностью момента количества движения, чем высокоширотные слои атмосферы. В атмосфере планет-гигантов устойчивые экваториальные течения со скоростью порядка и более 100 м/с наблюдаются многие десятилетия. На Земле известны экваториальные струи в нижней стратосфере и в океане [8]. Преобладание западных ветров на Земле означает движение всей атмосферы на восток, по данным Парийского [9], со скоростью 46,5 м/с на экваторе. По новым данным подобные течения не исключаются и на остальных планетах земной группы.

Объяснение дифференциальной циркуляции атмосферы конвективным переносом невозможно, так как плотность потока солнечной энергии на Юпитере составляет всего лишь 4% от плотности на Земле. К тому же Сатурн получает энергии в 4 раза меньше, чем Юпитер, а его экваториальное течение в 4 раза сильнее. К тому же конвекция, например, на Земле, разрушает зональные течения, чего не наблюдается в случае экваториальных течений на планетах-гигантах [10]. Сказанное означает, что в атмосферах планет поддерживается постоянный восточно-западный градиент давления, обеспечивающий повышенную плотность момента в атмосфере.

---

\* Анализ данных из области физики высоких энергий, где эфир-вакуум играет роль материального субстрата частиц и агента, обеспечивающего их взаимодействия, даёт следующие структурно-физические параметры: континуум представляет собой турбулентную среду с средней скоростью пульсаций порядка скорости света; нижняя граница спектра турбулентности лежит около  $10^{-15}$  м; плотность эфира  $3,7 \cdot 10^{-3}$  кг/м<sup>3</sup>; давление ( $P_0$  на рис. 1) – около  $4 \cdot 10^8$  ат.; сдвиговая вязкость  $2 \cdot 10^7$  м<sup>2</sup>/с [6].

Опираясь на эти данные можно построить предположительный профиль течений локального вихря на небольших высотах в экваториальной зоне. При этом следует учитывать, что из-за непрерывной эволюции вихря скорость поверхности планеты на экваторе всегда несколько меньше, чем скорость течений в вихре. Данное предположение

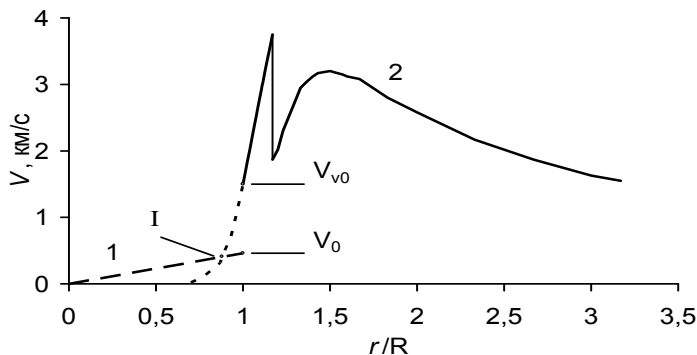


Рис. 3. Реконструкция профиля течений эфирного привода вращения Земли в экваториальной зоне: 1 – твердотельное вращение Земли; 2 – профиль вихря;  $V_0$  – скорость поверхности на экваторе 0,46 км/с;  $V_{v0}$  – скорость течений на экваторе; I – точка изменения направления течений в теле планеты.

основано также на анализе связи между течениями привода и геомагнетизмом, однако её рассмотрение выходит за рамки заявленной темы. Предварительно можно выделить две особенности профиля течений. В системе отсчёта покоящейся Земли на глубинах порядка 10 км течения изменяют своё направление, что связано с “пустотелостью” локального вихря: внутренние слои коры опережают течения. В отличие от этого поверхность Земли несколько отстаёт от течений вихревого привода – это, собственно, и вызывает экваториальные течения прямого направления в атмосфере.

О наличии сдвиговых напряжений свидетельствуют и океанические течения. Как заметил в заключение монографии “Океанские течения” её автор Г. Нейман, “динамика глубинных и придонных течений в общей трёхмерной циркуляции океана ещё не раскрыта и предлагает много нерешённых задач” [11]. Нам представляется, что гидродинамику течений океана невозможно построить без учёта сдвиговых течений вихревого привода. Рассмотрим показательный пример.

Вокруг Антарктиды наблюдаются два зональных течения: Антарктическое циркумполярное течение в прямом, восточном, направлении и направленное к западу Полярное течение. Нейман (с. 226) отмечает, что в отличие от дрейфовых течений тропической и субтропической областей, первое из них представляет собой глубоко проникающий поток (до глубин 5000 м), сохраняющий устойчивость несмотря на влияние донной топографии. Циркумполярное течение не удаётся увязать с течением западных ветров, так как при глубоком проникании оно, тем не менее, имеет небольшой перенос. Рассмотрев ряд подходов к динамике данного течения, Нейман заключает, что “объяснения динамики этого течения ещё не по-

лучено”. Между тем, незначительная скорость данного течения при его большой глубине объясняются тем, что его причиной являются течения вихревого привода, которые с одной стороны “глубоко проникают”, с другой – эфемерны и потому в условиях возмущающих факторов (пролив Дрейка, меридиональные течения и др.) способны поддерживать лишь небольшой перенос.

Видимо, на счёт течений вихревого привода вращения Земли можно отнести все глубокие придонные течения восточного направления на умеренных широтах и западного направления на высоких широтах. Для объяснения такой градации обратимся к Полярному течению западного направления, которое лежит на больших широтах, чем рассмотренное Циркумполярное течение восточного направления. Нам уже приходилось отмечать, что в отличие от глобального вихря солнечной системы (рис. 1), в локальном вихре фактически отсутствует ядро, так как его генезис связан с процессами в земной коре. При сферическом теле Земли и цилиндрической симметрии вихря можно ожидать, что в системе отсчёта неподвижной Земли на больших широтах будут наблюдаться течения обратного направления. Именно с этим случаем мы встречаемся в случае упомянутого течения. Видимо, вообще для приполярных областей характерны эфирные ветры западного направления. Не случайно дрейф советских арктических полярных станций имел отчётливую составляющую западного направления. В отсутствие суши выше 70° с. ш. ледовые поля дрейфовали бы строго циркумполярно в западном направлении.

Приведённые географические факты позволяют наметить контуры тела локального вихря, вращающего Землю (рис. 4). При составлении схемы было учтено, что внешние течения обрываются у поверхности Земли на “ревущих сороковых”, где имеет место разрыв касательных напряжений, способствующий зарождению ураганов.

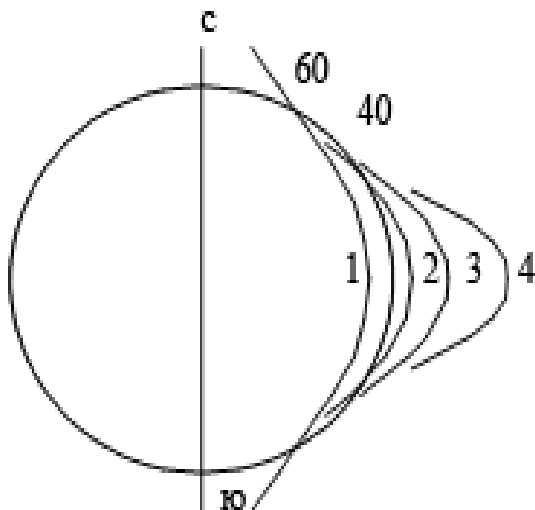


Рис. 4. Меридиональное сечение Земли с вращающим её вихрем: 1 – граница вихревого ядра внутри Земли; 2 – течения, вызывающие прямую зональную циркуляцию атмосферы и океана; 3–4... – внешние течения, ответственные за регулярное обращение спутников.

В системе отсчёта покоящейся Земли течения внутри границы 1 имеют обратное направление (на зрителя). На севере они вызывают дрейф ледяных полей в западном направлении, на юге – Полярное течение также в западном направлении. Поверхности 2 – 4 соответствуют прямым течениям вихря.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложена новая парадигма динамики планетарных процессов. Обращение спутников, вращение планеты и зональные течения атмосферы и океана управляются единым вихревым приводом эндогенного происхождения. В последующих работах будет показано, что течения локального вихря ответственны за геотектонику и геомагнетизм. Подтверждается предвидение Д.В.Наливкина о том, что “в литосфере, так же, как и в гидросфере и атмосфере, господствуют система взаимосвязанных и взаимно влияющих друг на друга вихрей”.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Анисимова Е.П., Николаев А.М., Сперанская А.А., Чернышев О.Н. // Вест. Моск. ун-та. Физ. Астрон. 1997. № 4. С. 38–40.
2. Кривицкий В.А. // Геоинформатика. 2003. № 1. С. 42–50.
3. Низовцев В.В. // Холодная трансмутация ядер. Мат-лы 10-й Рос. конф. Дагомыс, Сочи. 2002. Ред. Р.Н.Кузьмин. М.: 2003. С. 371–379.
4. Моррисон Д., Крукшенк Д., Бернс Дж. В: Спутники планет. Ред. Дж.Бернс. М.: Мир. 1980. С. 13.
5. Крукшенк Д., Дегевий Дж., Целлнер Б. В: Спутники Юпитера. В 3-х частях. Ч. 1. Ред. Д.Моррисон. М.: Мир. 1985. С. 147.
6. Низовцев В.В., Бычков В.Л. // Проблемы холодной трансмутации ядер химических элементов и шаровой молнии. Мат-лы 11-й Рос. конф. Дагомыс, Сочи. 2003. Ред. Р.Н.Кузьмин. М.: 2004. С. 325–339.
7. Костина Л.Д., Юркина М.И. // Изв. вузов. Геодезия. Аэрофотосъёмка. 2002. № 2. С. 69–77.
8. Hide R. // Nature. 1970. V. 225. P. 254–255.
9. Парийский Н.Н. Избранные труды. М.: ОИФЗ РАН 2000. С. 59.
10. Смит Б., Хант Дж. В: Юпитер. Т. II. Атмосфера, ионосфера. Ред. Т.Герелс. М.: Мир. 1979. С. 433–459.
11. Нейман Г. Океанские течения. Л.: Гидрометеоздат. 1973. 257 с.

## МОНИТОРИНГ РАДИАЦИОННОЙ ОБСТАНОВКИ



## НА ВЫСОКОАПОГЕЙНЫХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТАХ В 22-М И 23-М ЦИКЛАХ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ

Сосновец Э.Н., Веденькин Н.Н., Власова Н.А., Иванова Т.А.,  
Марьин Б.В., Павлов Н.Н., Рейзман С.Я., Рубинштейн И.А.,  
Тверская Л.В., Тельцов М.В. (1), Балашов С.В., Иванов В.В.,  
Максимов И.А., Хартов В.В. (2)

*(1) Научно-исследовательский институт ядерной физики*

*им. Д.В.Скобельцына МГУ*

*(2) Научно-производственное объединение “Прикладная механика”*

*им. М.Ф.Решетнева*

*Посвящается памяти Эльмара Николаевича Сосновца  
доктора физ.-мат. наук, зав. ОТПКФ НИИЯФ МГУ*

Доктор физ.-мат. наук, зав. отделом теоретической и прикладной космофизики НИИЯФ МГУ Эльмар Николаевич Сосновец был руководителем программы глобального мониторинга радиационной обстановки, концепция которой была разработана в начале 90-х годов в НИИЯФ МГУ совместно с НПО «Прикладная механика» им. М.Ф.Решетнева (г. Железногорск Красноярского края) [1]. Основными задачами службы мониторинга являются:

Оценка реального уровня воздействия радиации на космические аппараты;

Апробация и уточнение существующих и разработка новых, динамических, моделей радиационных полей;

Получение экспериментальных данных для решения ключевых проблем физики магнитосферы Земли.

Для проведения мониторинговых измерений в НИИЯФ МГУ была разработана и создана унифицированная аппаратура (контрольно-дозиметрический модуль ДИЭРА) [2]. Поскольку в магнитосфере Земли присутствуют различные виды ионизирующих излучений, отличающихся как по типу частиц, так и по величине энергии и плотности потоков, то это потребовало включение в состав аппаратуры нескольких типов детекторов. Конструктивно аппаратура выполнена в составе трех приборов: блока детектирования излучений, дозиметра и информационно-управляющего блока. На рис. 1 представлена фотография блока детектирования.

В таблице 1 приведены типы детекторов, входящие в состав аппаратуры ДИЭРА, и диапазоны измеряемых энергий. На КА «Молния-3К», запущенном в 2001 г., в состав КДМ ДИЭРА входила новая разработка спектрометрического узла, предложенная и сконструированная Э.Н.Сосновцом, на основе сцинтилляционного детектора и полупроводникового детектора в качестве светоприемника.

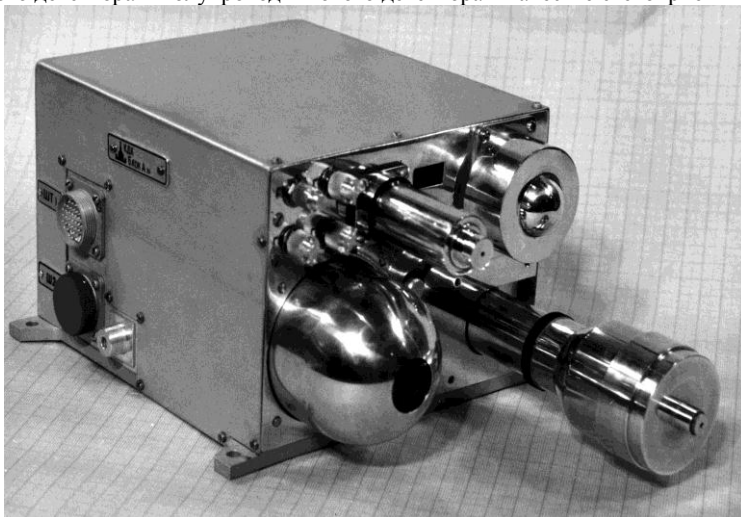


Рис. 1 Блок детектирования аппаратуры ДИЭРА.

Таблица 1. Состав детекторов унифицированного комплекса ДИЭРА

| Тип детектора                     | Диапазон энергий                    |
|-----------------------------------|-------------------------------------|
| Электростатический анализатор     | $E_i, e=0.1 - 14$ кэВ               |
| Торцовый газоразрядный счетчик    | $E_e > 40$ кэВ, $E_p > 1$ МэВ       |
| Телескоп из п/п детекторов        | $E_e=0.1-1.5$ МэВ, $E_p=12- 50$ МэВ |
| Телескоп из сцинт. и п/п. детект. | $E_e=2-6$ МэВ, $E_p=10-300$ МэВ     |
| Черенковский счетчик              | $E_e > 2$ МэВ, $E_p > 350$ МэВ      |
| Ионизационная камера (дозиметр)   | $E_e > 4$ МэВ, $E_p > 50$ МэВ       |

Для будущих экспериментов Э.Н.Сосновец разработал усовершенствованный телескоп на основе 3-х сцинтилляционно-полупроводниковых узлов. Новый телескоп имеет ряд преимуществ по сравнению со стандартными на основе сцинтилляционного детектора и ФЭУ в качестве светоприемника:

отсутствие высоких напряжений, необходимых для ФЭУ;

суущественно меньшие габариты;

снижение веса за счет отсутствия необходимости боковой защиты.

Созданный спектрометр энергичных частиц предполагается включить в комплекс аппаратуры на планируемые к запуску КА ГЛОНАСС и «Молния-3К».

С 1991 г., когда фактически началась программа глобального мониторинга, и по настоящее время, аппаратура ДИЭРА устанавливалась на российских космических аппаратах связи, навигации и ТВ-вещания [3-5]. В таблице 2 представлен перечень КА, приведены интервалы времени, за которые получена информация, параметры орбит и фазы цикла солнечной активности (СА), на которые приходилась работа космических аппаратов (КА).

На рис. 2 схематически показаны проекции на плоскость геомагнитного меридиана четырех основных типов траекторий, на которых функционируют российские КА связи, навигации и телевидения.

Орбита 1 соответствует полярной орбите с наклоением  $73^{\circ} \div 100^{\circ}$  на высоте  $\sim 1000$  км, на которую запускались КА серии «Космос», «Муссон», «Метеор». Период обращения этих КА составляет  $\sim 110 \div 120$  мин. Эта орбита позволяет контролировать область внутреннего радиационного пояса, низковысотные отроги внешнего радиационного пояса и кольцевого тока, авроральную зону и солнечные космические лучи в полярной шапке.

Таблица 2. Основные эксперименты

| ИСЗ         | Параметры орбит                    | Интервал измерений | Примечание                    |
|-------------|------------------------------------|--------------------|-------------------------------|
| Горизонт-34 | Геосинхронная<br>H=36 600 км       | 1991-1992          | Спад 22-го цикла СА           |
| Горизонт-35 | Геосинхронная<br>H=36 600 км       | 1991-1994          | Спад 22-го цикла СА           |
| Горизонт-41 | Геосинхронная<br>H=36 600 км       | 1993 - 1994        | Спад 22-го цикла СА           |
| Глонасс-60  | Круговая,<br>H=20 000 км,<br>i=65° | 1994 - 1996        | Спад и минимум 22-го цикла СА |
| Электро     | Геосинхронная<br>H=36 600 км       | 1994 - 1998        | Спад и минимум 22-го цикла СА |
| Экспресс-11 | Геосинхронная                      | 1995 - 1996        | Минимум СА (конец             |

|             |   |              |                                   |
|-------------|---|--------------|-----------------------------------|
|             | ая<br>H=36 600 км                                       |              | 22-го и начало 23-го цикла )      |
| Экспресс-А2 | Геосинхронная<br>H=36 600 км                            | 2000<br>н.в. | Максимум и спад<br>23-го цикла СА |
| Экспресс-А3 | Геосинхронная,<br>H=36 600 км                           | 2000<br>н.в. | Максимум и спад<br>23-го цикла СА |
| Молния-3К   | Эллиптическая,<br>i=65°,<br>Ha=40 000 км,<br>Hp=500 км, | 2001<br>н.в. | Максимум и спад<br>23-го цикла СА |
| Метеор-3М   | Солнечно-синхронная,<br>H=1018 км,<br>i=99,63°          | 2001<br>н.в. | Максимум и спад<br>23-го цикла СА |

Орбита 2 представляет круговую орбиту на высоте 20.0 тыс. км с наклоном  $65^\circ$ , на которой функционируют КА серии ГЛОНАСС. Период обращения КА на этой орбите равен  $\sim 12$  ч. Эта траектория проходит практически через центр внешнего радиационного пояса в районе геомагнитного экватора на  $L \approx 4.0$ . На высоких геомагнитных широтах орбита пересекает авроральную зону и полярную шапку.

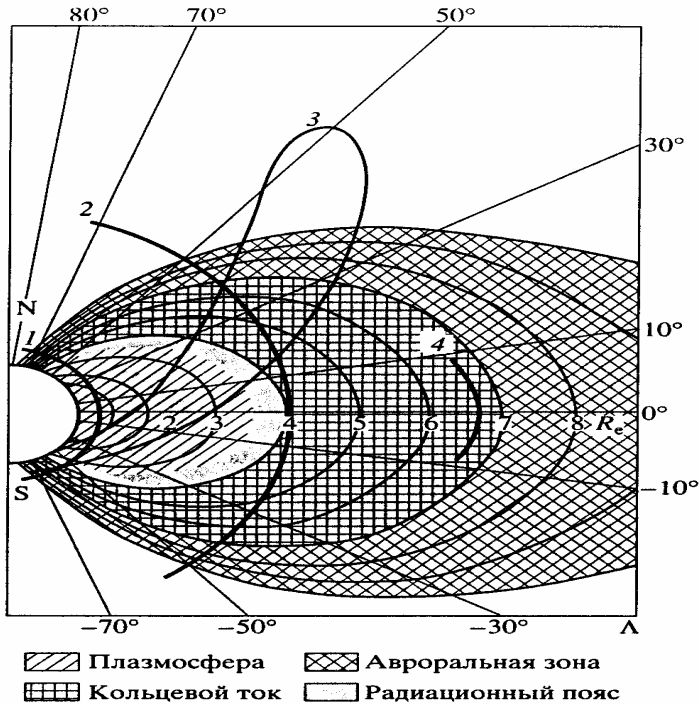


Рис.2 Типы орбит КА связи, навигации и ТВ-вещания.

Орбита 3 – эллиптическая орбита КА серии «Молния» с апогеем  $\sim 39.6$  тыс. км и наклоном  $65^\circ$ . Эта орбита с точки зрения воздействия факторов внешней среды является наиболее «трудной», так как пересекает все основные структурные области внутренней магнитосферы: центр внутреннего радиационного пояса в районе геомагнитного экватора ( $L \sim 1.5$ ), весь внешний радиационный пояс ( $L \sim 3 \div 7$ ), авроральную зону ( $65^\circ \div 70^\circ$ ) и полярную шапку ( $> 70^\circ$ ).

Орбита 4 является геостационарной орбитой (ГСО) на высоте 36.6 тыс. км. Геомагнитная широта, на которой функционируют геостационарные КА, зависит от долготы и находится в пределах  $\pm 11^\circ$  относительно геомагнитного экватора. Этот разброс широт изображен на рис. 2 отрезком дуги на  $L=6.6$ . Геостационарная орбита наиболее сложна в прогнозировании уровней воздействия излучений из-за высокой степени динамичности пересекаемых ею областей магнитосферы: периферии внешнего радиационного пояса, кольцевого тока и ближней к Земле (внутренней) кромки плазменного слоя хвоста магнитосферы. На геостационарной орбите эксплуатируются несколько типов КА серий «Горизонт», «Экспресс», «Галс» и «Электр».

Период реализации программы глобального мониторинга радиационной обстановки приходится на 22-ой и 23-ий циклы солнечной активности. На рис. 3 представлен временной ход солнечной активности по числу пятен Вольфа.

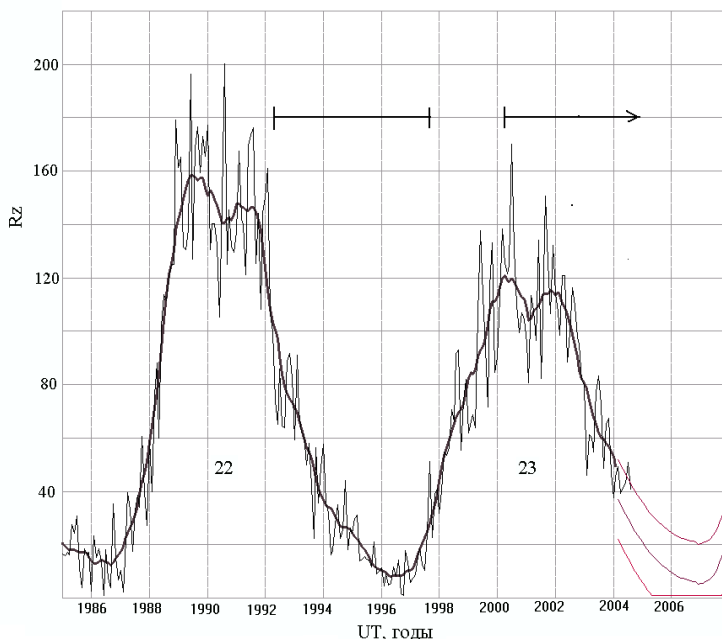


Рис. 3. Временной ход солнечной активности в 22 и 23 циклах по числу солнечных пятен (чисел Вольфа). Тонкая кривая — месячные значения  $R_z$ . Толстая кривая — сглаженные месячные значения  $R_z$ . Тонкие кривые в 2003-2008 гг. — прогноз  $R_z$  (максимальные, предсказанные и минимальные значения  $R_z$ ), подготовленный в U.S. Dept. of Commerce, NOAA, Space Environment Center. Горизонтальными линиями отмечены периоды времени, когда была получена информация с КДМ ДИЭРА.

С помощью аппаратуры КДМ ДИЭРА контролируются три основных вида ионизирующих излучений, характерных для орбит используемых КА: горячая магнитосферная плазма ( $E \sim 0.1 \div 10$  кэВ), энергичные электроны радиационных поясов Земли ( $E_e \sim 1 \div 6$  МэВ) и протоны солнечных вспышек ( $E_p \sim 10 \div 350$  МэВ). На некоторых аппаратах измерялась также интегральная доза радиации внутри гермоконтейнера. На рис. 4 представлена радиационная обстановка на геостационарной орбите во второй половине 2001 г. в максимуме 23-го цикла солнечной активности.

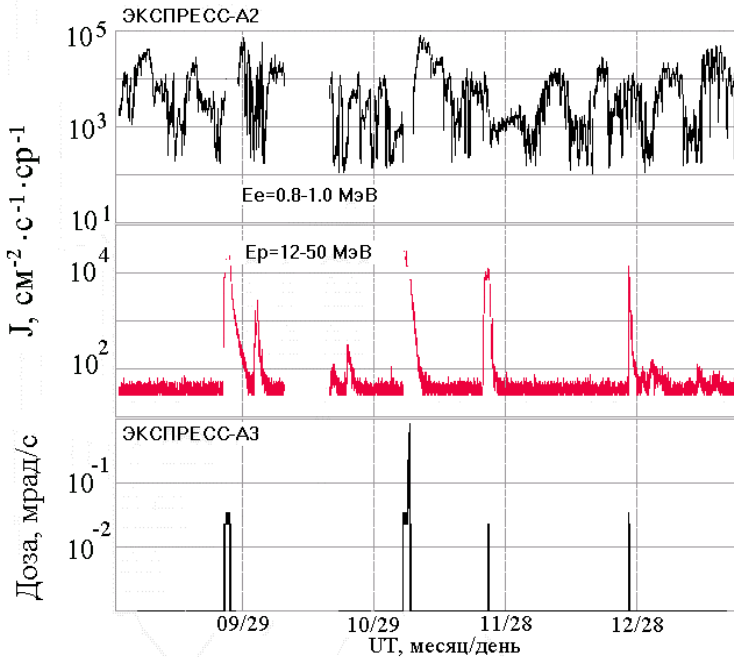


Рис. 4. Радиационная обстановка на геостационарной орбите во второй половине 2001 г. в максимуме 23-го цикла солнечной активности. Представлены данные о потоках электронов радиационного пояса, возрастаниях протонов СКЛ (“Экспресс-А2”) и мощность дозы от них внутри гермоконтейнера КА “Экспресс-А3”.

Геостационарная орбита проходит на периферии внешнего радиационного пояса, через область кольцевого тока и ближнюю часть плазменного слоя. Исследование динамики потоков частиц на геостационарной орбите может пролить свет на физику магнитосферы Земли. Так по существующим теориям в этой области происходит зарождение одного из основных процессов в магнитосфере Земли: геомагнитной бури. На этих расстояниях геомагнитное поле, которое управляет движением заряженных частиц, имеет значительную асимметрию в направлении полдень-полночь и характеризуется большими флюктуациями во времени, обусловленными геомагнитными возмущениями. Поэтому для этой орбиты характерны два основных типа вариаций потоков электронов: суточные и геомагнитные. Характер этих вариаций виден на рис. 4. На суточные вариации накладываются длиннопериодные изменения интенсивности электронов, обусловленные магнитными бурями (верхняя панель). Вторым важным фактором радиационного воздействия на геостационарные ИСЗ являются протоны солнечных вспышек - солнечных космические лучи (СКЛ) (вторая панель на рис. 4).

Одним из важнейших проявлений геомагнитных возмущений является генерация потоков релятивистских электронов в магнитосфере Земли, воздействующей

щим на спутниковые системы и атмосферу Земли. Исследования динамики релятивистских электронов в магнитосфере Земли ведутся с первых лет космической эры. Однако до настоящего времени остаются нерешенными многие вопросы, связанные с источниками и механизмами ускорения частиц до таких энергий. Теоретическое и экспериментальное исследование природы, ускорения и динамики энергичных электронов и связь наблюдаемых возрастных с геомагнитными возмущениями – одна из наиболее актуальных и важных проблем в рамках программ «Космическая погода».

Короткопериодные вариации потоков электронов ( $5\div 10$  дней) практически не коррелируют с потоками СКЛ, поскольку природа этих двух основных факторов радиационной безопасности различна. Протоны СКЛ, благодаря более высокой скорости распространения в межпланетной среде ( $\sim 10^{10}$  см/с), приходят на Землю раньше, чем потоки солнечной плазмы (скорость солнечного ветра  $\sim 10^7 \div 10^8$  см/с) и, как правило, регистрируются до геомагнитной бури, которая начинает развиваться в момент прихода на орбиту Земли вспыхивающих выбросов плазмы. Такая картина наблюдается в случае одиночных вспышек.

Для исследования динамики потоков частиц большой интерес представляют длительные измерения, проведенные на одном КА. На рис. 5 представлена совокупность экспериментальных данных о потоках релятивистских электронов в период максимума и в начале спада 23-го цикла солнечной активности по данным ИСЗ «Экспресс-А2» и их сравнение с расчетами по моделям НИИЯФ-91 [6] и АЕ-8 [7]. Обе эти модели дают примерно одинаковые значения потоков электронов для геостационарной орбиты, так как они построены на основе близких экспериментальных данных. Модельные значения не занижают реально наблюдаемые потоки электронов, что обеспечивает некоторый запас радиационной стойкости элементов КА при использовании этих моделей. На фазе спада солнечной активности наблюдается небольшое увеличение интенсивности потоков электронов в области геостационарной орбиты. Кажущееся противоречие с общепринятой точкой зрения, согласно которой радиационная обстановка ухудшается с ростом солнечной активности может быть объяснено тем, что в максимуме солнечной активности благодаря большому числу магнитных возмущений (бурь) увеличиваются флуктуации геомагнитного поля на геостационарной орбите. Это приводит к значительному сокращению времени жизни электронов радиационного пояса и уменьшению среднего потока захваченных электронов.

Максимальные интенсивности релятивистских электронов обычно достигаются на геостационарной орбите через 3-4 года после максимума солнечной активности. Эти возрастания связаны с высокоскоростными потоками солнечного ветра [8,9]. Приведенные на рис. 5 модельные и экспериментальные временные зависимости свидетельствуют, что существующие модели не отражают динамику изменения потоков электронов не только во время магнитных бурь, но и в течение 11-летнего цикла солнечной активности. Сравнительный анализ экспериментальных данных, полученных с геостационарных спутников и ИСЗ ГЛОНАСС (круговая орбита на высоте 20.0 тыс. км), выявил различия в динамике потоков релятивистских электронов на этих орбитах [10]. На рис. 6 представлен временной ход потоков релятивистских электронов в 1994 – 1996 гг. в минимуме солнечной активности по данным со спутников ГЛОНАСС (верхняя панель) на L~4 и «Горизонт-41» и «Экспресс-11» на L~6.6.



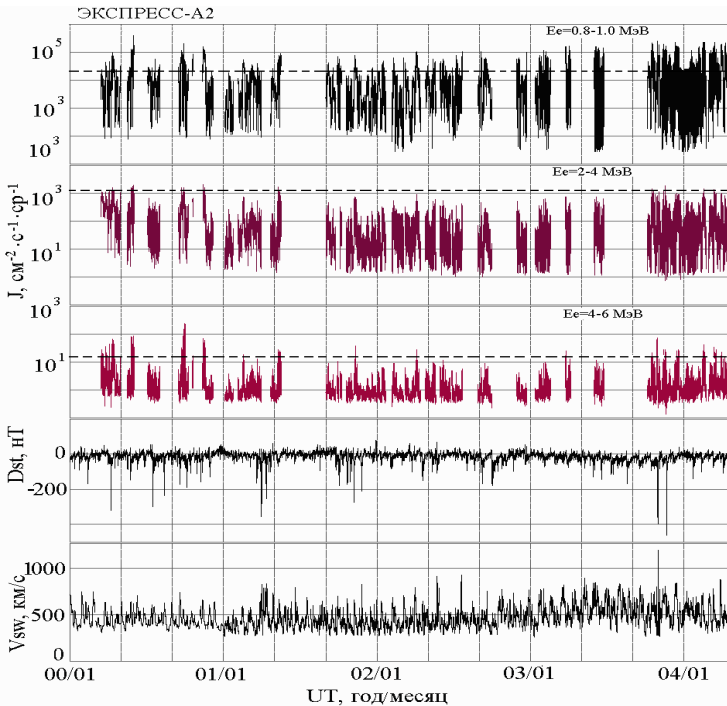


Рис. 5 Временной ход потоков релятивистских электронов с энергией  $E_e=0.8\div 1.0$  МэВ,  $2\div 4$  МэВ и  $4\div 6$  МэВ по данным с геостационарного ИСЗ «Экспресс-А2». Пунктиром обозначены расчетные значения потоков электронов, вычисленные по моделям НИИЯФ-91 и АЕ-8.

Поскольку ГЛОНАСС пересекает области радиационного пояса на  $L\geq 4$ , то для лучшей демонстрации потоков электронов представлен флюенс (интеграл) потока электронов с энергией  $E_e=0.8\div 1.2$  МэВ за один пролет через пояс. Для геостационарной орбиты (вторая и третья панели) приводятся значения интенсивностей потоков электронов вдоль всей орбиты для двух диапазонов энергий:  $E_e=0.8\div 1.2$  МэВ и  $E_e>5$  МэВ. Гистограммами на второй и третьей панелях показаны усредненные 27-дневные значения потоков электронов. Из представленных данных виден различный характер вариаций потоков электронов в центре внешнего пояса и на его периферии. Для периода спада и минимума 22-го цикла солнечной активности в центральных областях внешнего радиационного пояса ( $L\sim 4.0$ ) для электронов с энергией  $E_e=0.8\div 1.2$  МэВ отчетливо просматривается полугодовая волна с максимумом интенсивности потока электронов в весенние и осенние месяцы. На геостационарной орбите вариации потоков электронов с энергией  $E_e=0.8\div 1.2$  МэВ носят нерегулярный характер и связаны, в основном, с геомагнитными бурями.

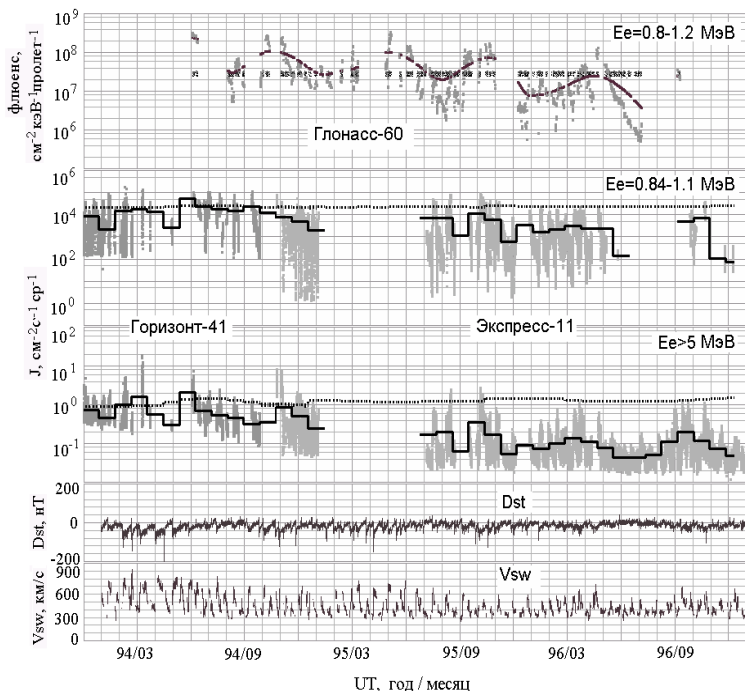


Рис. 6 Временной ход потоков релятивистских электронов в 1994 – 1996 гг. в минимуме солнечной активности по данным со спутников ГЛОНАСС (верхняя панель) на L~4 и «Горизонт-41» и «Экспресс-11» на L~6.6 (см. текст), Dst-вариации и скорости солнечного ветра.

Сезонные вариации хорошо видны лишь на временном ходе потоков электронов с энергией  $E_e > 5$  МэВ. В 1995–1996 гг., которые приходятся на минимум 22-го цикла солнечной активности, отчетливо просматривается спад интенсивности потоков электронов как на геостационарной орбите, так и в центре внешнего пояса. В этот же период отмечается значительное затухание геомагнитной активности и спад среднего и пикового значений скорости солнечного ветра.

В годы минимума солнечной активности создаются благоприятные условия для наблюдения диффузионных волн релятивистских электронов внешнего пояса [10]. Одна из диффузионных волн электронов, зарегистрированных на ИСЗ ГЛОНАСС, представлена на рис. 7. Период с 10 по 22 августа 1994 г. был относительно слабо возмущенным: наибольшая амплитуда Dst-вариации составила 42 нТ. «Новый» максимум интенсивности электронов появился 12 августа на L~5.2. В дальнейшем наблюдалась типичная диффузионная волна: за ~2 недели максимум сместился на L~4.5, а интенсивность возросла более чем на порядок величины.

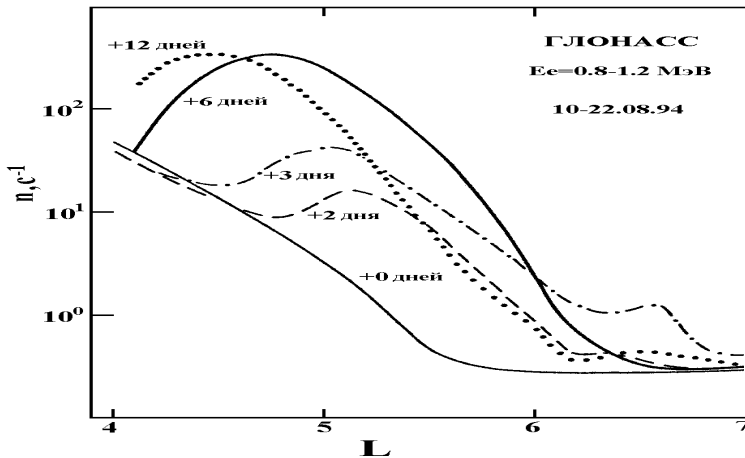


Рис. 7. Диффузионная волна электронов, зарегистрированная на ИСЗ ГЛОНАСС в минимуме солнечной активности.

Сравнение параметров наблюдаемых волн с теорией диффузии под действием внезапных импульсов [11] дает наилучшее согласие, если основной параметр диффузии  $D0=5\cdot 10-14$  с $\cdot$ л. Эта величина  $D0$  совпала с ее оценкой из данных о структуре протонного радиационного пояса [11]. Вследствие квадратичной зависимости  $D0$  от амплитуды импульса (средняя величина импульса по статистике  $\sim 10$  нТ), могут возникать значительные флуктуации  $D0$  и при амплитуде импульса, например,  $\sim 40$  нТ, фронт диффузионной волны может сместиться за сутки на  $L\sim 4$ .

Динамическая картина вариаций потоков частиц в магнитосфере существенно усложняется, если происходят две или более вспышки в течение  $1\div 2$  дней: происходит наложение событий. На рис. 8. представлен временной ход потоков протонов СКЛ с  $E_p=12\div 50$  МэВ за период 04-08.11.01. Данные получены со спутника «Молния-3К» вне магнитосферы (периодические выбросы – пролеты внутри радиационных поясов), а также с геостационарного спутника «Экспресс-А3» внутри магнитосферы. Начало возрастания протонов связано с солнечной вспышкой 04.11.01. Эта вспышка не вызвала геомагнитную бурю в магнитосфере. Но энергичные протоны СКЛ дали значительный вклад в регистрируемую на геостационарной орбите («Экспресс-А3») дозу. После второй вспышки, наблюдавшейся 05.11.01, началась геомагнитная буря с  $|Dst\ max| \sim 250$  нТ.

Основное радиационное воздействие на геостационарной орбите оказывают энергичные электроны внешнего радиационного пояса Земли и протоны солнечных вспышек. Дозиметр, установленный внутри гермоконтейнера ИСЗ «Экспресс-А3», эффективно регистрирует частицы с энергией  $E_e>4.0$  МэВ и  $E_p>50$  МэВ. В таблице 3 приведены значения доз радиации, зарегистрированных с помощью дозиметра, во время наиболее сильных солнечных вспышек в максимуме 23-го цикла солнечной активности. Во время вспышки 14.07.2000 мощность дозы составила  $\sim$

1 рад/час, а во время вспышки 08.11.2000 – более 2 рад/час. Средняя мощность дозы от электронов радиационных поясов Земли и частиц галактических космических лучей (ГКЛ) в промежутках между вспышками составляла ~ 6.5 рад/час, что соответствует среднегодовой дозе ~ 50 рад/год. Суммарная доза от двух самых мощных вспышек в 2000-ом году оказалась соизмерима с годовой дозой от электронов радиационных поясов Земли (РП) и ГКЛ.

Таблица 3. Значения доз радиации по данным ИСЗ «Экспресс-А3»

| Дата вспышки     | Доза         | Мощность дозы |
|------------------|--------------|---------------|
| 14-17.07.2000 г. | 30,4 рад     | ~1 рад/час    |
| 08-11.11.2000 г. | 28,6 рад     | > 2 рад/час   |
| РП и ГКЛ         | ~50 рад/год. | ~6,5 мрад/час |

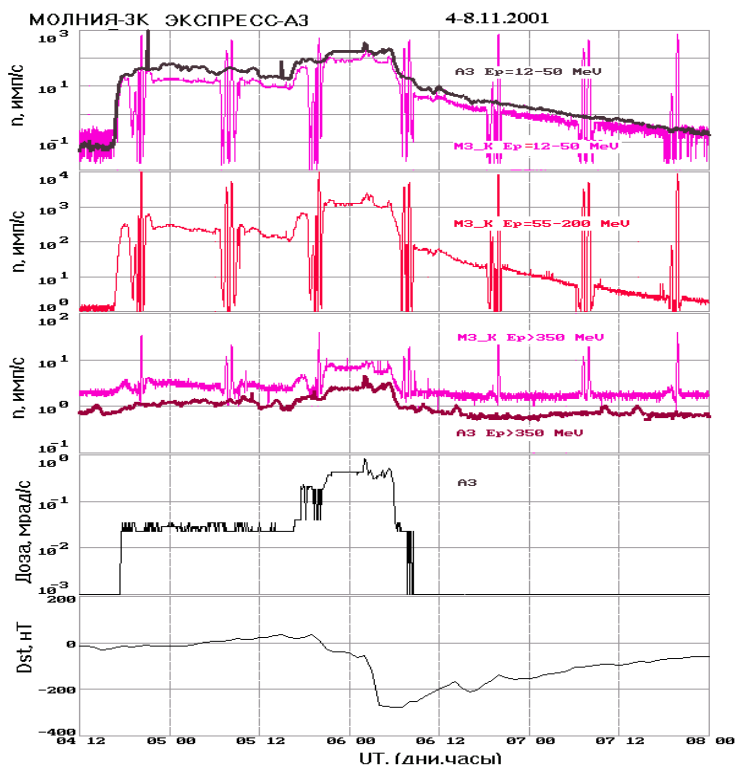


Рис.8. Поток протонов и дозы радиации от двух солнечных вспышек по данным гео-стационарного спутника «Экспресс-А3» и ИСЗ «Молния-ЗК» с эллиптической орбитой.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках программы мониторинга радиационной обстановки в магнитосфере Земли под руководством Э.Н.Сосновца были проведены измерения в 22-м и 23-м циклах солнечной активности на космических аппаратах серий «Горизонт», «Экспресс», «Молния» и ГЛОНАСС аппаратурой, разработанной и созданной в ОТПКФ НИИЯФ МГУ.

Получены следующие основные результаты:

с ростом солнечной активности не наблюдается ухудшения радиационной обстановки по данным с геостационарных спутников, что не согласуется с общепринятой точкой зрения;

показано, что максимальные интенсивности релятивистских электронов обычно достигаются на геостационарной орбите через 3-4 года после максимума солнечной активности;

обнаружены сезонные вариации интенсивности потоков релятивистских электронов во внешнем радиационном поясе Земли ( $L \sim 4$ ) в минимуме солнечной активности;

исследован процесс возникновения и распространения диффузионных волн релятивистских электронов. Параметры диффузионных волн хорошо соответствуют теории диффузии частиц под действием внезапных импульсов;

в области геостационарной орбиты дозы радиации от отдельных солнечных вспышек могут быть соизмеримы со среднегодовыми дозами от потоков электронов радиационных поясов Земли;

существующие стандарты и модели радиации не отражают динамику космических излучений и требуют своего дальнейшего развития на основе результатов натурных измерений.

*Основные идеи статьи были предложены безвременно ушедшим от нас Эльмаром Николаевичем Сосновцом.*

## ЛИТЕРАТУРА

1. M.I.Panasyuk, E.N.Sosnovets, O.S.Grafodatsky, et al. First results and perspectives monitoring radiation belts. - Geophys. Monograph, 1996, v. 97, p. 211-216.
2. Н.А.Власова, Е.В.Горчаков, Т.А.Иванова и др. Система мониторинга радиационных условий в магнитосфере Земли на российских космических аппаратах связи, навигации телевидения. – Космические исследования, 1999, т. 37, № 3, с. 245 – 255.
3. Т.А.Иванова, Н.Н.Павлов, И.А.Рубинштейн и др. Мониторинг радиационной обстановки на геостационарной орбите в максимуме 23-го цикла солнечной активности. – “Физические проблемы экологии (экологическая физика)”, 2001 г., № 6, с. 12-20.
4. Э.Н.Сосновец, м.И.панасюк, И.В.гецелев и др. Моделирование и мониторинг радиационной обстановки в магнитосфере Земли на высокоапогейных космических аппаратах (“Труды конференции по физике солнечно-земных свя

---

## ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ ЭКОЛОГИИ ГИДРОСФЕРЫ

### ЗАКОНОМЕРНОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ЯВЛЕНИЯ ЭЛЬ-НИНЬО / ЛА-НИНЬЯ

А.Л. Бондаренко (1), В.В. Жмур (2)

*(1)Институт водных проблем Российской Академии наук,*

*(2)Институт океанологии им. П.П. Шириова Российской Академии наук.*

#### **Введение**

Эль-Ниньо (Э-Н) - это глобальное явление, при котором происходит потепление на 4 - 50С относительно среднего значения 260С поверхностного слоя воды восточной половины экваториального Тихого океана и вод, прилегающих к Южной Америке в районе государств Эквадор, Перу и частично Чили (рис.1). Ла-Нинья (Л-Н)- явление при котором происходит похолодание поверхностного слоя воды этого района приблизительно на такую же величину. Фактически существует единое явление - Эль-Ниньо/Ла-Нинья (Э-Н/Л-Н), а отдельно Э-Н и Л-Н - крайние стадии его развития.

По мнению [7] при Э-Н, которое может длиться более одного года, в экваториальной зоне Тихого океана наступает подлинное экологическое бедствие: гибнет рыба и часто в очень больших количествах, ракообразные, морские животные, птицы, от чего страдает население прибрежных стран Южной Америки (особенно Эквадора и Перу), активно занятое рыболовством. Большой экономический ущерб наносят сопутствующие стихийные бедствия: наводнения, штормы, грозы и т.д. В эти же периоды Австралия, Африка, Индонезия и страны бассейна Индийского океана страдают от засухи. Дефицит осадков в большей части восточного полушария приводит к заметному снижению мирового урожая зерновых культур, поскольку большая часть посевных площадей находится именно в этом полушарии. По неполным данным, ущерб от одного из самых сильных Э-Н 1982 – 1983 гг оценен более чем в 13 млрд долл. В периоды Л-Н экологические условия становятся вновь благоприятными и продуктивность океана и материков пострадавших от Э-Н восстанавливается. Следует отметить, что восточная часть экваториального Тихого океана является одной из самых богатых рыбой частей Мирового океана.

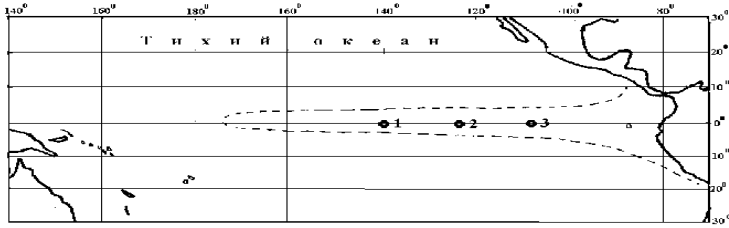


Рис.1. Схема экваториальной области Тихого океана. Пунктирной линией выделена область значительных изменений температуры поверхностных вод океана, вызванных развитием Эль-Ниньо/Ла-Нинья, 1, 2, 3 – пункты продолжительных измерений течений.

В последнее время выполнено большое количество исследований, в том числе и учёными нашей страны, указывающими на возможность влияния Э-Н/Л-Н на гидрометеорологические условия океанов, морей и материков не только экваториальной зоны, но и всего земного шара [4, 5, 6, 8]. Так авторы [8] отмечают, что исследования последних десятилетий показали, что самый большой и наиболее важный сигнал в межгодовой климатической изменчивости связан с явлением Э-Н/Л-Н.

Изложенное явилось основанием особого интереса науки данного явления, на что указывают многочисленные публикации в зарубежных и отечественных журналах. Так в работе [4] отмечается, что исследования столь многочисленны, что даже простое перечисление их весьма затруднительно. Однако абсолютное большинство этих исследований посвящено вопросам прогнозирования стадии развития Э-Н/Л-Н и влияния этого явления на состояние гидрометеорологических и экологических условий океанов и суши земного шара и очень мало выполнено исследований по изучению его природы, особенно в последнее время.

Существует много, в том числе и принципиально разных, объяснений возникновения явления Э-Н/Л-Н, довольно полные сведения, о которых приведены в работах [5, 6, 7]. Эти объяснения принципиально можно разделить на два класса. В объяснениях первого класса Э-Н/Л-Н формируется экваториальными крупномасштабными течениями и противотечениями, а второго – волнами Кельвина и Россби, образование и развитие которых тесно связано с изменениями ветровой активности над океаном.

Все эти объяснения основаны больше на расчетно-гипотетических представлениях и меньше на натурной, реальной информации о процессах как-то связанных с формированием Э-Н/Л-Н, особенно о динамике вод океана. Анализ реальной информации приводит к противоречиям с вышеупомянутыми объяснениями. Таких противоречий довольно много, но здесь укажем только на некоторые из них. Так, в объяснениях первого класса Э-Н наступает в результате поступлений теплых вод из восточной части океана в западную, вызванных образовавшимся поверхностным противотечением в результате прекращения действия ветра - пассатов. В работах [10, 11] приводятся уникальные по надёжности, продолжительности (15 лет) и информативности данные об экваториальных течениях и волнах Россби, из которой следует, что поверхностных противотечений способных доставить воду из западной части океана в восточную просто не существует. Время действия течений в восточном направлении не превышает половины года при средней их скорости не более 0,3 м/с. А для того, чтобы доставить воду из западной части океана в восточную скорость течения должна быть в три раза больше, 1 м/с.

В объяснениях формирования Э-Н/Л-Н второго класса, в частности, образование Э-Н связано с появлением вызванных пассатами волн Россби вне экватора, севернее и южнее от него. Волны распространяются на запад и, достигнув западных границ океана, отражаются от них уже в виде волн Кельвина и распространяются на восток вдоль экватора. Достигнув восточной части океана, они создают Э-Н. Из информации приведенной в [10, 11] и высказываний автора [11] следует что, в экваториальной зоне океана волн Кельвина нет, нет также и волн Россби. А есть “смешанные” волны, обладающие признаками волн Россби и гравитационных. Эти “смешанные” и волны Россби имеют как схожие свойства, так и различия. Так, те и другие волны распространяются в западном направлении, но основная



доля энергии волн Россби сосредоточена севернее и южнее от экватора, а у “смешанных” волн на экваторе. В дальнейшем эти “смешанные” волны всё же будем называть волнами Россби, поскольку так принято.

Из изложенного можно сделать вывод, что эти объяснения явления Э-Н/Л-Н трудно считать правильными. И это естественно, когда они разрабатывались, учёные не располагали достаточной информацией о реальной динамике вод экваториальной зоны, в частности о крупномасштабных течениях и волнах Россби, а руководствовались лишь некими гипотетическими представлениями о них, как выяснилось не совсем верными.

Такая реальная информация появилась только в последние два десятилетия [10, 11], как результат анализа репрезентативных измерений течений экваториальной зоны океана, которой, кстати, мы и воспользовались для объяснения и обоснования механизма формирования явления Э-Н/Л-Н.

Ниже мы приведём своё отличное от ранее известных объяснение природы явления Э-Н/Л-Н, основанное на анализе его развития и натурной информации о крупномасштабных течениях и волнах Россби активно участвующих в формировании этого явления в режиме вынужденной, одновременной их связи.

Это открытие не было для нас случайным. Оно было подсказано нашими прежними исследованиями явления схожего с Э-Н/Л-Н, прибрежного апвеллинга – даунвеллинга, с которым связан подъём глубинных вод на поверхность океана, моря и опускание поверхностных на глубину. Было установлено экспериментально, что эти явления формируются преимущественно не ветром, как предполагалось, а крупномасштабными течениями и континентальными шельфовыми волнами в режиме вынужденной, одновременной их связи [1]. Согласно [3] континентальные шельфовые волны и Россби близкие явления, имеющие схожую динамику и дисперсионные соотношения. Фактически это одни и те же явления, но развивающиеся в различных условиях: одни у берегов океанов и в морях, другие в открытых частях океанов. Нам виделось, что и явление Э-Н/Л-Н имеет схожую природу с явлением апвеллинг – даунвеллинг. В обоих случаях активную роль в формировании этого явления играют крупномасштабные течения и волны, а пассивную – восточный берег моря или океана в образовании апвеллинга – даунвеллинга и экватор – в образовании Э-Н/Л-Н.

Однако конкретно объяснить механизм формирования явления Э-Н/Л-Н мы смогли только после знакомства с информацией о параметрах и свойствах реальных экваториальных крупномасштабных течений и волн Россби, которую удалось обнаружить сравнительно недавно.

Чтобы объяснить читателю механизм формирования явление Э-Н/Л-Н необходимо дать некоторые представления о параметрах и свойствах волн Россби и крупномасштабных течениях экваториальной зоны Тихого океана. Сформулируем их ниже.

Крупномасштабные течения и волны Россби тропической зоны Тихого океана.

В период с 1979 по 1995гг были выполнены измерения течений на экваторе Тихого океана в пунктах 3 (1400W), 2 (1240W), 1 (1100W) (рис. 1), а также севернее и южнее на 1,50 пункта 3 [10, 11], по которым, как отмечалось, была получена высоко достоверная информация о волнах Россби и крупномасштабных течениях. Эта информация позволила иначе представить эти явления.

В экваториальной зоне океана, выделяются крупномасштабное поверхностное и подповерхностное течения направленные вдоль экватора. Направление поверхностного течения изменяется во времени приблизительно с годичным периодом на восток - запад - восток и максимальными скоростями до  $\sim 80$  см/с. Но средние за год течения в поверхностном слое воды до горизонта 20-30 м со скоростями порядка 20 см/с распространяются на запад. Следует оговориться, что предполагается существование постоянного поверхностного течения не на запад, а на восток и называется оно Межпасатным противотечением. Ниже до горизонта 250-300 м слой воды со среднемноголетними скоростями до 90 см/с распространяется на восток. Это знаменитое экваториальное подповерхностное противотечение Кромвелла. Скорости противотечения Кромвелла также могут меняться с годичным периодом и амплитудой приблизительно до 60 см/с. Так, что скорости течения Кромвелла могут увеличиваться до 1,5 м/с и уменьшаться до 30 см/с. На экваторе расход подповерхностного течения на восток в среднемноголетнем режиме приблизительно в 50 - 100 раз больше поверхностного на запад. Большие скорости течений наблюдаются в узкой до 20 к северу и югу приэкваториальной зоне океана. Далее за пределами этой зоны они малы.

Волны Россби открытого океана и экваториальной зоны образуют непрерывное, взаимосвязанное поле свободных волн, охватывающее весь Мировой океан и являющееся энергоёмким образованием. Последовательность волн, как во времени, так и в пространстве представляет собой непрерывный ряд, сформированных в модуляции (группы, цуги, биения) малых - больших - малых и т.д. волн. Свойство волн приобретать модуляционное строение присуще многим типам волн и играет важную роль в развитии динамики вод бассейна. Однако механизм его не изучен. Предположительно построение волн в модуляции связано с неким взаимодействием между собой волн с различными периодами. В настоящее время наука не может достоверно объяснить, как и почему волны выстраиваются в модуляции, почему иногда они чёткие, а иногда не чёткие, почему эти модуляции имеют определенный период, почему они иногда разрушаются.

С большой степенью уверенности можно предположить, что энергетический уровень поля волн во времени изменяется гораздо медленнее, чем изменяются амплитуды колебания скорости течения волн в модуляциях и смена направлений связанных с волнами крупномасштабных течений. О связи волн и течений будет сказано немного позже.

Авторы [2] предполагают, что время жизни и установления волн Россби и связанной с ними переменной части крупномасштабных течений равно более 102 периода волн, что равно приблизительно 10 годам. Это совсем не большая величина и, судя по всему, заниженная. Так, время жизни и установления ветровых волн и зыби обоснованное экспериментально равно 103 - 104 их периода. Вместе с тем существенные изменения амплитуд колебаний скорости течений волн Россби могут происходить за время равное от одного до девяти периодов волн, а крупномасштабных течений - за половину года. Отсюда одновременная корреляционная связь кинетической энергии волн и крупномасштабных течений с активностью источника энергии, в качестве которого мы рассматриваем атмосферную активность - ветер или (и) флуктуации атмосферного давления, должна отсутствовать. Более подробно об этих свойствах волн Россби экваториальной зоны океана можно прочесть в [2].

По параметрам течений с большой степенью точности определены [9] основные параметры волн Россби экваториальной зоны: направление распространения - на запад с фазовой скоростью 0,9 м/с, период ~ 20 суток, длина волны ~ 1600 км, амплитуды колебаний меридиональной составляющей скорости течений - до 80 см/с. У этих волн в приэкваториальных районах океанов меридиональная составляющая значительно больше зональной. Такие большие амплитуды колебаний скорости течений волн Россби наблюдаются в узкой приэкваториальной зоне океана. По мере удаления от экватора к северу и югу амплитуды колебания скорости течения волн заметно уменьшаются и уже в пассатной зоне они не превышают 30 см/с. Таким образом, основная доля кинетической энергии волн, впрочем, как и течений, сосредоточена у экватора. Часто эти волны и течения у экватора рассматривают, как захваченные экватором, а небольшие по площади экваториальные и западные зоны океанов, как особые области концентрации энергии волн и течений океанов. Большие скорости течений наблюдаются только у экватора и у западных окраин океанов. Во всех остальных областях океанов они редко превышают 10 – 15 см/с.

Волны у экватора заметно модулируют, и в модуляциях укладывается ~18 волн, что соответствует по времени приблизительно одному году. В экваториальной зоне Тихого океана укладывается 9 волн, половина модуляции. Иногда модуляции имеют странный квазигармонический характер, иногда они выражены не четко и иногда "разрушаются" и превращаются в волновые образования с частым чередованием больших и малых волн или в целом волны становятся малыми. Возможно, в механизме создания модуляций участвуют колебания системы Земля – океан - атмосфера, которые проявляются в свободных нутационных движениях полюсов с таким же приблизительно периодом, как и периодом, как и период модуляций, около года, Южном колебании атмосферы и явлении Э-Н/Л-Н в океане [9]. Во всяком случае, между этими явлениями наблюдается хорошая корреляционная связь. Следует отметить, что такие четкие модуляции наблюдаются в волнах только у экватора, в остальных областях океана они выражены не четко и период их различный.

При пересечении волнами Тихого океана (за 0,5 года) их энергия и параметры меняются очень слабо. Так, при прохождении волн между пунктами 3 и 1 (3500 км), форма и параметры волн и модуляций практически не изменялись, что и позволило с большой степенью точности определить основные параметры волн: фазовую скорость, длину, период.

Согласно исследованиям [2] крупномасштабные экваториальные течения  $U$  включают постоянную часть  $U'$  и переменную  $U''$  изменяющуюся приблизительно и в основном с годичным периодом.

$$U = U' + U''.$$

У поверхности океана скорости постоянной части течений, как отмечалось, равны приблизительно 20 см/с, у переменной, направленной на запад и восток они достигает 80 см/с. Согласно тем же исследованиям [2] волны Россби и переменная часть течений физически, энергетически связаны зависимостью:

$$U'' = KV_0, \quad (1)$$

где  $U''$  – скорость переменной части крупномасштабного течения,  $V_0$  – амплитуда колебаний скорости течений волн Россби,  $K$  - постоянная величина, для условий в пункте 3,  $K \sim 1,5$ , коэффициент корреляции 0,9.

Наличие связи (1) авторы [2] объясняют с позиции гипотезы Манка - Мура [10] об однонаправленном переносе значительных масс воды в результате нелинейного взаимодействия волн, которые так объяснили большие скорости течения Кромвелла. Таким образом, можно считать, что переменная часть течений сформирована волнами или представляется с ними нечто единое целое. Постоянную часть течений, возможно, следует отнести к ветровым или (и) термохалинным течениям.

Формирование Эль-Ниньо/Ла-Нинья. Как отмечалось, в формировании Э-Н/Л-Н участвуют экваториальные крупномасштабные поверхностные течения и подповерхностные противотечения и связанные с ними физически и энергетически волны Россби.

Поверхностные течения и подповерхностные противотечения создают вертикальную циркуляцию вдоль экватора, которая перемещает поверхностные теплые воды на запад океана, а подповерхностные на восток, в результате чего термоклин на западе океана опущен на глубину, а на востоке он приподнят близко к поверхности океана. Термоклин это сравнительно небольшая прослойка воды между холодными глубинными и приповерхностными более теплыми водами. У восточных краев океана циркуляция создаёт подъём холодных вод на поверхность - апвеллинг, а у западных опускание теплых - даунвеллинг. Такая ситуация преобладает в среднегодовом и многолетнем изменении. Но крупномасштабные течения (и циркуляция) обычно с периодичностью один год изменяются в направлении восток - запад - восток и т.д. и в такт с этими изменениями на какое-то время апвеллинг меняется на даунвеллинг и наоборот. Термоклин будет подниматься и опускаться с такой же периодичностью.

В этих условиях температура поверхностных вод прибрежной зоны океана будет зависеть от этих параметров течений и положения термоклина. Учитывая, что само положение термоклина зависит от скорости и направления течения, то и температура поверхностных вод,  $T$  в прибрежной зоне океана будет зависеть от скорости и направления течения  $U''$  (вектора) т. е.

$$T = \varphi(U''). \quad (1)$$

Волны Россби создают попеременно направленную циркуляцию в плоскости перпендикулярной экватору. В результате активности циркуляции глубинные холодные и теплые поверхностные воды перемешиваются. Это происходит так. Установлено экспериментально [11], что частицы воды в волнах (течения) совершают движения в горизонтальной плоскости по вытянутым эллипсовидным орбитам: севернее экватора по часовой стрелке, а южнее в противоположном направлении. В этом случае векторы течений с огромными скоростями (до 80 см/с) в волнах вне экватора к северу и югу будут направлены в противоположные стороны, в пределах первой полудлины волны - от экватора и в пределах второй полудлины - к экватору. Это основная причина развития Э-Н/Л-Н. Такие движения воды создадут подъем на поверхность океана у экватора более холодных глубинных вод (апвеллинг) в первом случае, во втором - опускание на глубину более теплых (даунвеллинг). В результате холодные глубинные и теплые поверхностные воды перемешиваются и в целом на поверхности океана в приэкваториальной зоне оказываются более холодные воды, чем за её пределами, к северу и к югу от экватора. Температура воды у поверхности океана,  $T$  будет зависеть от разности количеств тепла поступившего из атмосферы и глубин океана. Количество тепла, поступив-

шее из глубин океана будет зависеть от осредненной за некоторое время амплитуд колебаний скорости течений волн Россби, с.к.о.  $V_0$  (среднее квадратическое отклонение) т.е. продолжительности действия этих волн, их частоты  $1/\tau$  ( $\tau$  - период волны) и обратной величины расстояния от поверхности океана до термоклина -  $1/H$ . Если допустить, что в среднем поток тепла из атмосферы не меняется во времени, то изложенные связи для фиксированного места области развития Э-Н/Л-Н можно записать в условной форме:

$$T = f(\text{с.к.о. } V_0, 1/\tau, 1/H) \quad (2).$$

Учитывая, что с.к.о.  $V_0$  и  $U''$  взаимосвязаны (см. (1)) и глубина термоклина зависит от  $U''$ , то для постоянной частоты волн,  $1/\tau$  (2) можно записать:

$$T = \gamma(U'') = \Psi(V_0). \quad (3)$$

Для проверки изложенного объяснения Э-Н/Л-Н нами использовались измерения температуры поверхности воды,  $T$  в пункте 1 (материалы приведены в интернете), меридиональной составляющей скорости течений фактически волн Россби, а также результат её обработки в виде графика среднеквадратической величины амплитуды колебания скорости течения за интервал осреднения  $1/2$  года, с.к.о.  $V_0$  (рис 2а,б,в) [10]. По  $T$  и с.к.о.  $V_0$  была построена связь (3). Сопоставлялись максимумы (I, II, III и т. д.) и минимумы (1, 2, 3 и т. д.) значений кривой в) с соответствующими максимумами и минимумами кривой б). Эта связь имеет коэффициент корреляции 0,88, что свидетельствует о том, что температура на поверхности океана, которая и является показателем развития Э-Н/Л-Н, зависит от амплитуды колебания скорости течения волн Россби и, естественно, от параметров связанных с ними крупномасштабных течений.

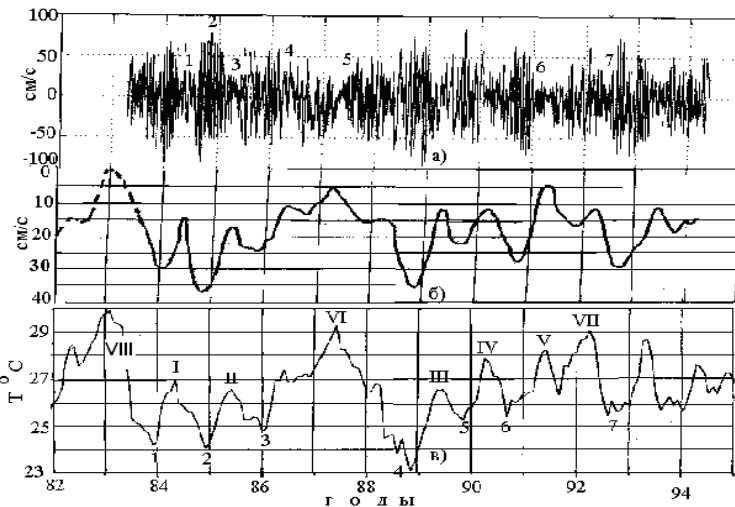


Рис.2 а, б, в. Графики: меридиональной составляющей скорости течений, измеренных в пункте 1 на горизонте 25м (а), среднеквадратическая за половину года величина этих значений (б), температура поверхности океана в пункте 1 (в). Цифрами 1, 2, 3 и т. д., I, II, III и т. д. обозначены области особых состояний процессов (сильного Л-Н, сильно-

---

го, слабого Э-Н), часть графика (б), выделенная пунктирной линией, построена авторами статьи по информации о волнах Россби приведенной в [10, 11].

Связь температуры воды на поверхности океана с волнами хорошо заметна при визуальном рассмотрении поведения параметров волн Россби. Так, моментам Л-Н (1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, рис.2в) соответствует низкая температура поверхности воды (~240С) и четкие волновые колебания течений в модуляциях с большой амплитудой (рис.2а). В это время крупномасштабные течения направлены на запад и их скорости достигают максимальных значений. Моментам слабого Э-Н (I, II, III, IV, V, рис2в) соответствует средняя температура поверхности воды (~270С) и волновые колебания в модуляциях с малыми амплитудами, но не продолжительное время. В это времена крупномасштабные течения направлены на восток и их скорости максимальны. Моментам сильного Е-Н (VI, VII, VIII, рис.2в) соответствует высокая температура (~290С) и волновые колебания течений с малыми амплитудами продолжительное время и малыми скоростями крупномасштабных течений. Такая ситуация наблюдается, например, между моментами времени 4 – 5 (рис. 2а).

В периоды Л-Н биопродуктивность океана увеличивается, и соответственно количество рыбы в нем, не только за счёт понижения температуры воды, но в первую очередь за счет интенсификации вертикальных её движений. В период Э-Н вертикальные движения воды ослабевают, что и приводит в первую очередь к уменьшению биопродуктивности океана и гибели рыбы в нем.

Таким образом, наше объяснение механизма явления Э-Н/Л-Н хорошо согласуется с данными анализа этого эксперимента.

Явления, аналогичные с Э-Н/Л-Н Тихого океана, наблюдаются и в Атлантическом и Индийском океанах, но в менее заметных масштабах.

Заключение. Показано, что в развитии явления Э-Н/Л-Н активно участвуют волны Россби и крупномасштабные течения в режиме вынужденной их связи. Крупномасштабные течения обуславливают положение термоклина, удаляя от поверхности океана или приближая к ней холодные глубинные воды. Волны Россби создают переменную направленную циркуляцию в вертикальной плоскости перпендикулярной экватору. В результате активности волн происходит перемешивание по вертикали холодных глубинных вод с более тёплыми поверхностными водами и как следствие этого на поверхности экваториальной зоны океана оказывается более холодная вода, чем за её пределами к северу и к югу. Фактически Э-Н/Л-Н это апвеллинг – даунвеллинг обусловленный активностью волн Россби и связанных с ними крупномасштабных течений, развивающийся в обширной приэкваториальной зоне восточной части Тихого океана.

В этом едином явлении (волны – течения) изменчивость во времени (и пространстве) указанных параметров волн и течений обусловлена действием некоего механизма, предположительно связанного с нелинейным взаимодействием волн, в результате чего волны Россби выстраиваются в последовательность волн с малыми – большими – малыми и т.д. амплитудами т.е. приобретают модуляционную структуру. Иногда эти модуляционные структуры “разрушаются” и превращаются в последовательность волн с хаотически изменяющимися амплитудами и в целом малыми по величине. Пропорционально и в такт с величиной амплитуд колебаний скорости течений волн Россби изменяется скорость и направление крупномасштабных течений и, соответственно, стадия развития Э-Н/Л-Н. В периоды, когда волны выстраиваются в стройные модуляции развивается Л-Н, при уменьшении

волн развивается в модуляциях развивается слабое Э-Н, а при разрушении модуляций – сильное Э-Н.

Таким образом, непосредственной причиной развития явления Э-Н/Л-Н является модуляционный механизм перестройки волн Россби и связанных с ними крупномасштабных течений. В отличие от этого объяснения в принятых объяснениях непосредственной первой причиной является атмосферная активность, а точнее ветер над океаном.

Изложенные положения нашего объяснения формирования Э-Н/Л-Н подтверждаются устойчивой эмпирической линейной связью температуры поверхности океана с полугодовой среднеквадратической амплитудой колебания скорости течения волн Россби.

Дальнейшее изучение явления Э-Н/Л-Н встаёт перед необходимостью более глубокого изучения механизмов формирования волн Россби и крупномасштабных течений, их взаимных связей, а также изучением закономерностей построения волн Россби в модуляции.

## Литература

1. Бондаренко А.Л. Течения Каспийского моря и формирование поля солёности вод Северного Каспия. М.:Наука. 1993.122С.
2. Бондаренко А.Л., Жмур В.В., Филиппов Ю.Г., Щевьев В.А. О переносе м асс воды морскими и океанскими долгопериодными волнами // Морской гидрофизический журнал. Севастополь. 2004. № 5 (сентябрь - октябрь).
3. Гилл А. Динамика атмосферы и океана. М.:Мир. Т. 2. 1986. 415 С.
4. Груза Г.В., Ранькова Э.Я.Э Клещенко Л.К., Аристова Л.Н..О связи климатических аномалий на территории России с явлением Эль-Ниньо – Южное колебание. – Метеорология и гидрология. , № 5, с.32 – 51. О влиянии Э-Н на различные территории земного шара.
5. Гущина Д.Ю., Девитт Б., Петросьянц М.А. Объединённая модель атмосферы и тропического Тихого океана. Прогноз явления Эль-Ниньо - Южное Колебание 1997-1998гг//Известия АН. Физика атмосферы и океана. 2000. Т.36. N0 5. с.581-604.
6. Мохов И.И., Елисеев А.В., Хворостьянов Д.В. Эволюция характеристик межгодовой климатической изменчивости, связанной с явлением Эль-Ниньо/Ла-Нинья //Известия АН. Физика атмосферы и океана. 2000. Т.36. N06. с.741-751.
7. Нелепо А.Б., Калашников З.Р., Хунджуа Г.Г. Энергетика взаимодействия между океаном и атмосферой в зоне действия феномена Эль-Ниньо// III конференция "Физические проблемы экологии" Москва. Московский Государственный университет. 2002.№ 10.с.118-123. проставить издательство
8. Нечволодов Л.В., Лобов А.Л., Овинова Н.В., Разорёнова О.А., Чумакова Л.В. О связи аномалий меридионального переноса тепла в Северной Атлантике с явлением Эль-Ниньо – южное колебание. – Метеорология и гидрология. 1999. № 6, с.53 – 65.
9. Сидоренко Н.С. Межгодовые колебания системы Атмосфера – Океан – Земля. С. 355 – 365. 1999.



10. Baturin N.G., Niiler P.P. Effects of instability waves in the mixed layer of the equatorial Pacific// J. of Geophysical Research. V.102. NO. C13. December 15. 1997. pp.27,771-27,793.
11. Halpern D., Knox R.A. and Luther D.S. Observation of 20-Day Period Meridional Current Oscillations in the Upper Ocean along the Pacific Equator// J. of Physical Oceanography. Vol.18. November. 1988. pp.1514 -1534.
12. Munk W.H., Moore D. In the Cromwell current driven by equatorial Rossby waves?// J. Fluid Mech. Vol. 33. 1968. pp.241-259.

## ГЕОМЕТРИЯ ВОЗМУЩЕНИЙ СВОБОДНОЙ ПОВЕРХНОСТИ ВРАЩАЮЩЕЙСЯ ЖИДКОСТИ В ЦИЛИНДРИЧЕСКОМ КОНТЕЙНЕРЕ

Будников А.А., Степанова Е.С., Зырянов Ф.Б.

*Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова*

### **Введение.**

Вихревое движение жидкости и газа – распространенное явление. В природных условиях наблюдаются изолированные вихри различных масштабов, от синоптического до сравнительно маломасштабных, развивающихся за топографическими особенностями. Любые из этих вихрей взаимодействуют, и важным элементом является взаимодействие с границей раздела сред. Вихревые системы не являются монотонными, а, как правило, состоят из отдельных рукавов. Взаимодействие вихря с границей раздела сред порождает пограничные течения.

В основной массе исследований вихревого движения используются три базовых модели жидкости – однородная идеальная (основанная на уравнении Эйлера), однородная вязкая (основанная на уравнении Навье-Стокса) и стратифицированная. Регулярные компоненты движений – волны и вихри, – присутствуют во всех моделях. Однако возможности анализа сингулярных компонент в этих моделях существенно различаются. При решении задач для идеальной жидкости с граничными условиями, существующие математические методы не позволяют работать одновременно с регулярными и сингулярными компонентами решений.

При анализе периодических движений в стратифицированной среде выделены как регулярные формы движений (волны и вихри), так и семейства пограничных слоев. В однородной жидкости пограничные слои сливаются и образуют вырожденный слой. Для построения решений приходится использовать дополнительные условия симметрии, что приводит к понижению порядка определяющих уравнений.

Однако, в природе малейшие нарушения формы приводят к появлению новых элементов и изменению структуры течения. Закрученные потоки обладают “упругими” свойствами и допускают существование инерциальных волн, которые могут переносить возмущение из одной области пространства в другую и вызывать взаимодействие стационарных и нестационарных элементов течения. Подобные эффекты, которые проявляются в нестационарности всех характеристик течения, относятся к турбулентности.

Многочисленные группы исследователей занимаются исследованием отдельных крупномасштабных вихрей с вертикальными осями. Теоретическая модель вихря, возникающего вблизи поверхности полубесконечной идеальной жидкости [1] строится на основе системы гидродинамических уравнений, описывающих движение с конечной завихренностью, причем спиральность принимает любые ограниченные значения:

$$(\mathbf{u}\nabla)\mathbf{u} = -\nabla p$$

$$\nabla\mathbf{u} = 0,$$

где  $\mathbf{u}$  – вектор скорости,  $p$  – нормированное давление. Граничные условия состоят из условия непрерывности давления на поверхности среды и равенстве нулю нормальной к поверхности компоненты поля скоростей. Поле завихренности не должно обращаться в нуль во всем полупространстве, занимаемом жидкой средой.

Наиболее широко известно решение этой задачи в виде вихря Рэнкина (течение считается независимым от азимутального угла, радиальная и вертикальная компоненты скорости сразу полагаются равными нулю, дополнительно накладывается условие потенциальности). Другим способом описания движения жидкости является уравнение Гаусса-Кодадзи [1], которое неразрешимо в общем случае. В одном из частных случаев решения для полубесконечной жидкости принимается, что спиральность (кручение) равна нулю. При построении решения авторы воспользовались методами дифференциальной геометрии. В результате получены два типа возможных решений, один из которых не рассматривается, т.к. описывает однородное течение в горизонтальном направлении. При условии постоянства значения вектора завихренности, получается решение в виде вихря Рэнкина. Если не ограничивать рассмотрение нулевой завихренностью вне пределов ядра вихря, можно записать решение в виде модифицированного вихря Рэнкина:

$$u_r = u_z = 0$$

$$u_\varphi = A \left( \rho \theta(a - \rho) + a \left( \frac{a}{\rho} \right)^{3+\delta} \theta(\rho - a) \right)$$

$$p = p_0 + gz - \frac{\omega^2 a^2}{2} \left( \left( \frac{4+\delta}{3+\delta} - \frac{\rho^2}{a^2} \right) \theta(a - \rho) + \frac{1}{3+\delta} \left( \frac{a^2}{\rho^2} \right)^{6+2\delta} \theta(\rho - a) \right)$$

(1)

$u_r$ ,  $u_z$ ,  $u_\varphi$  – компоненты вектора скорости в цилиндрической системе координат,  $g$  – ускорение свободного падения,  $p$  – давление,  $\omega$  – угловая частота вращения

твердотельного ядра вихря,  $\theta(a - \rho)$ ,  $\theta(\rho - a)$  – единичная функция Хевисайда,  $a$  – радиус ядра твердотельной части вихря Рэнкина,  $A$  – константа.

Величину параметра  $\delta$  определить невозможно, это и определяет вырожденность решения для модифицированного вихря Рэнкина при нулевой спиральности течения. Предполагается, что этот параметр можно определить при помощи предельного перехода решения для случая ненулевой спиральности при стремлении спиральности к нулю. На рис. 1 представлено семейство форм свободной поверхности классического и модифицированного вихря Рэнкина при одинаковых радиусах внутреннего ядра и величинах завихренности (классическому вихрю Рэнкина соответствует  $\delta = -2$ ). Выяснилось, что  $\delta$  характеризует отношение глубины  $H_2$  пересечения границы ядра вихря со свободной поверхностью и глубины  $H_1$  всего вихря.

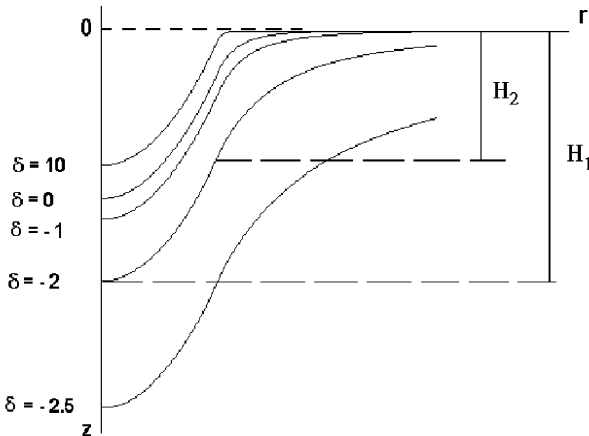


Рис. 1. Формы свободной поверхности вихря при различных значениях параметра  $\delta$ .

При рассмотрении любых физических задач, принято вводить безразмерные параметры, которые обычно определяются как отношения действующих сил. Однако в реальной гидродинамике, где силы имеют не только механическую, но и термодинамическую природу (градиенты термодинамических потенциалов или силы плавучести вследствие неравномерности температуры и концентрации), безразмерные параметры естественно представлять как отношения масштабов основных структурных элементов течения.

В идеальной жидкости это отношение  $Eu = p / \rho u^2$  – число Эйлера и традиционное число Фруда  $Fr = u^2 / gH$  (отношение характерной длины поперечной гравитационной волн  $\lambda = 2\pi u^2 / g$ , порождаемой равномерно движущимся со скоростью  $u$  источником к линейному масштабу задачи  $H$ ).

Реальная жидкость является вязкой, ее динамика описывается уравнениями Навье-Стокса с граничными условиями прилипания, которые в системе координат, связанной с обтекаемой поверхностью имеют вид

$$\rho \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} = -\frac{\partial P}{\partial z} + \rho \nu \Delta \mathbf{u} - \rho g \mathbf{e}_z, \quad \operatorname{div} \mathbf{u} = 0$$

$$\mathbf{u}|_{\Sigma} = 0 \quad (2)$$

Учет вязкости (здесь  $\nu$  – кинематическая вязкость) принципиально меняет структуру уравнений движения. В реальных условиях вязкость жидкости мала, поэтому коэффициент при старшей производной, определяющей порядок системы (2), также является малым. Решения уравнений такого типа (так называемых сингулярно возмущенных уравнений, содержащих малые коэффициенты при старших производных) существенно зависят от вязкости только в глубоко локализованных областях, тонких пограничных слоях, примыкающих к поверхности обтекаемого препятствия. Традиционно принимается, что в основной области течения вязкость приводит только к затуханию регулярных (крупномасштабных) компонент, движение которых может быть описано решением уравнений Эйлера. Точные решения уравнения (2) построены только для ряда простых геометрий.

Концепция периодического пограничного слоя впервые была сформулирована Дж.Г. Стоксом в основополагающей работе по теории вязкой жидкости [2] и развита в серии работ Л. Прандтлем [3, 4]. Масштаб периодического пограничного

течения Стокса  $\delta_\nu$  определяется кинематической вязкостью и частотой колеба-

ний  $\omega$  –  $\delta_\nu = \sqrt{2\nu/\omega}$ . С учетом вида дисперсионного соотношения

$\omega = ku$  масштаб пограничного течения Прандтля  $\delta_p = \nu/u$  на пластине,

обтекаемой равномерным потоком вязкой жидкости, и масштаб периодического

течения Стокса совпадают с точностью до постоянного множителя, что иллюстрирует общую природу этих элементов течений.

Тем не менее, в настоящее время приближение пограничного слоя обычно рассматривается как удобное упрощение при решении практических задач гидродинамики. Связь пограничных слоев с регулярными компонентами периодических течений (волнами и вихрями) в толще жидкости в полной мере не проанализирована, описание образования вихрей носит качественный характер.

В вязкой жидкости к безразмерным отношениям – числу Эйлера  $Eu = p / \rho u^2$  и числу Фруда  $Fr = u^2 / gH$ , добавляется число Рейнольдса –

$Re = uL / \nu$ , – отношение характерного масштаба задачи  $L$ , характеризующего геометрию обтекаемого препятствия или потока в целом, к толщине пограничного слоя Прандтля.  $\delta_p = \nu / u$

Подход Рейнольдса связан с классификацией течений по значениям числа  $Re = uL / \nu$ . При этом малые числа  $Re$  соответствуют ламинарным течениям, а большие (константа перехода зависит от геометрии и внешних возмущений) – турбулентным, в которых всегда присутствуют ламинарные компоненты (вязкий подслои на обтекаемом препятствии или вязкое ядро вихря).

Множество исследований вихревого течения связано с расчетом поведения жидкости в замкнутом цилиндрическом контейнере, одно из оснований которого вращается, приводя жидкость в вихревое движение. В работе [5] найдено обобщенное решение Кармана для профиля скоростей вблизи диска:

$$u_r = \alpha r (\omega - \beta) \left( \frac{z}{\delta} \right)^{\frac{1}{7}} \left( 1 - \frac{z}{\delta} \right)$$

$$u_r = r (\omega - \beta) \left[ 1 - \left( \frac{z}{\delta} \right)^{\frac{1}{7}} \right] + r \beta \quad (3)$$

где  $\delta$  – толщина пограничного слоя,  $\beta$  – некоторая угловая скорость, с которой вращается «твердотельная» прослойка между двумя пограничными слоями.

В работе [6] исследуются особенности вихревых течений в вертикальном цилиндрическом контейнере, один из торцов которого вращается, приводя в движение жидкость. Имеются фотографии, на которых отражаются изменения, которые претерпевает течение при возрастании отношения высоты контейнера к радиусу и при увеличении числа Рейнольдса. Выяснилось, что существует неоднозначная зависимость между управляющими параметрами (числом Рейнольдса и отношением высоты цилиндра к радиусу) и параметрами потока. Вместо регулярного вихря мы видим возникновение на оси потока дополнительных вихревых структур, т.н. «вихревых пузырьков». В условиях лабораторного эксперимента отмечено появ-

ление одного, двух и трех «пузырьков», число которых зависит не только от параметров потока, но и от предшествующего состояния системы. При изменении числа Рейнольдса, наблюдается наличие некоторого гистерезиса, определяющего количество «пузырьков» на оси контейнера и время их появления.

Численный расчет поведения вышеописанного вихря проведен в [7]. Отмечено важное свойство «вихревых пузырьков» – их способность сохранять свойства попавшей в них жидкости, т.е. не происходит смешивания жидкостей изнутри и снаружи вихря. Следовательно, такие вихревые структуры могут служить жидкими контейнерами, сохраняющими свойства попавшей в них жидкости. Результаты численного моделирования, сравнивались с экспериментальными данными в [8]. Другому аспекту проблемы посвящена работа [9]. Авторы исследовали численными методами потерю осевой симметрии в подобном потоке. В потоке, при росте числа Рейнольдса до определенной величины, появляются два различных возможных состояния, которые характеризуются неустойчивостью по отношению к трехмерным возмущениям.

В некоторых работах приведены результаты экспериментов с вращающимися жидкостями, и даны основы математического описания таких систем (круговых колец с осевой симметрией) [10-12]. В других исследованиях обобщаются достижения в области исследований вихревых структур и предлагаются новые подходы к решению ряда конкретных задач с циркуляционным и винтовым течением вязких жидкостей [13].

Систематическое изложение основных положений механики винтовых и циркуляционных течений дается в монографии [14]. Обзор точных решений уравнений Навье – Стокса, представляющих винтовые течения, дан в [15, 16]. В последнее время успешно развиваются численные методы решения задач вихреобразования в вязкой жидкости. Общие подходы к решению подобных задач в различной постановке даны в [17].

Несмотря на обилие теоретических и эмпирических гипотез, до сих пор не выработано единого подхода к решению проблем вихревых течений в жидкости. Возможность производить достаточно точные численные расчеты не компенсирует отсутствия всеобъемлющей теории, которая бы освещала все аспекты поведения жидкости в задаваемых условиях и удовлетворяла бы наибольшему разнообразию возникающих задач. Все имеющиеся на данный момент теории не описывают с достаточной точностью поведение жидкости, а после упрощения исходных уравнений зачастую получается решение, плохо согласующееся с реальной картиной течения. Крупномасштабные вихревые течения всегда сопровождаются появлением пограничных слоев на твердых поверхностях, изучение которых затруднено.

Постановка задачи.

Наибольшие возможности для исследования пограничных слоев предоставляются вблизи свободной поверхности жидкости. Изучение геометрических характеристик свободной поверхности представляет самостоятельный интерес, поскольку ее форма отражает распределение давления, а следовательно и реальное распределение скоростей течения. Исследованию течений с кручением в контейнере со свободной поверхностью внимания не уделялось. С целью исследования данного типа течений создана универсальная экспериментальная установка, которая позволяет удовлетворять различные требования к условиям эксперимента и варьировать большое число значимых параметров.

В Лаборатории механики жидкости ИПМ РАН начато проведение экспериментальных исследований жидкости, вращающейся в цилиндрическом сосуде. Проведение данных работ вызвано необходимостью получения экспериментальных данных, которые можно было бы сравнивать с существующими теориями. Помимо этого, предпринимаются попытки визуализировать тонкую структуру вихря и выделить такие структуры как спиральные волны на поверхности воронки и пограничные слои в толще жидкости.

### **Экспериментальная установка.**

Для изучения особенностей взаимодействия вихря со свободной поверхностью была сконструирована экспериментальная установка. В состав установки входят: прямоугольный бассейн с каркасом, внутри которого размещается цилиндрическая обечайка.

Цилиндрическая обечайка служит для придания осевой симметрии области генерации вихря. Она выполнена из полиметилметакрилата толщиной 4 мм и высотой 800 мм и внешним диаметром 300 мм. Параллельно оси трубы на стенке закреплены короткие нити с шагом 1 см и нанесена измерительная шкала шаг 5 мм.

В цилиндрической обечайке жидкость со свободной поверхностью приводится в движение с помощью индуктора – дисков различного диаметра, вращающихся вблизи дна контейнера (скорость вращения от 0 до 3000 об/мин).

Для данной установки была изготовлена серия сменных индукторов диаметрами 5, 10, 20, 25 и 28 см. Были изготовлены гладкие (одна сторона содержит крепежную шайбу для фиксации индуктора на вале электродвигателя другая гладкая) и оребренные (одна сторона содержит крепежную шайбу на другой закреплены три горизонтальных ребра расположенных под углом 120 градусов друг к другу относительно центра) диски.

Для удобства визуализации обечайка заключена в прозрачный бассейн. Внешние размеры бассейна 700×590×410 мм. Стенки изготовлены из полиметилметакрилата (органического стекла) толщиной 18 мм. Стекло склеено производственным способом специальным полимером, позволяющим достичь полной герметизации швов. Кромка бассейна охвачена обтяжной рамой из стального уголка для увеличения жесткости конструкции (размеры 1445×663×475 мм).

### **Экспериментальное исследование вихревого возмущения свободной поверхности жидкости.**

В ходе экспериментов обнаружилось, что при закручивании жидкости возникают два крупномасштабных вихревых движения (тороидальное вихревое движение и движение с вертикальной осью), охватывающие всю жидкость и вызывающие возмущение свободной поверхности в виде воронки, а также более мелкомасштабные возмущения, локализованные вблизи свободной поверхности жидкости. По форме и масштабу они могут быть разделены на мелкомасштабные спиральные волны и более крупномасштабные (инерциальные волны).

Для этих структур, усложняющих форму свободной поверхности, пока еще не создано адекватного теоретического описания. Природа появления и закономерности развития таких объектов на поверхности воронки остается до конца не изученной и это, в основном, определяет научный интерес к данной задаче. На рис. 2

приведена характерная форма свободной поверхности жидкости наблюдаемая в эксперименте. Метод визуализации позволяет разрешать и инерциальные и спиральные волны, но метод обработки изображений оставляет в рассмотрении только более крупные структуры (инерциальные волны), которые четко видны на рис. 2б.

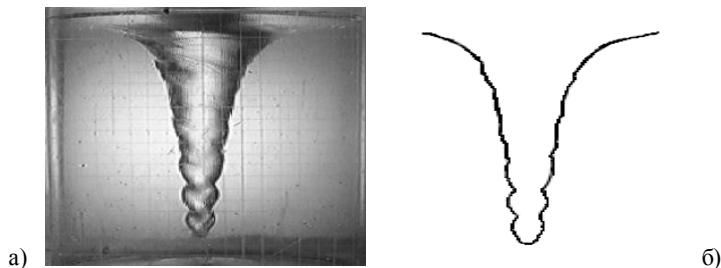


Рис. 2. Фотография воронки и представление ее формы (диаметр обечайки 200 мм, диаметр дика 76 мм, глубина жидкости 250 мм, глубина воронки 200 мм).

Проведено качественное сравнение формы воронок, полученных в ходе экспериментов, с теоретически рассчитанной формой свободной поверхности идеальной жидкости. Выявлено присутствие скрытого параметра, т.к. при различных условиях эксперимента меняется показатель отклонения формы экспериментальной формы воронок от идеальной.

После съемки лабораторного эксперимента на видеокамеру, данные передавались в компьютер, где из видеозаписи выбирались кадры, на которых наиболее четко видна форма поверхности жидкости со всеми крупно- и мелкомасштабными особенностями. На поверхности жидкости присутствуют также спиральные волны, но применяемого метода визуализации недостаточно для разрешения их пространственной структуры.

Анализируемые профили воронок представляются в виде функции  $y = f(x)$ , где  $x$  – расстояние от оси вращения диска (расстояние от центра воронки),  $y$  – высота точки над центром воронки.

В рамках используемой нами теоретической модели, было сделано предположение о существовании зоны «твердотельного» вращения закручиваемой жидкости вблизи центра бассейна. Центральная часть воронки, следуя теории вихря Рэнкина и теории, [1], должна иметь параболическую форму. Для проверки соответствия данного предположения экспериментальным данным было проведено сравнение профиля воронки вблизи от оси вращения с параболической формой. Критерием оценки размеров «твердотельной» зоны вращения жидкости служит произ-

водная функции  $y = f(x)$ , т.к. в точке перехода между «твердотельной» и «инерционной» зонами вращающейся жидкости изменяется знак кривизны поверхности воронки. Для каждого профиля поверхности жидкости коэффициент в функции  $y = kx^2$  подбирался с помощью метода наименьших квадратов.



После нахождения коэффициента, соответствующего форме данной воронки, проводилось планиметрирование профиля воронки, в той части, где вращение можно считать «твердотельным». В результате данной процедуры становится возможным оценить периодичность проявляющихся на поверхности возмущений. Эти крупномасштабные возмущения мы называем инерциальными волнами.

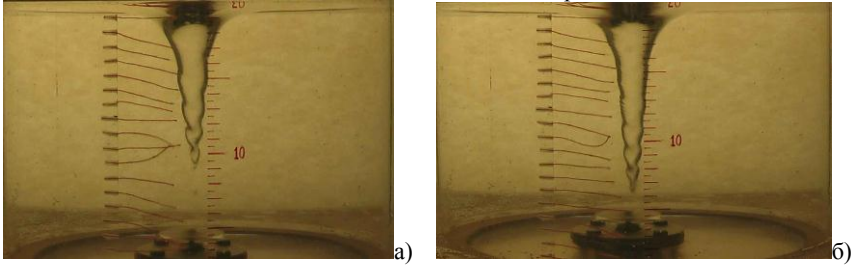
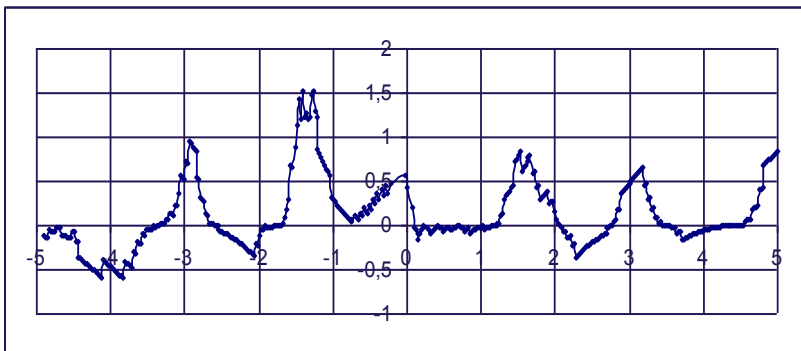


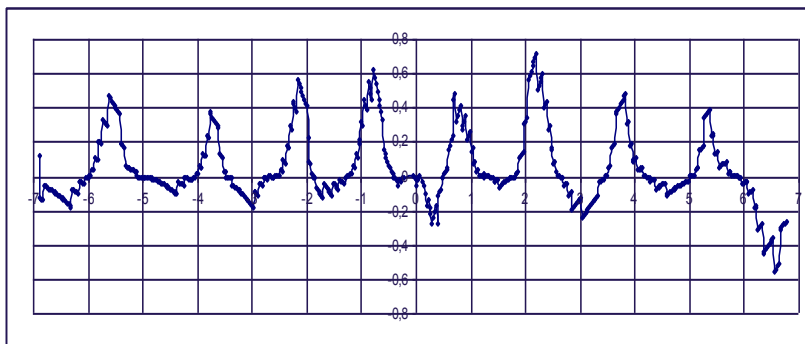
Рис.3. Фотографии экспериментальных форм поверхности жидкости (диаметр рабочей области 284 мм, высота столба жидкости 200 мм; а), б) диаметр диска-активатора 50 мм, высота диагонального ребра 1 мм; глубина воронки а) 1050 мм; б) 1350 мм).

Пока не выявлена закономерность появления этих возмущений на поверхности жидкости. Отмечено только то, что при малых угловых скоростях вращения и малых глубинах воронки, форма ее гладкая, без крупномасштабных особенностей. При увеличении угловой частоты вращения диска-активатора наряду с углублением воронки становятся видны инерциальные волны на поверхности. С дальнейшим углублением воронки, количество видимых периодов инерциальных волн и их амплитуда увеличиваются. На рис.3 а, б приведены две фотографии форм поверхности жидкости, полученные в эксперименте.

Для формы поверхности жидкости с рисунка 3 были построены аппроксимирующие твердотельную часть вихревого возмущения параболы. В результате вычитания параболической функции из функции  $y=f(x)$ , описывающей экспериментально полученную форму поверхности жидкости, построены зависимости отклонения формы воронки от параболической, приведенные на рис.4 а, б.



а)



б)

Рис.4. Примеры планиметрирования кривых, представляющих собой форму поверхности жидкости. Единицы измерения по обеим осям на обоих графиках – сантиметры. Нулевое значение по оси  $x$  – самая глубокая точка возмущенной поверхности жидкости. Кривая на графике а) соответствует фотографии на рис.3 а), кривая на графике б) – рис.3 б).

На графиках рис.4 четко прослеживается периодичность возникающего возмущения формы поверхности воронки. На рис.4 (а) он приблизительно равен 1,53 см, а на рис.4 (б) – 1,60 см. И, как следует из приведенных графиков, период возмущения практически одинаков по всей рассматриваемой зоне «твердотельного» движения жидкости.

Помимо инерциальных волн на поверхности существуют еще и спиральные волны. Их амплитуда намного меньше, чем у инерциальных волн, поэтому их характеристики сложно отследить экспериментально.

В проведенных экспериментах форма воронки отражает распределение давления в жидкости. Поверхность жидкости можно считать изобарой с давлением, равным атмосферному. В экспериментах [18] проводились измерения донного давления в закрытой вихревой камере, где поток закручивался с помощью тангенциального подвода жидкости с боковых стенок из четырех наборов сопел и отвода через центральное отверстие в верхней крышке. Несмотря на различия в геометрии течений, внутренняя вихревая структура в обоих случаях является подобной (спиральный поток в камере с тороидальным вихрем), что обеспечивает подобие распределения давления.

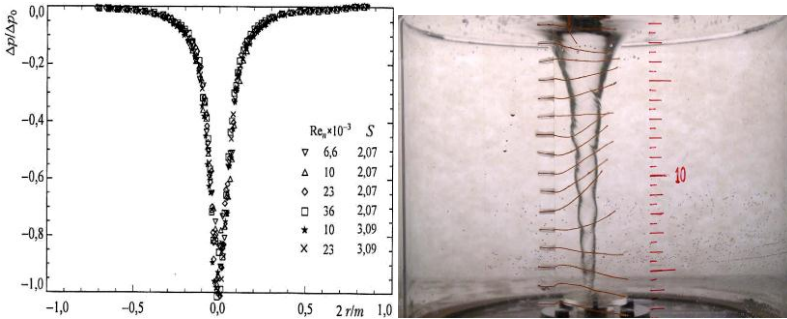


Рис. 5. а) Обобщенные профили донного давления для различных значений  $Re$  и угла поворота сопел. Разность между давлением на оси вихря и давлением около стенки камеры, разность между давлением в текущей точке и давлением около стенки камеры; б) фотография экспериментальной воронки (диаметр рабочей области 292 мм, высота столба жидкости 200 мм, диаметр диска-активатора 50 мм, высота диагонального ребра 4 мм, глубина воронки 200 мм).

В качестве иллюстрации на рис. 5 а) приведен универсальный профиль донного давления из работы [18]. Измерения проводились датчиком давления по всей поверхности дна вихревой камеры при различных условиях эксперимента (варьировались значения числа Рейнольдса  $Re$  и угол поворота сопел). В обобщенных

координатах  $(2r/m; \Delta p/\Delta p_0)$ , данные различных опытов отличающихся параметром крутки и скоростью течения ложатся на универсальную кривую, форма которой совпадает с осредненным контуром поверхности жидкости в проведенных опытах (диаметр рабочей области 292 мм, высота столба жидкости 200 мм, диаметр диска-активатора 50 мм, высота диагонального ребра 4 мм, глубина воронки 200 мм). Из сравнения рис. 5 а) и б) следует, что структурное сходство профилей давления и контура воронки отражает подобие в вихревых структурах течения, а различия в тонких деталях – особенности динамики и положения пограничных слоев. Прохождение аналогов неоднородностей рельефа над датчиком давления воспринимается как свидетельство турбулентного характера движения, которое на самом деле может иметь упорядоченную внутреннюю структуру.

В связи с тем, что теоретические исследования формы свободной поверхности проводились только для идеальной безграничной жидкости, при рассмотрении данной задачи полученные решения можно применять только для качественного сравнения. Для количественного сопоставления с экспериментальными данными нужно решить другую теоретическую задачу.

### Выводы.

Проведенные эксперименты показали, что существует несколько различных типов возмущения свободной поверхности жидкости.

Воронка, наблюдаемая в эксперименте, не имеет гладкой поверхности. Поверхность жидкости имеет сложную структуру с различными уровнями масштабов.

На возмущенной свободной поверхности существует тонкая структура, появление которой обусловлено различными типами волн. Эти возмущения поверхности нарушают аксиальную симметрию потока.

Авторы считают приятным долгом выразить благодарность профессору Ю.Д. Чашечкину за постановку проблемы и постоянное внимание к работе, а профессору К.В. Показееву за внимание к работе и обсуждение результатов работы.

### Список литературы:

1. Кистович А.В., Чашечкин Ю.Д. Вихревые и спиральные структуры в однородной идеальной жидкости. Препринт № 627 ИПМ РАН. 1998. 46 с.
2. Stokes, G.G., On the effect of the Internal Friction of Fluids on the Motion of Pendulums. *Mathematical and Physical Papers*. 1901. V. III. Cambridge. P. 1 – 141. Cambridge. At the University Press.
3. Прандтль Л. Гидроаэромеханика. М. ИИЛ. 1949. 520 с.
4. Д.Н. Горелов Методы решения плоских краевых задач теории крыла. Новосибирск: издательство Сибирского отделения РАН. 2000. 215 с.
5. Дорфман Л.А. Вращение и теплоотдача тела в жидкости. Гос. изд. физ.-мат. лит. 1960. 348 с.
6. Escudier M.P. Observations of the flow produced in a cylindrical container by a rotating endwall. *Experiments in fluids* 2.1984. pp. 189-196.
7. Lugt H.J., Abboud M. Axisymmetric vortex breakdown with and without temperature effects in a container with a rotating lid. *J. of fluid mech.*1987. Vol. 179, pp. 179-200.
8. Stevens J.L., Lopez J.M., Cantwell B.J. Oscillatory flow states in an enclosed cylinder with a rotating endwall. 1999. Vol. 389, pp. 101-118.
9. Blackburn H.M., Lopez J.M. Modulated rotating waves in an enclosed swirling flow. *J. Fluid Mech.*, vol. 465, pp. 33–58.
10. Гринспен Х. Теория вращающихся жидкостей. Л.: Гидрометеиздат, 1975, 364 с.
11. Ламб Г. Гидродинамика. М.; Л.: Гостехтеориздат, 1947, 928 с.
12. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя. М.: Наука. 1969, 744 с.
13. Уинделл Ш. Структура и динамика вихревых нитей // Вихревые движения жидкости. М.: Мир. 1979, С.126 – 159.
14. Саффмен Ф. Динамика завихренности // Современная гидродинамика. Успехи и проблемы. М.: Мир. 1984, С.77 – 90.
15. Wang C.Y. Exact solutions of the Navier-Stokes equations – the generalized Beltrami flows, review and extension // *Acta mech.* 1990. V.81. №1 – 2. P.69 – 74.
16. Wang C.Y. Exact solutions of the steady-state Navier-Stokes equations // *Annu. Rev. Fluid Mech.* 1991. V.23. P.159 – 177.
17. Салтанов Н.В., Горбань В.А. Вихревые структуры в жидкости: аналитические и численные решения. К.: Наукова думка. 1992. 244 с.
18. Алексеенко С.В., Куйбин П.А., Окулов В.Л. Введение в теорию концентрированных вихрей. Институт теплофизики им. С.С.Кутателадзе. Новосибирск. 2003. 504 с.

## ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ДИССИПАТИВНЫХ И НЕЛИНЕЙНЫХ ФАКТОРОВ В СТРАТИФИЦИРОВАННОМ ПОГРАНИЧНОМ СЛОЕ ОКОЛО ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ ПЛАСТИНКИ

М.П. Васильев

*Физический факультета МГУ им М.В. Ломоносова*

В теории стратифицированных течений на процессы переноса энергии и вещества, динамику волн, формирование и эволюцию вихревых движений значительное влияние оказывает тонкая структура полей плотности и солёности. Ее формирование часто ассоциируется с процессами, происходящими вблизи поверхностей обтекаемых тел, т.е. с пограничным слоем, впервые введенным для описания течений однородной жидкости Л. Прандтлем. Задачи динамики пограничного слоя в неоднородных жидкостях рассмотрены в известной книге [1], в том числе и задача обтекания плоской пластины нагретой пластины с учетом эффектов температуропроводности. Решения уравнений пограничного слоя искались в автомодельном виде, причем действие сил плавучести внутри слоя практически пренебрегалось.

Учет сил плавучести был выполнен в работе [2] для случая малых чисел Рейнольдса с отбрасыванием нелинейных членов в уравнениях движения. Теоретически и экспериментально изучено существование вязкой волны, возникающей при горизонтальном движении тела в стратифицированной жидкости. Были получены инвариантные решения верные для течения за препятствием и продемонстрировано, что скоростные возмущения в зависимости от горизонтальной координаты, отмеряемой вверх по течению от препятствия, уменьшаются алгебраически ( $x^{-3/4}$ ). Это решение описывает «блокировку» потока перед телом.

В работах [3, 4] был изучен пограничный слой на плоской пластине движущейся медленно и горизонтально. Результаты показывают, что толщина пограничного слоя уменьшается в направлении вниз по потоку. Была также теоретически описана структура течения, путем решения уравнений движения в которых пренебрегались адвективные члены и плотностная диффузия. Показано, что при учете плотностной диффузии, диффузионный пограничный слой растет в направлении вниз по течению, только в случае однородного потока.

Классификация режимов течений в стратифицированном стационарном пограничном слое на горизонтальной пластине для больших чисел Рейнольдса выполнена в [5]. Изучено влияние сил плавучести на динамику скоростного пограничного слоя. Структура пограничного слоя исследовалась для жидкости с большими числами Прандтля, плотностной диффузией пренебрегалось. Анализ, основанный на автомодельных решениях, показал наличие трех различных режимов течения, в зависимости от относительных значений чисел Рейнольдса и Рассела. Было продемонстрировано, что сшивание пограничного слоя и внешнего потока играет важную роль в определении свойств всего потока.

Указанные режимы определяются следующим образом:

$$Ru < O(1),$$

$$O(1) \leq Ru < O(\sqrt{R_L}),$$

$$Ru > O(\sqrt{R_L}),$$

$Ru$  – число Рассела и  $R_L$  – число Рейнольдса.

В первом случае внутренний поток описывается решением Шлихтинга для пограничного слоя, а внешний является потенциальным. Во втором случае, первичный пограничный слой также описывается решением Шлихтинга, но существует промежуточная область, в которой поток, вызванный эффектом смещения пограничного слоя, подгоняется под параллельный внешний поток. В последнем, третьем случае, эффект блокировки оказывается существенным уже на внутри пограничного слоя.

Учету эффектов диффузии посвящена работа [6]. Показано, что диффузия плотности увеличивает роль сил плавучести и является причиной изменений свойств пограничного слоя. Эффекты плавучести и диффузии изучены путем численного решения результирующих уравнений.

Совместный эффект термической стратификации и плавучести на пограничный слой наиболее велик, при условии нагретой стенке и малых чисел Прандтля, так как они определяют вертикальную шкалу на которой действуют силы плавучести. Стратификация может, как увеличивать, так и уменьшать разделение в зависимости от разницы температуры между границей и свободным потоком и от значения числа Фруда.

Диффузия имеет значительный эффект в том, что служит для определения важности плавучести при сшивании скоростных и температурных полей. Это особенно важно при малых числах Рассела, что означает, что диффузия может значительно изменить структуру пограничного слоя. Более того, поскольку диффузионный пограничный слой всегда растет от переднего края, волна момента по течению, возникающая в результате вариации плотности, должна существовать даже в случае, когда вязкостный пограничный слой растет в направлении против течения.

В данной работе на систематической основе изучаются течения в стратифицированном пограничном слое около горизонтальной пластины с учетом эффектов вязкости, диффузии, плавучести и нелинейности. Поскольку одним из основных инструментов анализа подобных течений являются автомодельные решения – частный случай инвариантных решений физический анализ задачи предваряет групповая классификация уравнений движения, причем наряду с результатами классического группового анализа найдены приближенные симметрии уравнений,

значительно расширяющие возможности теории возмущений (поиск приближенно инвариантных решений).

Уравнения стратифицированного пограничного слоя имеют вид

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} &= \nu \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} - g S \sin \alpha \\ \frac{\partial S}{\partial t} + u \frac{\partial S}{\partial x} + v \frac{\partial S}{\partial y} &= \kappa \frac{\partial^2 S}{\partial y^2} + (u \sin \alpha + v \cos \alpha) / \Lambda \\ \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} &= 0 \end{aligned} \quad (1)$$

где  $u$  и  $v$  – продольная и поперечная к плоскости компоненты скорости,  $S$  – соленость, ось  $x$  направлена вдоль направления движения плоскости, а ось  $y$  – нормальна к ней,  $g$  – ускорение свободного падения,  $\alpha$  – угол наклона плоскости к горизонту,  $\nu$  и  $\kappa$  – коэффициенты кинематической вязкости и диффузии соли,  $\Lambda$  – масштаб стратификации.

Группы симметрий уравнений стратифицированного пограничного слоя. Группа симметрии уравнений стратифицированного пограничного слоя зависит от значения угла наклона тела к горизонту. В общем случае ( $\alpha \neq 0$ ,  $\alpha \neq \pi/2$ ) она

состоит из группы временных сдвигов  $X_1 = \partial_t$ ; группы сдвигов солености и связанных с ними сдвигов давления  $X_2 = \partial_S - g x \sin \alpha \partial_P$ ; группы растяжения

$$X_3 = 2t \partial_t + 5x \partial_x + y \partial_y + 3u \partial_u - v \partial_v + \left( S + \frac{4x \sin \alpha}{\Lambda} \right) \partial_S + 2 \left( 3P - \frac{g}{\Lambda} x^2 \sin^2 \alpha \right) \partial_P$$

и трех бесконечномерных групп сдвигов давления  $X_\pi = \pi(t) \partial_P$ ; группы перехода в движущуюся вдоль осей  $x$  и  $y$  систему координат

$$X_\chi = \chi(t) \partial_x + \chi_t \partial_u + \frac{\sin \alpha}{\Lambda} \chi \partial_S - \left( \chi_{tt} x + \chi \frac{g}{\Lambda} x \sin^2 \alpha \right) \partial_P$$

и

$$X_\eta = \eta(t, x) \partial_y + (\eta_t + \eta_x u) \partial_v + \frac{\cos \alpha}{\Lambda} \eta \partial_S - \frac{g}{2\Lambda} \sin 2\alpha \int \eta dx \partial_P$$

Она во многом похожа на группу симметрии уравнений несжимаемой стратифицированной жидкости, однако в ней, как и в случае однородной жидкости, от-

существуют группы вращения. Эта анизотропия заранее навязана неравноправием осей  $x$  и  $y$ , следующим из условий построения модели. Однако, если несжимаемость вместе с условием баротропности приводят к установлению эквивалентности всех систем координат, движущихся поступательно с произвольным ускорением (§ 3.1), то пренебрежение поперечной компонентой скорости в одном из уравнений движения расширяет класс таких систем. В поперечном направлении эквивалентными оказываются также и системы координат движущиеся и с вращением, и с деформацией. Преобразование поперечной компоненты скорости при этом бу-

дет определяться конвективным переносом закона движения  $\eta(t, x)$  вдоль тангенциальной компоненты скорости. Непосредственные вычисления показывают, что таким же свойством обладают и уравнения пограничного слоя в однородной жидкости. Обычно указывается на зависимость закона движения только от времени [6], и генератор  $X_\eta$  приводится в виде  $X_\eta = \eta(t)\partial_y + \eta_t\partial_v$ .

Перейдем к рассмотрению частного случая, то есть когда угол  $\alpha = 0^\circ$ , при переходе к полной солености  $\tilde{S} = S - y/\Lambda$  выше написанная система приобретает следующий вид

$$\begin{aligned} u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} &= v \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \\ u \frac{\partial S}{\partial x} + v \frac{\partial S}{\partial y} &= \kappa \frac{\partial^2 S}{\partial y^2} \\ \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} &= 0 \end{aligned} \quad (2)$$

Знак тильда здесь далее опускается.

Базис генераторов группы растяжений для полученной системы имеет вид

$$X_1 = x \frac{\partial}{\partial x} + u \frac{\partial}{\partial u}, \quad X_2 = y \frac{\partial}{\partial y} - 2u \frac{\partial}{\partial u} - v \frac{\partial}{\partial v}, \quad X_3 = S \frac{\partial}{\partial S}. \quad (3)$$

Тогда любой другой генератор группы автомодельных преобразований можно представить в виде линейной комбинации генераторов базиса (3), то есть:

$X = l X_1 + m X_2 + n X_3$ , где  $l$ ,  $m$  и  $n$  произвольные константы.

Уравнение пограничного слоя с использованием функции тока, которая определяется как

$$u = \frac{\partial \Psi}{\partial y}, \quad v = - \frac{\partial \Psi}{\partial x} \quad (4)$$

будет выглядеть следующим образом:



$$\left[ L(x, y, \Psi) - \frac{1}{R_L} \nabla^2 \right] \nabla^2 \Psi + Ru^2 \Psi_x = 0,$$

$$L(x, y, \Psi) = \Psi_y \frac{\partial}{\partial x} - \Psi_x \frac{\partial}{\partial y} \quad (5)$$

Рассмотрим область расположенную близко к горизонтальной поверхности пластины, то есть такую, что вертикальная шкала этой области мала по сравнению с горизонтальной. И тогда можно провести следующие преобразования:

$$\tilde{y} = y/\varepsilon, \quad \varepsilon = \varepsilon(R_L, Ru) \ll 1$$

$$\Psi(x, y) = \varepsilon \tilde{\Psi}(x, \tilde{y}) \quad (6)$$

Далее для простоты опустим тильда обозначения и запишем уравнение в новых переменных:

$$\left[ L(x, y, \Psi) - \frac{\varepsilon^{-2}}{R_L} \left( \varepsilon^2 \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \right) \right] \left( \varepsilon^2 \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \right) \Psi + \varepsilon^2 Ru^2 \Psi_x = 0 \quad (7)$$

При рассмотрении числа Рассела  $Ru = Ru_\varepsilon / \sqrt{\varepsilon}$  и числа Рейнольдса  $R_L = R_{L,\varepsilon} / \varepsilon^2$  полученное уравнение примет следующий вид:

$$\Psi_y \Psi_{yyy} - \Psi_x \Psi_{yyy} - \frac{1}{R_{L,\varepsilon}} \Psi_{yyyy} + Ru_\varepsilon^2 \Psi_x + \varepsilon^2 \left\{ \Psi_y \Psi_{xxx} - \Psi_x \Psi_{xyy} - \frac{2}{R_L} \Psi_{xyy} \right\} - \frac{\varepsilon^4}{R_L} \Psi_{xxxx} = 0 \quad (8)$$

Поиск инвариантных решений, учитывающих эффекты плавучести и при условии постоянного внешнего потока, возможно, проводить, только с использованием приближенных групп. В результате получены следующие генераторы с точностью до первого порядка по  $\varepsilon$ :

$$\begin{aligned}
 X_1 &= \frac{\partial}{\partial x} & X_6 &= \varepsilon \eta(x) \frac{\partial}{\partial y} \\
 X_2 &= \frac{\partial}{\partial y} & X_7 &= \varepsilon \frac{\partial}{\partial \psi} \\
 X_3 &= \frac{\partial}{\partial \psi} & X_8 &= \varepsilon \left( x \frac{\partial}{\partial x} + \psi \frac{\partial}{\partial \psi} \right) \\
 X_4 &= 4x \frac{\partial}{\partial x} + y \frac{\partial}{\partial y} + 3\psi \frac{\partial}{\partial \psi} & X_9 &= \varepsilon \left( y \frac{\partial}{\partial y} - \psi \frac{\partial}{\partial \psi} \right) \\
 X_5 &= \varepsilon \frac{\partial}{\partial x} & & (10)
 \end{aligned}$$

(9)

Для построения такого решения из списка генераторов (9), (10) необходимо выбрать такую комбинацию, чтобы после построения редуцирующей замены граничные условия были удовлетворены в рамках новых зависимых и независимых переменных. Чтобы построить такую замену переменных для системы (8) с условием постоянного потока на бесконечности рассмотрим комбинацию  $X = a X_8 + b X_9$ . Требуемое условие выполняется при связи  $a = 2b$ , тогда получаем

$$X = \varepsilon b \left( 2x \frac{\partial}{\partial x} + y \frac{\partial}{\partial y} + \psi \frac{\partial}{\partial \psi} \right) \quad (11)$$

Соответствующие инвариантные решения для полученного генератора аналогичны случаю рассматриваемому в работе [1], однако здесь учитывается влияние плавучести.

Рассмотрим краевые задачи двух типов. Одна из них характерна для задач о распространении тепла вызванная разностью температур в нуле и на бесконечности, а другая типична для динамики стратифицированных течений, когда границы тел являются непроницаемыми для диффузионных потоков примеси, а на бесконечности возмущения, вызванные движущимся телом, затухают, и распределение солености становится близким к исходной стратификации.

Задача об источнике.

Краевая задача без учета стратификации в граничных условиях

$$u = v = 0, \quad s = S_0, \quad y = 0$$

$$u = U_\infty, \quad s = S_\infty, \quad y \rightarrow \infty$$

(12)

Решение краевой задачи первого рода будем искать в виде решения инвариантного относительно группы растяжения. Ее генератор выражается через генераторы базиса (3)

$$X = 2 * X_1 + 1 * X_2 + 0 * X_3 = 2x \frac{\partial}{\partial x} + y \frac{\partial}{\partial y} - v \frac{\partial}{\partial v} \quad (13)$$

Условие инвариантности позволяет перейти к автомодельным переменным, которые с учетом обезразмеривания запишутся как

$$z = y \sqrt{\frac{U_\infty}{v x}}, \quad u = U_\infty f', \quad v = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{U_\infty}{v x}} (z f' - f),$$

$$\Psi = \sqrt{v x U_\infty} f(z), \quad S = \sigma(z), \quad (14)$$

где функция  $f$  является решением дифференциального уравнения:

$$2f''' + f f'' = 0$$

$$f = 0, \quad f' = 0 \quad z = 0$$

$$f \rightarrow z \quad z \rightarrow \infty \quad (15)$$

Уравнение (15) решается методом сращиваемых асимптотических разложений. Решение для малых  $z$  ищем в виде разложения функции  $f$  в степенной ряд, а для больших  $z$  в виде асимптотического ряда. Тогда с учетом граничных условий для  $f$  имеем однопараметрическое представление

$$f^{(0)} = \sum_{n=0}^{\infty} \left(-\frac{1}{2}\right)^n \frac{\alpha^{n+1} C_n}{(3n+1)!} z^{3n+2} \quad (16)$$

где  $\alpha$  – свободный параметр.

Подстановка (16) в уравнение (15) приводит к рекуррентным соотношениям для коэффициентов разложения  $C_n$

$$C_n = (3n-1)! \sum_{m=0}^{n-1} \frac{C_{n-m-1} C_m}{(3(n-m-1))! (3m+2)!} \quad (17)$$

где  $C_0 = C_1 = 1$ ,  $C_2 := 11$ ,  $C_3 := 375$ ,  $C_4 := 27897$ ,  
 $C_5 := 3817137$ ,  $C_6 := 865874115$ ,  $C_7 := 303083960103$

$$C_8 := 155172279680289$$

Последовательная процедура определения членов асимптотического ряда для  $f$  на бесконечности ( $f = f_1 + f_2 + \dots$ ) с точностью до членов второго порядка малости дает однопараметрическое представление вида

$$f^{(\infty)} = z + \gamma^* \int_{\infty}^z \int_{\infty}^z \exp\left(-\frac{z^2}{4}\right) dz = z + \gamma \operatorname{ierfc}(z/2) \quad , \quad (18)$$

где  $\gamma = 2\sqrt{\pi} \gamma^*$  – свободный параметр,  $\operatorname{ierfc}(z)$  – первый интеграл от дополнительного интеграла вероятности.

Воспользуемся свободными параметрами в асимптотических выражениях  $f^{(0)}$  и  $f^{(\infty)}$  для того, чтобы построить решение во всем диапазоне изменения независимой переменной. Для этого в некоторой промежуточной точке  $z^*$  будем так выбирать значения параметров, чтобы они обеспечивали непрерывность функции  $f$  и ее первой производной при переходе от решения в “нуле” к решению на “бесконечности”. Для выбора наиболее устойчивых значений параметров  $\alpha$  и  $\gamma$  при сращивании варьировалось число членов ряда (16), менялось положение точки сращивания. Оказалось, что точность вычисления  $f^{(0)}$  не сильно влияет на значение  $\alpha$  и  $\gamma$ . При выборе положения точки сращивания в качестве критерия использовался  $R = \alpha'^2_{z^*} + \gamma'^2_{z^*}$ , значение которого в  $z^*$  должно было быть минимальным.

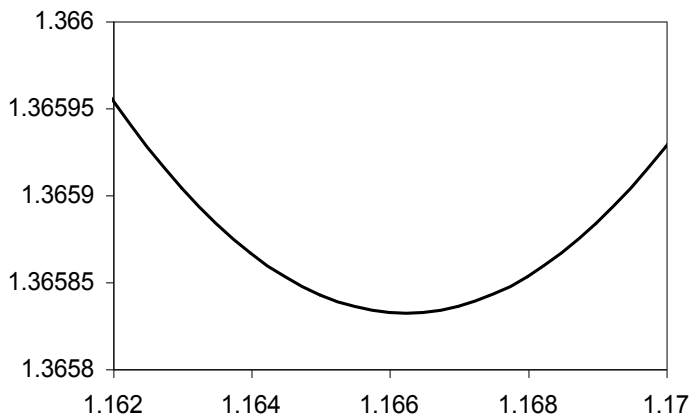
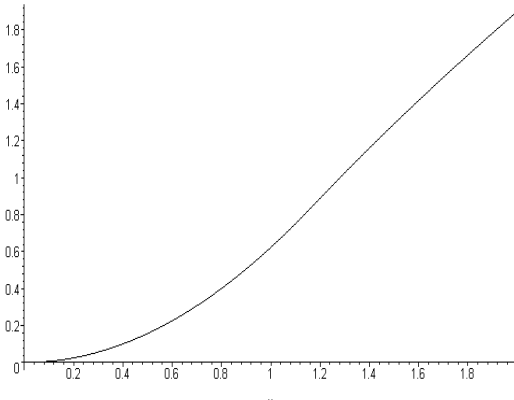


Рис. 1. Зависимость  $R$  от  $z^*$ .

Таким образом, оказывается, что  $z^* \approx 1.167$ . На Рис. 2 приведена зависимость  $f$  от  $z$ .



Уравнение для переноса солености и граничные условия после замены (6) примут вид

$$\sigma'' + A f \sigma' = 0,$$

$$\sigma = S_0, \quad z = 0,$$

$$\sigma = S_\infty, \quad z \rightarrow \infty, \quad (19)$$

где  $A = v/2\kappa$ .

Решением краевой задачи (19) является функция

Рис. 2. График функции  $f$  после сшивания

$$\sigma = S_0 + \frac{S_\infty - S_0}{I} \int_0^z \exp\left(-A \int_0^z f dz\right) dz, \quad (20)$$

$$I = \int_0^\infty \exp\left(-A \int_0^z f dz\right) dz$$

где

Асимптотическое выражение при больших  $z$  для (20) дает

$$\sigma = S_\infty + C \operatorname{erfc}\left(\sqrt{\frac{A}{2}} z\right)$$

## 2. Горизонтальная пластинка в стратифицированном потоке.

Рассмотрим динамику пограничного течения, образующегося при натекании потока линейно стратифицированной жидкости на горизонтальную пластинку. В этом случае граничные условия имеют вид

$$u = v = 0, \quad S_y = 0, \quad y = 0$$

$$u = U_\infty, \quad S = -\frac{y}{\Lambda}, \quad y \rightarrow \infty \quad (21)$$

Граничные условия (21) определяют вид генератора группы растяжений, с помощью которого система (2) может быть сведена к системе обыкновенных дифференциальных уравнений.

$$X = 2 * X_1 + 1 * X_2 + 1 * X_3 = 2x \frac{\partial}{\partial x} + y \frac{\partial}{\partial y} - v \frac{\partial}{\partial v} + s \frac{\partial}{\partial s}$$

(22)

Тогда редуцирующая замена переменных будет выглядеть следующим образом

$$z = y \sqrt{\frac{U_\infty}{vx}}, \quad u = U_\infty f', \quad v = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{U_\infty}{vx}} (z f' - f),$$

$$S = -\frac{1}{\Lambda} \sqrt{\frac{vx}{U_\infty}} \sigma(z), \quad \Psi = \sqrt{vx U_\infty} f(z), \quad (23)$$

где  $\Psi$  – функция тока.

В силу того, что для горизонтальной пластины силы плавучести не влияют на динамику скорости, редуцированное уравнение для скорости (т.е. для  $f$ ) опять будет иметь вид (15), а краевая задача для  $\sigma$  запишется как

$$\sigma'' + A(f\sigma' - \sigma f') = 0,$$

$$\sigma' = 0, \quad z = 0,$$

$$\sigma = z, \quad z = \infty, \quad (24)$$

Как и в предыдущем случае, краевая задача (24) решается методом сращиваемых асимптотических разложений. Решение в нуле представляется в виде степенного ряда

$$\sigma^{(0)} = \sum \left(-\frac{1}{2}\right)^n \frac{\alpha^n B_n}{(3n)!} z^{3n} \quad (25)$$

где  $\alpha$  – параметр из разложения  $f^{(0)}$ , кроме того свободным является коэффициент  $B_0$ .

Подстановка (25) в (24) с учетом граничных условий и вида функции  $f$  в нуле приводит к рекуррентным соотношениям для  $B_n$

$$B_n = -2(3n-2)! A \sum_{m=0}^{n-1} \frac{(3(n-2m)-1)}{(3(n-m)-1)!(3m)!} C_{n-m-1} B_m \quad (26)$$

Ниже приведены выражения первых десяти коэффициентов  $B_n$  отнесенные к свободному параметру  $-B_0$  при  $A = 350$  (взяты характерные для водного раствора поваренной соли значения коэффициентов кинематической вязкости и диффузии).

$$\begin{aligned} B_1 &:= 700 & B_2 &:= 980700 & B_3 &:= 9604007700 \\ B_4 &:= 235326617242500 \\ B_5 &:= 10711203251470047900 \\ B_6 &:= 780195430068191223615900 \end{aligned}$$

На бесконечности представим функцию  $\sigma$  в виде асимптотического ряда

$$\sigma^{(\infty)} = \sigma_1 + \sigma_2 + \dots, \quad \text{где } \sigma_2 \ll \sigma_1, \quad f^{(\infty)} = f_1 + f_2 + \dots, \quad \text{где } f_2 \ll f_1. \quad (27)$$

Учитывая граничное условие на бесконечности, получаем, что  $\sigma_1 = z$ . После чего, зная поведение  $f$  на бесконечности, для  $\sigma_2$  имеем уравнение

$$\sigma_2'' + A \left( z \sigma_2' - \sigma_2 + \frac{\gamma}{2} i^{-1} \operatorname{erfc}(z/2) \right) = 0 \quad (28)$$

с одним тривиальным краевым условием в бесконечно удаленной точке. Его решение дает функцию с одним свободным параметром

$$\sigma_2 = C i \operatorname{erfc} \left( \sqrt{\frac{A}{2}} z \right) + \frac{2A\gamma}{2A-1} i \operatorname{erfc}(z/2) \quad (29)$$

Таким образом,  $\sigma^{(\infty)}$  имеет вид

$$\sigma^{(\infty)} = z + C i \operatorname{erfc} \left( \sqrt{\frac{A}{2}} z \right) + \frac{2A\gamma}{2A-1} i \operatorname{erfc} \left( \frac{z}{2} \right) \quad (30)$$

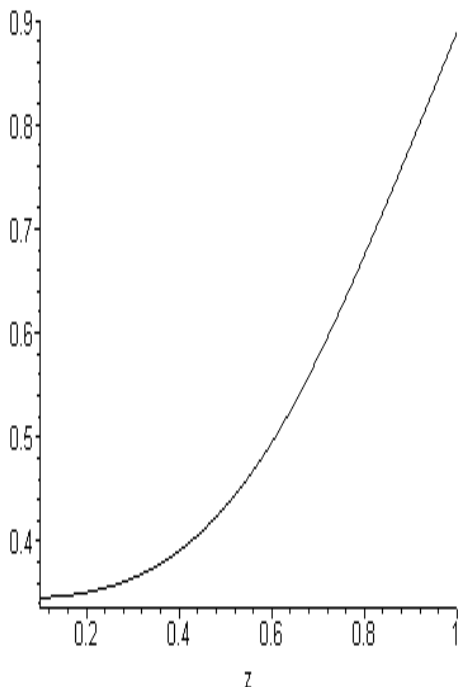


Рис. 4 График функции  $\sigma$  после сшивания,  $A = 10$

Сшивание разложенных  $\sigma^{(0)}$  и  $\sigma^{(\infty)}$  проводится в некоторой точке  $z^*$ , в которой при заданном значении константы  $A$  выполняются равенства

$$\sigma^{(0)}(z^*) = \sigma^{(\infty)}(z^*)$$

$$\sigma'^{(0)}(z^*) = \sigma'^{(\infty)}(z^*)$$

(31)

Алгоритм определения положения точки  $z^*$  и коэффициентов  $B_0$  и  $C$  аналогичен описанному выше для функции  $f$ .

В размерной форме асимптотические выражения для скорости и солёности имеют вид

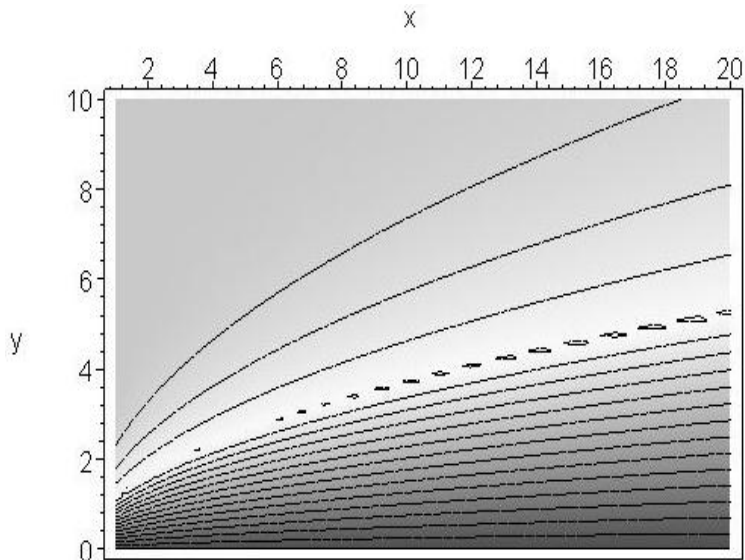
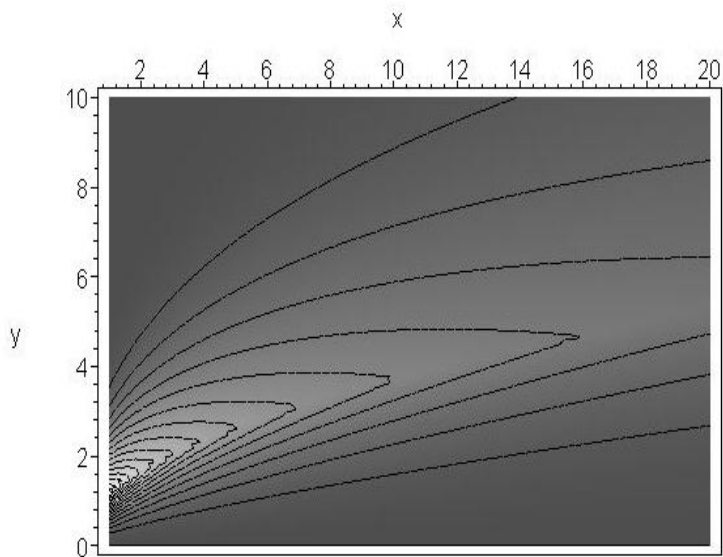
$$u^{(\infty)} = U_{\infty} \left( 1 - \frac{\gamma}{2} \operatorname{erfc} \left( y \sqrt{\frac{U_{\infty}}{\nu x}} \right) \right)$$

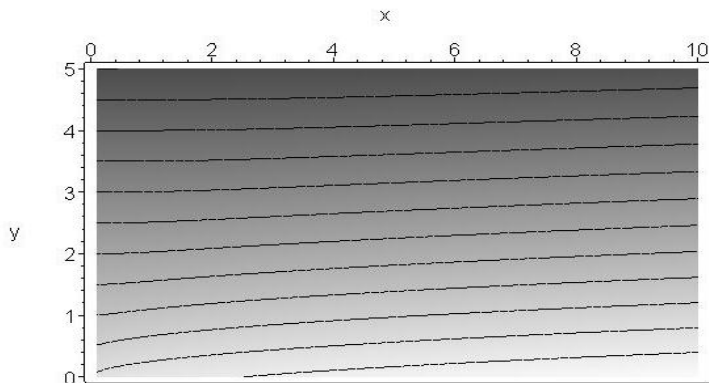
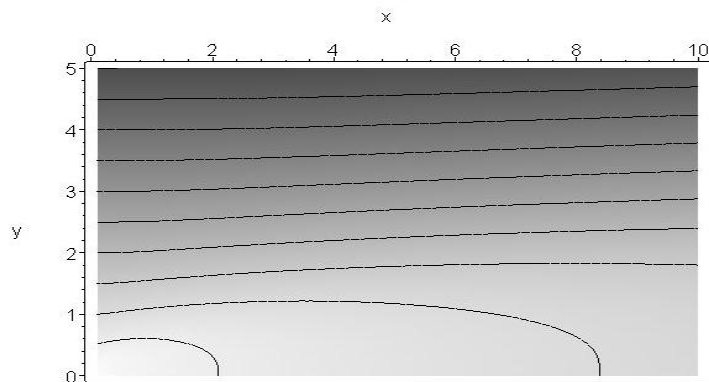
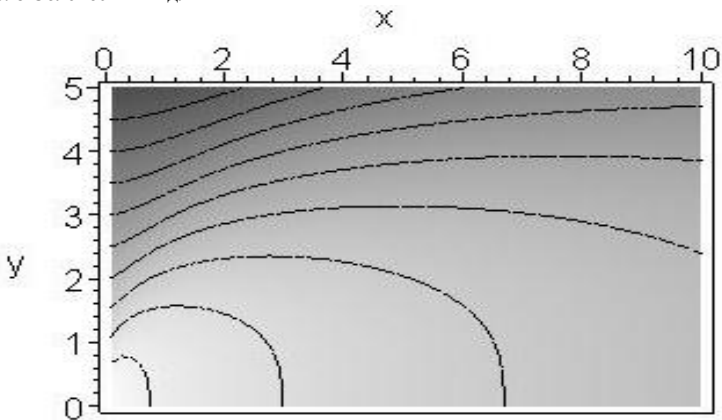
$$v^{(\infty)} = -\frac{\gamma}{4} \sqrt{\frac{U_{\infty}}{\nu x}} \left( \operatorname{erfc} \left( y \sqrt{\frac{U_{\infty}}{\nu x}} \right) + 2i \operatorname{erfc} \left( y \sqrt{\frac{U_{\infty}}{\nu x}} \right) \right)$$

$$S^{(\infty)} = -\frac{1}{\Lambda} \left\{ y + \sqrt{\nu x / U_{\infty}} \left[ C i \operatorname{erfc} \left( \frac{y}{2} \sqrt{\frac{U_{\infty}}{\kappa x}} \right) + \frac{\nu \gamma}{\gamma - \kappa} i \operatorname{erfc} \left( \frac{y}{2} \sqrt{\frac{U_{\infty}}{\nu x}} \right) \right] \right\}$$

Поведение горизонтальной и вертикальной компонент скорости и солёности (для различных значений отношения коэффициентов кинематической вязкости и диффузии) приведены на рисунках 5 – 9.



Рис. 5 Горизонтальная компонента скорости  $u$ Рис. 6 Вертикальная компонента скорости  $v$

Рис. 7 Соленость  $S$  для  $A = 350$ Рис. 8 Соленость  $S$  для  $A = 10$ Рис. 9 Соленость  $S$  для  $A = 1$

### Заключение

Найдены симметрии уравнения пограничного слоя, в том числе и приближенные. Показано, что использование приближенных симметрий позволяет строить автомоделные решения с заданной степенью точности в задачах, не допускающих точные группы растяжений.

Для задач об источнике и непроницаемости для соли горизонтальной пластины в потоке линейно - стратифицированной жидкости методом сращивания асимптотических разложений построены решения при учете диффузии.

Из результатов предоставленных графически видно, что вертикальная компонента скорости монотонно убывает на бесконечности, а горизонтальная компонента стремится к внешнему потоку. Также, по поведению распределения примеси, видно существенное влияние коэффициента диффузии. При малых значениях коэффициента распределение невозмущенно и близко к исходной стратификации, а при  $K \approx V$  существует область диффузионного размыва. При этом эффект диффузии растет с удалением от края пластины.

Автор считает приятным долгом выразить благодарность В.Г. Байдулову за постоянное внимание к работе и обсуждение результатов работы.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя. – М.: Издательство иностранной литературы, 1956
2. Long, R.R. The motion of fluids with density stratification // 1959, J. Geophys. Res. 64, 2151 – 63
3. Martin, S. The slow motion of a finite flat plate in a viscous stratified fluid // 1966 The Johns Hopkins University, Technical Report OHR 4010(01), 21
4. Martin, S. & Long R.R. The slow motion of a flat plate in a viscous stratified fluid // 1968 J. Fluid Mech. 31, 669 – 688
5. R.E. Kelly & L.G. Redekopp The development of horizontal boundary layers in stratified flow. Part 1. Non-diffusive flow // 1969 J. Fluid Mech. 42, 497 – 511
6. Redekopp, L.G. The development of horizontal boundary layers in stratified flow. Part 2. Diffusive flow // 42, 1970, 513 – 525
7. Байков В.А., Газизов Р.К., Ибрагимов Н.Х. Приближённые симметрии // Матем. сб. — 1988. — Т. 136. — Вып. 4. — С. 435–450.

# НЕКОТОРЫЕ ЗАДАЧИ ТЕОРИИ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОЙ НЕУСТОЙЧИВОСТИ, ХАОСА И ТУРБУЛЕНТНОСТИ

С.Я. Герценштейн, Н.В. Никитин, К.В. Показеев

И.Н. Сибгатулин

*Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова*

Проблемы неустойчивости, хаоса и турбулентности возникают во всех областях современного естествознания и, в частности, во всех задачах экологии, прогноза и охраны окружающей среды. Особенно остро подобные проблемы встают в вопросах, связанных с аэрогидродинамическими течениями. До сравнительно недавнего времени здесь преобладали полупирические теории. Возникновение турбулентности при этом описывалось знаменитой каскадной теорией Ландау, согласно которой случайность задавалась внешними данными. В последнее время в теории турбулентности произошла «тихая» революция – выяснилось, что уравнения Навье-Стокса содержат новый класс стохастических решений, которые описывают турбулентные течения. Коротко опишем историю развития этих исследований.

В первой части статьи даны необходимые сведения из линейной теории, описывающей поведение возмущений малой амплитуды. Во второй части статьи исследуется их нелинейная эволюция и взаимодействие, которое и приводит к хаосу.

1. На первом этапе речь шла о линейных задачах теории гидродинамической устойчивости.

В частности, большой интерес вызывало исследование устойчивости течений, отличных от плоскопараллельных и зависящих не от одной, а от нескольких пространственных переменных и, вообще говоря, и от времени [1-3].

Трудности в исследовании подобных течений (например, течения за единичной шероховатостью) носят не только чисто технический характер – так, само основное течение  $V(x, y)$  еще надо отыскать и исследовать – но и содержат некоторые принципиальные моменты: как ставить условия на входе и выходе? Глобальная или сносная неустойчивость должна наблюдаться? И, кроме того, на первых порах в начале шестидесятых годов было не очень ясно как проводить численные исследования устойчивости при больших числах Рейнольдса. В этих первых исследованиях само основное двумерное течение было получено методом Бубнова-Галеркина с применением «треугольного алгоритма»

$$\psi = \sum_{k=1}^{10} g_k(r) \sum_{n=1}^{10-k+1} A_{kn} \varphi_n(\theta)$$

согласно которому старшие члены галеркинского разложения аппроксимируются с меньшей точностью.  $(g_k(r))$  и  $\varphi_n(\theta)$  – полные системы функций [1]. Задача на устойчивость решалась в бесконечной области, на бесконечности ставились условия затухания возмущений в точном виде. Решение задачи об устойчивости первоначально отыскивалось также с помощью метода Бубнова-Галеркина. Сам факт обнаружения при этом неустойчивости имеет принципиальное значение, так как продемонстрировано существование глобальной неустойчивости, без задания довольно искусственных условий на входе и выходе.

Любопытно, что при этом обнаружена возможность стабилизации основного течения достаточно малой шероховатостью и дано объяснение этого явления: наличие достаточно малой шероховатости приводит к появлению точки перегиба в профиле скорости за шероховатостью, но очень близко от поверхности, которая оказывает стабилизирующее воздействие на точку перегиба. Профиль же скорости над точкой перегиба становится более выпуклым, что и приводит к стабилизации течения.

Эти результаты в дальнейшем были подтверждены локальными расчетами устойчивости соответствующих профилей.

Расчеты устойчивости рассматриваемых погранслоинных течений при больших числах Рейнольдса были проведены с помощью отдельного расчета быстро растущего решения  $\varphi_1$ , а также его линейной комбинации с обычным решением  $\varphi_2 : C\varphi_1 + \varphi_2$ . Постоянная  $C$  на каждом шаге подбиралась так, что  $C\varphi_1 = -\varphi_2$  и тем самым в конце интегрирования сильно растущее решение оказывалось за счет постоянной  $C$  того же порядка, что и обычное решение. Эта работа была выполнена независимо от известной работы Годунова и примерно в то же самое время.

Большой интерес вызвал вопрос об устойчивости «комбинационных» течений, сочетающих в себе, например, горизонтальный слой смешения и след за вертикальным цилиндром или конусом [2]. Заранее была непонятна даже форма возмущений. Оказалось, что в спектре возмущений присутствуют все составляющие. Выделение того или иного конкретного возмущения зависит от конкретного вида течения, возмущения и надкритичности.

Значительный интерес вызывало также исследование устойчивости локальных нестационарных профилей скорости, замеренных в экспериментальных исследованиях перехода к турбулентности в пограничном слое Блазиуса. Здесь основное внимание было уделено математической постановке задачи об устойчивости, разработке соответствующих методов исследования, трехмерности и др. Большую роль при этом сыграл модифицированный метод Рэлея и его обобщения на нелинейный и трехмерный случаи. С помощью этого метода удалось, в частности, показать эквивалентность задачи с начальными данными и задачи об устойчивости периодического течения, справедливость аналога теоремы Сквайра и др.

2. Рассматриваемый круг вопросов линейной теории был довольно интересен, но примерно в это же время начались нелинейные исследования рассматриваемых явлений [4,5]. В частности, была обнаружена возможность «жесткого» возбуждения колебаний в пристенных течениях. При этом асимптотические разложения

Ляпунова-Шмидта в известных публикациях того времени проводились до третьего порядка малости.

Однако, для получения амплитуд в «жестком» режиме необходимо проводить весьма громоздкие разложения до 5-го порядка малости включительно. В связи с чем, в [5] была проведена довольно непростая работа, подтвердившая существование «жестких» режимов и получившая соответствующие амплитуды.

Можно также напомнить об известном парадоксе Биркгоффа, связанном с неоднозначностью скорости подъема пузыря легкой жидкости при Релей-Тейлоровской неустойчивости [6]. В строгих асимптотических нелинейных исследованиях Биркгоффа было установлено, что эта скорость находится в некотором достаточно широком диапазоне, а в физических и численных экспериментах эта скорость определялась единственным образом.

Оказалось [6], что только при одном значении скорости подъема пузыря производная от кривизны поверхности в вершине пузыря будет непрерывной. В физическом и численном эксперименте это условие автоматически выполняется и тем самым задается единственность скорости подъема пузыря. В асимптотических теориях Биркгоффа это требование, естественно, не ставилось.

В дальнейшем основное внимание было уделено проблемам нелинейного взаимодействия образующихся конечно-амплитудных волн [7,8]. При этом было обнаружено неожиданно сильное влияние крупномасштабных, длинноволновых составляющих, амплитуды которых, например, в следе могут даже превышать основной фон [8]. Аналогичная ситуация имеет место и в конвекции [7], и более того, оказалось, что при этом могут образовываться так называемые «странные аттракторы»: обычные конвективные валы в силу своей неустойчивости по отношению к длинноволновым возмущениям объединяются в крупномасштабные конвективные валы, которые в свою очередь, сами по себе существовать не могут и распадаются на валы обычного размера и т.д. Причем, по времени процесс ведет себя хаотическим образом: «трубка» близких траекторий быстро разбегается (примерно также как в опытах Рейнольдса частицы подкрашенной жидкости).

Эти результаты в силу их необычности и важности потребовали повышенного внимания к их интерпретации, к точности расчетов сопоставления со знаменитым «странным» аттрактором Лоренца, и т.д.

Хорошее качественное соответствие полученных приближенных численных решений точным решением уравнений Навье-Стокса было получено благодаря разработанной достаточно эффективной численной методике. Эта методика фактически представляла собой симбиоз асимптотических и прямых методов. В частности, форма этих методов содержала обычные асимптотические решения, их вторичную неустойчивость и асимптотику их нелинейного взаимодействия для различных возмущений как с соизмерительными, так и с несоизмерительными волновыми числами. Поэтому, по меньшей мере при небольших надкритичностях эти методы давали практически точные результаты. С увеличением надкритичности, точность контролировалась первоначально увеличением числа опорных функций, а затем и с помощью анализа невязки уравнений Навье-Стокса для обнаруженных стохастических решений. При этом, в частности, было показано, что знаменитый «странный» аттрактор Лоренца фактически исходным уравнениям Навье-Стокса не удовлетворяет – в области параметров характерных для стохастических режи-

мов невязка уравнений на несколько порядков превышает основные физические силы (трение и т.д.).

Интересно, что эти стохастические режимы с увеличением надкритичности могли возникать внезапно: до некоторого фиксированного числа Рэлея  $Ra < R^*$

- движение ламинарно, а при  $Ra \geq R^*$  - движение становится турбулентным. То есть в фазовом пространстве есть стохастическое решение с некоторой конкретной областью притяжения, в которую режим движения может попасть начиная с некоторой надкритичности. Любопытно, что первые стохастические решения были получены для взаимодействующих коротковолновых и длинноволновых возмущений

с несоизмеримыми волновыми числами типа  $\alpha = 0,7$  и  $\beta = 0,1 + \frac{\sqrt{2}}{10^5}$ . Рас-

смотрение взаимодействия возмущений с соизмеримыми волновыми числами, например, 0,35 и 0,7, 0,2 и 0,6, 0,1 и 0,7, 0,07 и 0,7 приводило к образованию периодических режимов. И только рассмотрение достаточно удаленных резонансов с волновыми числами типа 0,05 и 0,7 привело к образованию стохастических режимов. Удивительно, что даже достаточно «удаленная соизмеримость» типа 0,7 и 0,07 все-таки оказывается существенной. Математическое обоснование и понимание подобных фактов еще ждут своего решения.

Полученные результаты фактически подтверждали общие математические результаты Рэлея и Такенса о природе турбулентности. Этот новый взгляд на природу турбулентности существенно изменял сложившиеся представления о природе хаоса и, в частности, заставлял фактически пересмотреть знаменитую каскадную теорию возникновения турбулентности Л.Д. Ландау. Согласно этой теории первоначально основное течение теряло устойчивость и возникало возмущение с фиксированной частотой и случайной фазой. Затем наступала вторичная неустойчивость и возникала еще одна фиксированная частота и случайная фаза, и т.д. Хаос тем самым задавался внешними случайными данными, определяющими случайные начальные фазы.

Оказалось, что природа случайного содержится в самой динамической системе, а не во внешних случайных данных. Другими словами динамические системы и уравнения Навье-Стокса в том числе допускают новый класс решений, которые могут вести себя хаотическим образом, как по времени, так и по пространству. Причем, это не экзотика, не какие-то исключительные случаи, а наоборот, наиболее типичные случаи для почти всех динамических систем. То, что решения уравнений Навье-Стокса могут вести себя хаотическим образом не только по времени, но и по пространству было показано в работе [9], в которой решение представлялось не в виде ряда Фурье, а в виде интеграла Фурье. При этом в ламинарном режиме при гладком начальном спектре со временем этот спектр перестраивается в дискретный, а в турбулентном режиме, наоборот, со временем спектр перестраивается в гладкий и непрерывный. Тем самым эти расчеты продемонстрировали, что природа ламинарных предельных решений соответствует дискретному спектру, и они хорошо описываются рядами Фурье, а природе турбулентных решений, по-видимому, лучше соответствуют интегральные представления.

Подобные подходы, связанные с исследованием механики нелинейного взаимодействия возмущений и изучением природы возникновения турбулентности применялись в ряде других классов задач теории гидродинамической устойчивости. Так, при исследовании неустойчивости и перехода в плоском следе и в слое смещения обнаружился сильный рост поперечных стоячих волн, который, как выяснилось, обусловлен так называемым «разностным» резонансом тройки волн вида  $e^{i\alpha x+i\beta z}$ ,  $e^{i\alpha x-i\beta z}$ ,  $e^{2i\beta z}$ , так как частота поперечной стоячей волны равна нулю.

Подобный «разностный» резонанс оказался решающим при обнаружении конечно-амплитудной неустойчивости течения в круглой трубе [10,11] по отношению к паре спиральных волн вида  $e^{i\alpha x+i\varphi}$ ,  $e^{i\alpha x-i\varphi}$  и к стоячей волне вида  $e^{2i\varphi}$ .

Обнаруженный новый тип неустойчивости для данных течений представляет нам достаточно важным, так как фактически описывает новый тип сценарий перехода к турбулентности в рассматриваемом широком классе течений и объясняет, в частности, возможный механизм появления трехмерных возмущений.

Внедрение развитых подходов только начинается. То, что природа хаоса связана с внутренней структурой объекта, а не с внешними случайными данными, представляется весьма важным, так как затрагивает фундамент современного естествознания (в статистической физике, в биологии, в астрофизике и т.д.). К примеру, большой интерес в астрофизике и геофизических задачах вызывает проблема зарождения магнитного динамо и его стохастической изменчивости [12].

Рассмотрим, в частности, некоторые вопросы, связанные с генерацией магнитного поля конвективными движениями в плоском горизонтальном и вращающемся слое. Генерация магнитного поля тривиальным стационарным потоком (жидкость неподвижна), как известно, невозможна. Без вращения движение в форме валов также не может генерировать магнитное поле (по антидинамо-теореме Зельдовича для плоско-параллельных потоков), но это возможно даже при слабом вращении, как в кинематическом, так и в нелинейном режимах.

В работе расчеты проведены для  $P_r=1$ ; период в горизонтальной плоскости соответствует волновому числу моды  $\alpha_1$ , которая первой теряет устойчивость. В гидродинамической системе (без магнитного поля) наблюдались следующие аттракторы: при  $700 < Ra < 1700$  – конвективные валы, при  $1800 < Ra < 2300$  – бегущая волна, при  $2400 < Ra < 4000$  – движение с двумя основными частотами. Генерация магнитного поля изучалась для аттракторов при  $Ra = 2000$  и  $2400$ , и магнитных чисел Прандтля  $P_m = 4, 6, 8$  и  $10$ . Было найдено, что магнитное поле возбуждается, как в линейном, так и в нелинейном режимах, при  $Ra = 2000$  для  $P_m > 6$ , и при  $Ra = 2400$  для  $P_m > 4$ . Таким образом, численно показано, что конвективные течения способны генерировать магнитное поле даже при отсутствии вращения.



Упомянем также очень интересную работу [13], в которой планетарная модель Резерфорда применена для атома гелия (учитывались только кулоновские взаимодействия). Проведенные расчеты установили, что даже минимальное усложнение модели Резерфорда (от системы двух разнозаряженных тел к системе из трех) приводит к качественному изменению поведения системы: траектории частиц начинают заполнять некоторую подобласть фазового пространства и возникает некий аналог критерия неопределенности Гейзенберга: если задать положение частицы с большим допуском, включая всю эту подобласть, то охватываются все траектории и могут рассчитываться некие осредненные характеристики; если же задать положение частицы в более узкой зоне, то при осреднении будут учитываться не все траектории и наблюдаются отклонения от первоначальных средних.

Эта ситуация породила модифицированное направление, связанное с проблемой осреднения. Первоначально возникло желание, пользуясь современными возможностями ЭВМ, построить стандартную цепочку моментных уравнений, но произвольной длины. Однако, как выяснилось, эта цепочка расходится. Затем родилась идея выделить когерентные турбулентные структуры, а цепочку строить уже для оставшейся части. Эта идея вполне конструктивна с учетом наличия программ, которые уже умеют рассчитывать турбулентные течения. Другими словами, для начала речь идет просто об обработке готового решения. Кроме того, в нашем распоряжении есть уникальные экспериментальные установки, которые также позволяют исследовать и выделять когерентные турбулентные структуры, и с помощью которых можно проверить работоспособность идеи о выделении когерентных структур и построении цепочки моментных уравнений для «остатка».

Первые шаги в этом направлении вполне обнадеживают и позволяют надеяться, в случае успеха, на серьезное дальнейшее продвижение в области расчета интенсивных турбулентных течений.

Следует подчеркнуть, что так как динамический хаос определяется не внешними случайными воздействиями, а внутренней структурой самой динамической системы, то этот хаос может иметь весьма необычный вид. Так, при турбулентной конвекции в горизонтальном слое раствора [14] при анализе новых «динамичных» механизмов возникновения гидродинамического хаоса было обнаружено в частности, что хаотические траектории могут случайно заполнять в фазовом пространстве довольно экзотические ленты типа листа Мебиуса. При этом сечение Пуанкаре может представлять собой плавную линию, или несколько линий, но точки на которых заполняются хаотическим образом. После возникновения стохастического режима при возрастании температурного числа Рейля (при фиксированном числе Рейля солености) имеется режим с тремя периодами, после которого структура отображения Пуанкаре и соответственно само течение резко меняет свою структуру и значительно усложняется. Динамика изменения отображения Пуанкаре с увеличением чисел Рейля рассматривается в [15].

Разработанные принципиально новые подходы и воззрения о природе возникновения случайного в гидродинамике затрагивают фундамент современной науки и образования, и уже внедряются и в учебный процесс и в ряде смежных наук: в биологии, в медицинской диагностике, в химии, в геофизике, в экологии, в астрофизике и др. Существенно, что эти новые подходы подтверждаются уникальными экспериментами в институте механики МГУ [16] и на физическом факультете МГУ.

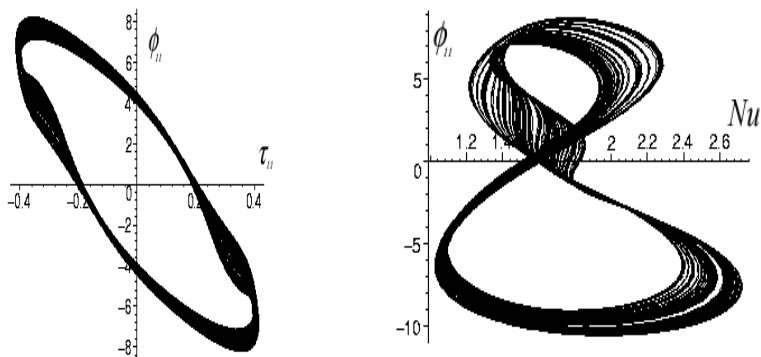


Рис. Вид аттрактора в проекциях на две разные плоскости в фазовом пространстве.  $\Phi_{11}$ ,  $\tau_{11}$  - первые коэффициенты разложения функции тока и температуры по двумерному ряду Фурье.  $Nu$  – температурное число Нуссельта.

### Выводы:

Проведенные исследования обнаружили существование нового класса стохастических решений уравнений Навье-Стокса. Эти решения без каких-либо полуэмпирических гипотез хорошо описывают ряд турбулентных потоков – классическое турбулентное течение в круглой трубе, в конвекции и др. Структура турбулентных режимов при этом может иметь весьма экзотический характер. Так, при конвективной неустойчивости фазовый портрет установившегося режима соответствует листу Мебиуса. При этом отображение Пуанкаре представляет собой плавную линию, но которая заполняется точками (от пересечения плоскости траекториями) случайным образом. То есть в данном случае турбулентность имеет не объемный, а поверхностный характер. Существенно, что стохастичность при этом не задается внешними случайными воздействиями, а определяется природой самих гидродинамических уравнений.

Работа выполнялась при поддержке РФФИ (гранты № 03.02.16974, № 02-01-00491 и др.).

### Литература

1. Герценштейн С.Я. О влиянии единичной шероховатости на возникновение турбулентности // МЖГ. 1966. № 2. С. 112-119.
2. Герценштейн С.Я., Рудницкий А.Я., Сухоруков А.Н. Устойчивость непараллельных пространственных струйных течений // МЖГ. 1987. № 3. С. 43-54.
3. Показеев К.В., Розенберг А.Д. О наблюдении эффекта блокировки поверхностных гравитационно-капиллярных волн неоднородным течением // Вестн. Моск. ун-та. Физика, Астрономия. 1983. Т. 24. № 3. С. 72-76.

4. Арсеньев А.С., Показеев К.В., Шелковников Н.К. Нелинейные волны на воде // Физический факультет МГУ. 1998. 134 с.
5. Герценштейн С.Я., Штемлер Ю.М. О возмущениях конечной амплитуды в пограничном слое // МЖГ. 1976. № 1. С. 150-153.
6. Герценштейн С.Я., Чернявский В.Н., Штемлер Ю.М. Асимптотическая стадия неустойчивости Рэлея-Тейлора // ДАН. 1989. № 4. С. 819-823.
7. Герценштейн С.Я., Шмидт В.М. Нелинейное развитие и взаимодействие возмущений конечной амплитуды при конвективной неустойчивости вращающегося слоя // ДАН. 1975. Т. 225. № 1. С. 81-85.
8. Герценштейн С.Я. и др. О нелинейном развитии и взаимодействии нелинейных волн в плоском слое // МЖГ. 1977. № 3. С. 52-58.
9. Герценштейн С.Я., Попов В.Н. Расчет турбулентной конвекции со сплошным спектром в горизонтальном слое раствора // Труды математического института В.А. Стеклова. 1998. Т. 223. С. 166-170.
10. Герценштейн С.Я., Желиговский В.А., Никитин А.В., Рудницкий А.Н., Сухоруков А.Н. О некоторых переходных процессах в пространственных потоках с поперечным градиентом скорости // Сборник «Материалы III Международного симпозиума по ламинарно-турбулентному переходу». Новосибирск. 1984. С. 479-486.
11. Никитин Н.В. О жестком возбуждении автоколебаний в течении Гагена-Пуазейля // МЖГ. 1984. № 5. С. 181-183.
12. Герценштейн С.Я., Миневич П.С., Подвигина О.М. Трехмерная нестационарная конвекция в плоском слое с магнитным полем // Тезисы докладов Ломоносовских чтений. МГУ. 2004.
13. Герценштейн С.Я., Попов В.Н. Механика трех разнозаряженных тел // ДАН. 1997. Т. 353. № 2. С. 190-192.
14. Герценштейн С.Я., Сибгатуллин И.Н. Некоторые свойства стохастических режимов термосолевой конвекции в плоском слое // Вестник Московского университета, серия 1.2002. № 2.50-56.
15. Sibgatullin I.N., Gertsenstein S.Ja. Sibgatullin N.R. Some properties of two-dimensional stochastic regimes of double-diffusive convection in plane layer // American Institute of Physics. 2003. Chaos. Vol. 13. № 4. P. 1231-1241.
16. Ю.Н. Беляев Гидродинамическая неустойчивость и турбулентность в сферическом течении Куэтта // Изд-во Моск. ун-та, 1997. С. 1-348.

# О ХАРАКТЕРИСТИКАХ СТАЦИОНАРНЫХ ВОЛН

## НА СДВИГОВОМ ТЕЧЕНИИ

Зайцев А.А., Руденко А.И.

*Калининградский государственный технический университет*

*г. Калининград, rudenko1975@bk.ru*

### ВВЕДЕНИЕ

Волны на поверхности воды являются одним из самых распространенных видов волнового движения в природе, доступных для визуального наблюдения. Поверхность океана практически всегда покрыта волнами, причем одновременно существуют самые разнообразные волны от капиллярных с длинами порядка миллиметров до зыби с длинами до нескольких километров.

Свободные волны на поверхности жидкости создаются двумя факторами – силой тяжести и поверхностным натяжением. Оба фактора действуют одновременно, но если волны достаточно длинные, то преобладает сила тяжести. Такие волны называются гравитационными, движение которых определяется взаимодействием между инерцией жидкости и ее стремлением вернуться под действием силы тяжести в состояние устойчивого равновесия; для них несущественно поверхностное натяжение. Поверхностные гравитационные волны характеризуются прежде всего своей длиной и амплитудой и зависят от глубины жидкости. Для различных частных случаев поверхностных гравитационных волн важны не абсолютные значения этих величин, а их отношения.

Изложение условий, при которых возникают поверхностные волны и которые определяют их характеристики, можно найти в [2].

В статье в рамках эйлерова подхода изучен случай двумерных волновых движений жидкости конечной глубины и линейного профиля средней скорости. При выполнении второго условия становится возможным, как и в отсутствие среднего течения (то есть в задаче Стокса), существование безвихревых волновых движений. Для решения поставленной задачи используется модификация первого метода Стокса [1;3;4;5]. Особенностью нашего подхода является приведение двумерной задачи к одномерной. Упрощает процедуру введение вспомогательных функций. Далее используются ряды теории возмущений, аналогичные рядам Стокса. Для низших приближений получены и решены линейные уравнения. Найдено и проанализировано нелинейное дисперсионное соотношение.

## ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Ставится цель изучить стационарные волны на горизонтальном течении идеальной несжимаемой однородной жидкости конечной глубины  $h$  с линейным профилем средней скорости,  $\bar{u} = by$ , здесь  $b$  - постоянный градиент средней скорости. Предположим, что на свободной поверхности сформировалась система стационарных нелинейных волн, движущихся с постоянной скоростью  $c$ . Используется прямоугольная система координат  $(x, y)$ , где ось  $x$  совмещена со средним горизонтальным уровнем, а ось  $y$  направлена вертикально вверх. Горизонтальную и вертикальную компоненты скорости частиц жидкости обозначим  $\bar{u} + u$  и  $v$ , где  $u$  и  $v$  - обусловлены волновым движением. Давление, плотность и профиль свободной поверхности обозначим  $P$ ,  $\rho$  и  $\eta$ . В случае стационарных волн динамические переменные зависят от координат и времени следующим образом:

$$\eta = \eta(x - ct), \quad (u, v, p) = (u, v, p)(x - ct, y),$$

$c$  - скорость волны.

Уравнения Эйлера динамики идеальной несжимаемой однородной жидкости, дополненные условием потенциальности волнового движения, будут иметь вид

$$\rho((u + by - c)u_x + v(b + u_y)) + p_x = 0,$$

$$\rho((u + by - c)v_x + uv_y + p_y) = 0,$$

$$u_x + v_y = 0,$$

$$u_y - v_x = 0.$$

Здесь и далее считаем, что  $\eta = \eta(x)$ ,  $(u, v, p) = (u, v, p)(x, y)$ , т.е. сделано переобозначение  $x - ct \rightarrow x$ .

На свободной поверхности  $y = \eta(x)$  имеют место два граничных условия:

$$(u + b\eta - c)\eta' - v = 0, \quad p = 0.$$

Для описания движения частиц в волне удобно использовать динамическую составляющую функцию тока  $\psi(x, y)$ , через которую компоненты скорости выражаются так:

$$u = \psi_y, \quad v = -\psi_x.$$

Система обладает первым интегралом

$$P = \rho(-V(x, y) + 2b(y\psi_y - \psi) + gy) + p = const,$$

где

$$V(x, y) = c\psi_y - 2^{-1}(\psi_x^2 + \psi_y^2).$$

Для полной функции тока будем иметь

$$\Psi(x, y) = \psi(x, y) - cy + 2^{-1}by^2.$$

На свободной поверхности она принимает постоянное значение.

В силу изложенного для граничных условий будем иметь:

$$-c\eta(x) + \psi(x, \eta(x)) + 2^{-1}b\eta^2(x) = Q,$$

$$-V(x, \eta(x)) + b(\eta(x)\psi_y(x, \eta(x)) - \psi(x, \eta(x))) + g\eta(x) = P,$$

$$P, Q = const,$$

(1)

$$\psi(x, -h) = 0.$$

Несложно получить решение рассматриваемой задачи в линейном приближении. Оно дается формулами

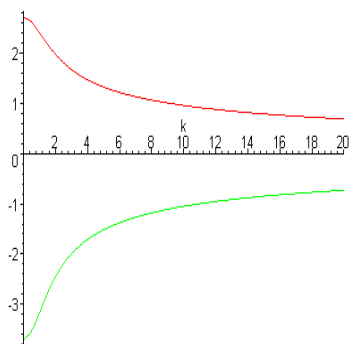
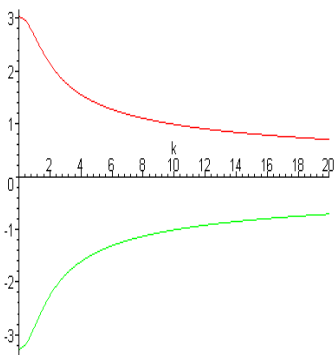
$$\eta(x) = a \cos(kx), \quad \psi(x, y) = sh^{-1}(kh)c_0 a \cos(kx)sh(k(y+h)), \quad k = 2\pi/L,$$

где  $c_0$  - фазовая скорость, которая подчиняется уравнению

$$k cth(kh)c_0^2 + b c_0 - g = 0,$$

которые дают зависимости фазовой скорости для волнового числа (рис.1).

$$b = 0.25$$



$$b = 1.0$$

Рис. 1. Зависимости фазовых скоростей линейных волн на сдвиговом течении от волнового числа.

Это уравнение имеет два действительных корня с противоположными знаками. Им соответствует две синусоидальные волны, бегущих вниз и вверх по потоку.

## ВЫВОД И РЕШЕНИЕ СИСТЕМ УРАВНЕНИЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНЫХ ПРИБЛИЖЕНИЙ

Введем новые вспомогательные функции:

$$\psi(x) = \psi(x, 0), \quad \xi(x) = \psi_y(x, 0), \quad H(x) = \eta^2(x),$$

$$V_1(x) = V_y(x, 0), \quad V_2(x) = V_{yy}(x, 0).$$

Сделаем два замечания: 1) обозначение  $\psi(x)$  совпадает с обозначением функции тока, но это не должно привести к путанице, так как далее функция тока уже не рассматривается; 2) соответствии  $\psi(x) \rightarrow \xi(x)$  является линейной операцией, которое позволяет однозначно определить  $\xi(x)$  по  $\psi(x)$ ; в частности, при  $\psi(x) = \cos(kx)$  получаем  $\xi(x) = kcth(kh)\cos(kx)$ . По линейности из этого частного случая легко получить значение  $\xi(x)$  для любого тригонометрического многочлена. Соответствие  $\psi(x) \rightarrow \xi(x)$  обозначим  $W$ , то есть  $\xi(x) = W\psi(x)$ .

Благодаря новым функциям и операции  $W$  получаем уравнения одномерной задачи (с точностью до 3-го приближения):

$$\begin{aligned} \xi(x) &= W\psi(x), \\ -c\eta(x) + \psi(x) + \eta(x)\xi(x) + 2^{-1}bH(x) &= Q, \\ g\eta(x) - b\psi(x) - c\xi(x) + 2^{-1}(\xi^2(x) + (\psi'(x))^2) - \eta(x)V_1(x) &= P, \\ H(x) &= \eta^2(x), \\ V_1(x) &= -c\psi''(x) - \psi'(x)\xi'(x) + \psi''(x)\xi(x), \quad V_2(x) = -c\xi''(x). \end{aligned} \quad (2)$$

Процедура их вывода использует разложения уравнений (1) в ряды Тейлора по степеням  $\eta(x)$ .

Приближенное решение уравнений (2) ищется в виде

$$\begin{aligned} c &= c_0(1 + c_1(ka)^2), \\ Q &= k^{-1}c_0Q_1(ka)^2, \quad P = k^{-1}c_0P_1(ka)^2, \\ \eta(x) &= k^{-1}(\eta_1(x)(ka) + \eta_2(x)(ka)^2 + \eta_3(x)(ka)^3), \quad \eta_1(x) = \cos(kx), \\ \psi(x) &= k^{-1}c_0(\psi_1(x)(ka) + \psi_2(x)(ka)^2 + \psi_3(x)(ka)^3), \\ \xi(x) &= c_0(\xi_1(x)(ka) + \xi_2(x)(ka)^2 + \xi_3(x)(ka)^3), \\ H(x) &= k^{-2}H_2(x)(ka)^2, \\ V_1(x) &= kc_0^2(V_{11}(x)(ka) + V_{12}(x)(ka)^2), \quad V_2(x) = k^2c_0^2V_{21}(x)(ka). \end{aligned}$$

Здесь учтено решение линейной задачи;  $a$  - амплитуда основной гармоники в профиле волны. После подстановки в уравнения (2) и расщепления по степеням  $(ka)$ , получаем системы трех низших приближений.

Система уравнений 1-го приближения:

$$\begin{aligned} \xi_1(x) &= k^{-1}W\psi_1(x), \\ (cth(kh)kc_0 + b)\eta_1(x) - b\psi_1(x) - kc_0\xi_1(x) &= 0, \\ \eta_1(x) + \psi_1(x) &= 0, \quad \eta_1(x) = \cos(kx). \end{aligned}$$

Система уравнений 2-го приближения:

$$\begin{aligned} \xi_2(x) &= k^{-1}W\psi_2(x), \\ (cth(kh)kc_0 + b)\eta_2(x) - b\psi_2(x) - kc_0\xi_2(x) &= A_2(x) + P_1, \\ -\eta_2(x) + \psi_2(x) &= B_2(x) + Q_1, \quad H_2(x) = \eta_1^2(x), \quad V_{11}(x) = -k^{-2}\psi_1''(x); \\ \text{здесь} \\ A_2(x) &= -2^{-1}kc_0(\xi_1^2(x) + k^{-2}(\psi_1'(x))^2) + kc_0\eta_1(x)V_{11}(x), \\ B_2(x) &= -\eta_1(x)\xi_1(x) - 2^{-1}(kc_0)^{-1}bH_2(x). \end{aligned}$$

Система уравнений 3-го приближения:

$$\begin{aligned} \xi_3(x) &= k^{-1}W\psi_3(x), \\ (cth(kh)kc_0 + b)\eta_3(x) - b\psi_3(x) - kc_0\xi_3(x) - kc_0c_1\xi_1(x) &= A_3(x), \\ -\eta_3(x) + \psi_3(x) - c_1\eta_1(x) &= B_3(x), \\ V_{12}(x) &= k^{-2}(-\psi_2''(x) - \psi_1'(x)\xi_1'(x) + \psi_1''(x)\xi_1(x)), \quad V_{21}(x) = -k^{-2}\xi_1''(x); \\ \text{здесь} \\ A_3(x) &= -kc_0(\xi_1(x)\xi_2(x) + k^{-2}\psi_1'(x)\psi_2'(x)) + kc_0(\eta_2(x)V_{11}(x) \\ &+ \eta_1(x)V_{12}(x)) + 2^{-1}kc_0H_2(x)V_{21}(x) + 2^{-1}k^{-2}bH_2(x)\psi_1''(x), \\ B_3(x) &= -\eta_2(x)\xi_1(x) - \eta_1(x)\xi_2(x) + 2^{-1}k^{-2}H_2(x)\psi_1''(x). \end{aligned}$$

Основные неизвестные функции в каждой из этих систем уравнений должны удовлетворять условиям периодичности и нулевого среднего. Решение системы уравнений 1-го приближения дают формулы:

$$\eta_1(x) = \cos(kx), \quad \psi_1(x) = \cos(kx), \quad \xi_1(x) = cth(kh)\cos(kx).$$

Переходим к изложению процедуры решения систем последовательных приближений. Решение систем уравнений 2-го и 3-го приближений начинается с расчета функций  $H_2(x)$ ,  $V_{11}(x)$ ,  $V_{12}(x)$ ,  $V_{21}(x)$ ,  $A_2(x)$ ,  $A_3(x)$ ,  $B_2(x)$ ,  $B_3(x)$ .

В случае 2-го приближения получаем тригонометрические представления:

$$\begin{aligned} H_2(x) &= 2^{-1} + 2^{-1}\cos(2kx), \quad V_{11}(x) = \cos(kx), \\ A_2(x) &= 2^{-1}A_{20} + A_{21}\cos(2kx), \quad B_2(x) = 2^{-1}B_{20} + B_{21}\cos(2kx), \end{aligned} \quad (3)$$

коэффициенты которых имеют следующие значения:

$$\begin{aligned} A_{20} &= -2^{-2}(cth^2(kh) - 1)kc_0, \quad A_{21} = -2^{-2}(cth^2(kh) - 3)kc_0, \\ B_{20} &= -2^{-2}(kc_0)^{-1}(2cth(kh)kc_0 + b), \\ B_{21} &= -2^{-2}(kc_0)^{-1}(2cth(kh)kc_0 + b). \end{aligned}$$

Решение уравнений 2-го приближения ищется в аналогичной форме:

$$\eta_2(x) = \eta_{21}\cos(2kx), \quad \psi_2(x) = \psi_{21}\cos(2kx), \quad \xi_2(x) = \xi_{21}\cos(2kx). \quad (4)$$

Тогда условия периодичности и нулевого среднего выполняются автоматически. После подстановки представлений (3), (4) в систему уравнений 2-го прибли-



жения для коэффициентов этих представлений и  $P_1, Q_1$  получается алгебраическая система, решая которую находим:

$$\begin{aligned} P_1 &= 2^{-2} (cth^2(kh) - 1)kc_0, \\ Q_1 &= 2^{-2} (kc_0)^{-1} (2cth(kh)kc_0 + b), \\ \eta_{21} &= 2^{-2} (kc_0)^{-2} (cth(kh)(3cth^2(kh) - 1)(kc_0)^2 \\ &+ (3cth^2(kh) + 1)bkc_0 + cth(kh)b^2), \\ \psi_{21} &= 2^{-2} (kc_0)^{-2} cth(kh)(3cth^2(kh) - 1)(kc_0)^2 + 3cth(kh)bkc_0 + b^2, \\ \xi_{21} &= 2^{-2} (kc_0)^{-2} (cth^2(kh) + 1)(3cth^2(kh) - 1)(kc_0)^2 \\ &+ 3cth(kh)bkc_0 + b^2). \end{aligned}$$

Решение системы уравнений для 3-го приближения получается аналогично. В результате получаем:

$$\begin{aligned} A_3(x) &= A_{30} \cos(kx) + A_{31} \cos(3kx), \quad B_3(x) = B_{30} \cos(kx) + B_{31} \cos(3kx), \\ \eta_3(x) &= \eta_{31} \cos(3kx), \\ \psi_3(x) &= \psi_{30} \cos(kx) + \psi_{31} \cos(3kx), \quad \xi_3(x) = \xi_{30} \cos(kx) + \xi_{31} \cos(3kx), \\ D_3 &= 3cth(3kh) - cth(kh) = 2^3 cth(kh)(3cth^2(kh) + 1)^{-1}, \\ c_1 &= 2^{-3} (kc_0)^{-2} (2cth(kh)kc_0 + b)^{-1} (cth(kh)(9cth^4(kh) \\ &- 10cth^2(kh) + 9)(kc_0)^3 + (15cth^4(kh) - 3cth^2(kh) + 2)b(kc_0)^2 \\ &+ 3cth(kh)(3cth^2(kh) + 1)b^2kc_0 + (2cth^2(kh) + 1)b^3), \quad (5) \\ A_{30} &= -2^{-3} (kc_0)^{-1} (3cth(kh)(cth^4(kh) - 3cth^2(kh) + 3)(kc_0)^2 + \\ &(3cth^4(kh) - 6cth^2(kh) + 2)bkc_0 + cth(kh)(cth^2(kh) - 2)b^2), \\ A_{31} &= -2^{-3} (kc_0)^{-1} (3cth(kh)(cth^4(kh) - 7cth^2(kh) + 5)(kc_0)^2 \\ &+ 3cth^2(kh)(cth^2(kh) - 6)bkc_0 + cth(kh)(cth^2(kh) - 6)b^2), \\ B_{30} &= -2^{-3} (kc_0)^{-2} (cth^2(kh)(6cth^2(kh) - 1)(kc_0)^2 \\ &+ 2cth(kh)(3cth^2(kh) + 2)bkc_0 + (2cth^2(kh) + 1)b^2), \\ B_{31} &= -2^{-3} (kc_0)^{-2} ((6cth^4(kh) - cth^2(kh) - 2)(kc_0)^2 \\ &+ 2cth(kh)(3cth^2(kh) + 2)bkc_0 + (2cth^2(kh) + 1)b^2). \\ \psi_{30} &= -2^{-3} (kc_0)^{-1} (2cth(kh)kc_0 + b)^{-1} (cth(kh)(3cth^4(kh) \\ &+ 8cth^2(kh) - 9)(kc_0)^2 + (3cth^4(kh) + 10cth^2(kh) - 2)bkc_0 \\ &+ cth(kh)(cth^2(kh) + 3)b^2), \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\xi_{30} &= -2^{-3}(kc_0)^{-1}(2cth(kh)kc_0 + b)^{-1}cth(kh)(cth(kh)(3cth^4(kh) \\
&+ 8cth^2(kh) - 9)(kc_0)^2 + (3cth^4(kh) + 10cth^2(kh) - 2)bkc_0 \\
&+ cth(kh)(cth^2(kh) + 3)b^2), \\
\eta_{31} &= 2^{-6}(kc_0)^{-3}((cth^2(kh) - 1)(3cth^2(kh) + 1)(9cth^2(kh) - 13)(kc_0)^3 \\
&+ th(kh)(45cth^6(kh) + 18cth^4(kh) \\
&+ 11cth^2(kh) - 2)b(kc_0)^2 \\
&+ (27cth^4(kh) + 22cth^2(kh) + 7)b^2kc_0 \\
&+ th(kh)(2cth^2(kh) + 1)(3cth^2(kh) + 1)b^3), \\
\psi_{31} &= 2^{-6}(kc_0)^{-3}(3cth^2(kh) + 1)((cth^2(kh) - 1)(9cth^2(kh) - 13) \\
&(kc_0)^3 + th(kh)(15cth^4(kh) - 15cth^2(kh) - 2)b(kc_0)^2 \\
&+ (9cth^2(kh) - 1)b^2kc_0 + th(kh)(2cth^2(kh) + 1)b^3), \\
\xi_{31} &= 3 \cdot 2^{-6}(kc_0)^{-3}(cth^2(kh) + 3)(cth(kh)(cth^2(kh) - 1)(9cth^2(kh) - 13)(kc_0)^3 \\
&+ (15cth^4(kh) - 15cth^2(kh) - 2)b(kc_0)^2 \\
&+ cth(kh)(9cth^2(kh) - 1)b^2kc_0 + (2cth^2(kh) + 1)b^3).
\end{aligned}$$

Используя значение  $C_1$  (формула (5)), получаем нелинейные дисперсионные соотношения для обоих типов волн:

$$\begin{aligned}
c^{(i)} &= c_0^{(i)}(1 + 2^{-3}(kc_0)^{-2}(2cth(kh)kc_0 + b)^{-1}(cth(kh)(9cth^4(kh) \\
&- 10cth^2(kh) + 9)(kc_0)^3 + (15cth^4(kh) - 3cth^2(kh) + 2)b(kc_0)^2 \\
&+ 3cth(kh)(3cth^2(kh) + 1)b^2kc_0 + (2cth^2(kh) + 1)b^3)(ka)^2),
\end{aligned}$$

при  $i = 1$  – волна движется вверх по потоку,  $i = 2$  – волна движется вниз по потоку. В случае  $b = 0$  они переходят в дисперсионное соотношение Стокса [6]

$$c = \sqrt{gk^{-1}th(kh)}(1 + 2^{-4}(9cth^4(kh) - 10cth^2(kh) + 9)(ka)^2).$$

## ВЫВОДЫ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Расчет нелинейной поправки к скорости стационарных волн на течении и сравнение с поправкой для скорости волн Стокса (результаты для случаев  $b = 0.5$  и  $1.0$  показаны на рис.2; там средняя линия относится к волнам Стокса, а верхняя и нижняя к волнам, бегущих вниз и вверх по потоку), который использует формулу (НДС), позволяет сделать следующие выводы:

В присутствии сдвигового течения скорость нелинейной правой волны возрастает, а левой – уменьшается.

Увеличение градиента течения ведет к росту скорости правой волны и уменьшению скорости левой волны.

Влияние течения увеличивается в длинноволновой области и уменьшается в коротковолновой.

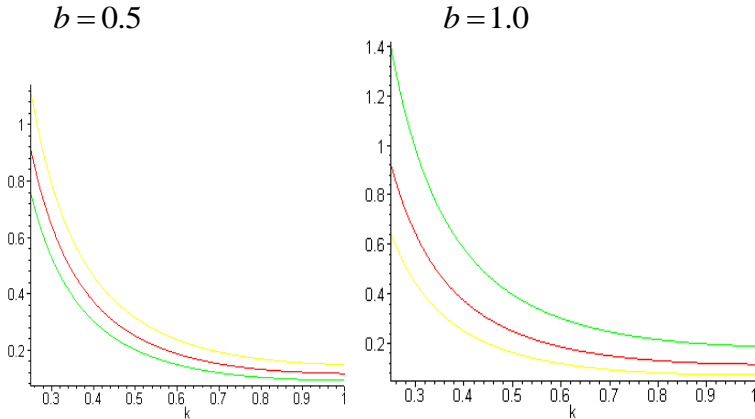


Рис. 2. Зависимости нелинейной поправки к скорости волны от волнового числа  $k$  для волн Стокса (средняя линия) и волн на течении, бегущих вниз (верхняя линия) и вниз (нижняя линия) по потоку.

В заключение отметим, что предложенным способом можно решать задачи о строении и характеристиках стационарных нелинейных поверхностных и внутренних гравитационных волн в стратифицированной жидкости, в которой слои движутся в горизонтальном направлении, причем в каждом из слоев профиль средней скорости линейный.

*Работа выполнена при поддержке ИИТАС, проект № 01/460 (2002г.).*

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абрашкин А.А., Зенькович Д.А. Вихревые стационарные волны на сдвиговом потоке. // Изв.Ан.СССР. Физ. атмосфер. и океана.1990. №- 1. С. 35-45.
2. Лазарев А., Показеев К.В, Шелковников Н.К. Физико-химическая неоднородность поверхности океана и поверхностные волны. Ч.II. М.: Изд-во Моск. Ун-та, 1988.
3. Сретенский Л.Н. Теория волновых движений жидкости. М.: Наука, 1977.
4. Lamb Н. Hydrodynamics. N Y.: Dover Publ., 1945; Cambridge Univ. Press, 1932. = Ламб Г. Гидродинамика. М.-Л.: Гостехиздат, 1947.
5. Stokes G.G. On the theory of oscillatory waves// Camb. Trans. V. 8. 1847. P. 441 - 473. Mathematical and Physical Papers. V. 1. Cambridge 1980. P. 197 - 229.
6. Whitham G.B. Linear and nonlinear waves. N Y.: Dover Publ., 1974. =Уизем Дж.Б. Линейные и нелинейные волны. М.: Мир, 1977.

## УСИЛЕНИЯ ВОЛН В ВЕТРОВОМ ПОТОКЕ

Иванова И.Н., Мельникова О.Н.

*Физический факультет МГУ*

Исследовано поле скорости воздушного потока в области усиления ветровых волн. На заветренном склоне волны обнаружен максимум скорости ветра на приводной линии тока, обусловленный периодическим отрывом вихрей. На основе интеграла Коши-Лагранжа рассчитано распределение давления вдоль волны с учетом вертикального сдвига скорости и возмущений, создаваемых вихрями. Эти параметры дают основной вклад в рост амплитуды волны.

### **Введение**

Наблюдения процесса зарождения и развития ветровых волн показывают, что в области генерации возникают короткие волны с параллельными гребнями. По мере продвижения волн в направлении воздушного потока происходит их усиление, т.е. увеличивается их амплитуда и фазовая скорость. Начиная с работ братьев Вебер, усиление волн связывается с неравномерным распределением давления вдоль волны. Кельвин объяснял понижение давления на передний склон волны образованием присоединенных вихрей за гребнем волны и ускорением жидкости при отрыве пограничного слоя. Эта идея получила дальнейшее развитие в работах Стэнтона, Капицы, Шулейкина, Филлипса, Кононковой, Майлза [1]. Несмотря на значительный накопленный материал [2–6], соответствия расчетных и экспериментальных данных об усилении волн получить до сих пор не удалось [2].

В [2] экспериментально обнаружен регулярный отрыв вихрей в приповерхностном слое воздуха на переднем склоне волны. В [7–8] экспериментально показано, что в тормозящихся вдоль по течению стационарных потоках жидкости происходит периодическая остановка вязкого слоя на границе раздела сред. Торможение слоя происходит за счет силы трения на нижней границе слоя и обратного градиента давления на его верхней границе. В процессе торможения слоя формируются вихри, вылетающие после остановки слоя. После вылета вихря наблюдается резкое увеличение скорости потока у дна канала. В результате у твердой границы в тормозящихся потоках жидкости наблюдается отличная от нуля скорость потока. В равномерных и ускоряющихся в направлении движения стационарных потоках относительная скорость на границе сред равна нулю (для твердой границы выпол-

няется "условие прилипания"). В воздушном потоке над волнами на наветренном склоне волны поток ускоряется, а на заветренном - замедляется, порождая перепад давления вдоль волны. При формировании и движении вихрей на заветренном склоне появляется добавочный вклад в распределение давления. Вычислить распределение давления вдоль волны можно, если одновременно измерить скорость воздуха и воды вдоль ветровой волны у границы раздела сред. Такая задача до сих пор решена не была.

Целью настоящей работы является экспериментальное исследование распределения скорости воздушного потока и дрейфовой скорости вдоль ветровой волны, при ее усилении; расчет распределения давления вдоль волны и увеличения амплитуды волны. Сравнение рассчитанного и зафиксированного в эксперименте увеличения амплитуды волны позволит проверить и уточнить механизм усиления волн.

### Методика и аппаратура

Эксперименты проводились в прямом канале с прозрачными стенками длиной 3 м, шириной 20 см, высотой 50 см. Глубина воды в канале составляла 30 см. В конце канала имеется прямоугольное расширение до 50 см для гашения возмущений. Скорость ветра в лабораторных экспериментах составляла 4–5 м·с<sup>-1</sup>, длина волны 5–6 см. Для измерения скорости потоков воздуха и воды использовались шарики полистирола плотностью 1.05 г·см<sup>-3</sup>, и пенопласта. Перемещение трассеров снималось на видеокамеру со скоростью 25 кадров в секунду. Скорости фонового потока определялись по трекам, возникающим на кадре за время экспозиции (0.022 с) при перемещении частиц. Дрейфовая скорость измерялась по перемещению частиц от кадра к кадру.

Для исследования вертикальной структуры поля скорости воздушного потока использовалось полупроводниковое сопротивление (1 кОм) в виде шарика с диаметром 0.1 мм. Одно сопротивление перегревалось относительно среды и использовалось для измерения скорости. На расстоянии 0.5 см (вдоль поперечной оси) от первого помещалось второе "холодное" сопротивление для измерения температуры окружающего воздуха, так как соотношение между сигналом и скоростью воздуха зависело от температуры среды. Сбор данных проводился на ПК с помощью АЦП платы с входным сопротивлением 100 ом. Доверительный интервал определения скорости воздуха для вероятности 0.67 составлял 0.1 см·с<sup>-1</sup>.

### Скорость потока воздуха над твердой поверхностью

В [7–8] подробно изучены особенности замедляющихся вдоль направления движения стационарных потоков воды. В [9] было показано, что в замедляющемся потоке воздуха над водой возникают волны под воздействием периодических колебаний давления при отрыве системы вихрей. На рис. 1 показана поверхность воды под замедляющимися и ускоряющимися потоками воздуха максимальной скорости  $u = 4 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$ .

Если поток воздуха ускоряется, что обеспечивается наклонной крышей, волны на поверхности не возникают. Под горизонтальной крышей поток тормозится, и сразу же появляются волны.

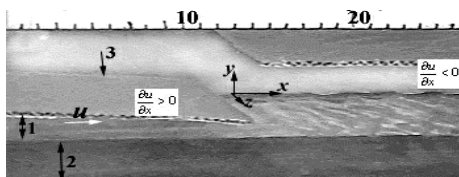


Рис.1 1-воздух, 2-вода, 3-крыша

Над взволнованной поверхностью воды сложно получить вертикальный профиль осредненной по времени скорости потока в тонком приповерхностном слое воздуха. Для решения этой задачи был проведен ряд экспериментов в канале с твердым плоским дном в замедляющихся и ускоряющихся потоках воздуха.

В замедляющихся потоках воздуха был обнаружен периодический отрыв вихрей у дна канала.

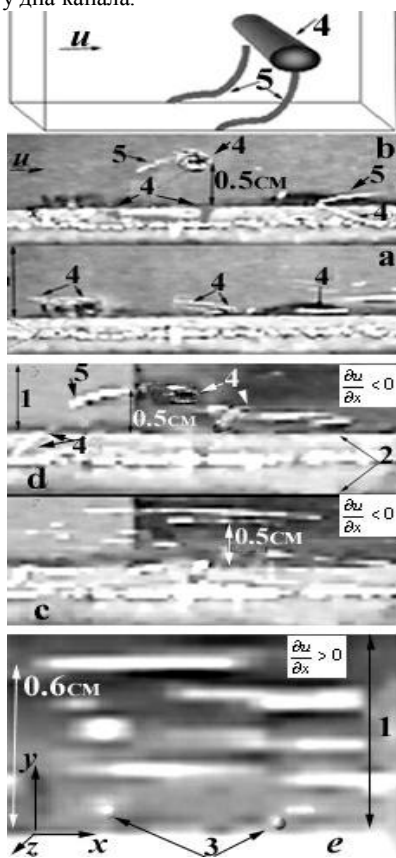


Рис.2. 1-воздух, 2-дно канала, 3-шарики пенопласта, 4-вихри, 5-концы вихрей

На рис.2 (а, б) приведены два последовательных кадра видеозаписи, показывающие придонную часть канала в потоке воздуха с максимальной скоростью  $u = 2.5 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$  (на высоте  $y=5 \text{ см}$ ) в момент вылета вихрей (а) и в момент максимального подъема циклоидальной траектории (б). За центральным вихрем на втором кадре хорошо виден конец, спускающийся к дну, как показано на схеме в верхней части рисунка. Вихри отрываются на одинаковом расстоянии друг от друга. После вылета вихрей на кадре б на дне видны новые вихри, в процессе формирования. Горизонтальные треки оставлены на кадрах частицами, двигающимися вместе с фоновым потоком воздуха за время экспозиции. На рис.2с приведен кадр, снятый в момент времени, предшествующий вылету вихря. Большое количество коротких треков показывает, что скорость потока перед вылетом вихря резко падает в слое, толщина которого  $\delta = 0.5 \text{ см}$  совпадает с максимальной высотой подъема вихря при первом перелете (2д). После вылета вихря произошло резкое увеличение скорости воздуха у дна канала.

Средняя величина придонной скорости фонового потока составляет  $u_0=12$  см·с<sup>-1</sup>, а на верхней границе  $\delta$  слоя  $u_\delta=60$  см·с<sup>-1</sup>. Распределение скорости по вертикальной координате в этом слое имеет линейный характер, соотношение  $u_\delta \cdot u_0^{-1} = 5$ , как и в замедляющихся потоках жидкости. Толщина слоя  $\delta$  в условиях данного эксперимента была в 10 раз меньше высоты, соответствующей максимуму скорости ветра  $u=2.5$  м·с<sup>-1</sup>, соотношение  $u \cdot u_0^{-1}=20$ .

В ускоряющемся потоке воздуха нет периодического торможения вязкого слоя у дна канала. На рис.2е показан придонный слой ускоряющегося потока воздуха. На дне видны неподвижные шарики диаметром 0.2 мм: сила трения полностью останавливает поток у дна. Полученные экспериментальные данные показывают, что скорость ускоряющегося потока жидкости у дна канала близка нулю, т.е. выполняются условия "прилипания", которые удобно использовать в теоретических моделях. При построении таких моделей для замедляющихся потоков необходимо вводить придонную скорость, обусловленную периодическим отрывом вязкого слоя. Постоянное действие силы трения в ускоряющемся потоке воздуха и периодический отрыв вязкого слоя в замедляющихся потоках создают разные условия для развития дрейфовой скорости на поверхности воды, вызванной силой трения.

### **Дрейфовая скорость в ускоряющемся потоке воздуха над водой**

Если поток воздуха над водной поверхностью ускоряется в направлении движения, то волны не возникают (рис.1), что позволяет исследовать дрейфовое течение на поверхности воды при отсутствии волн. В этой ситуации единственным источником возникновения дрейфового течения является сила трения. В [1] отмечается, что в отличие от волновой составляющей дрейфовой скорости, составляющая, связанная с силой трения изучена очень слабо.

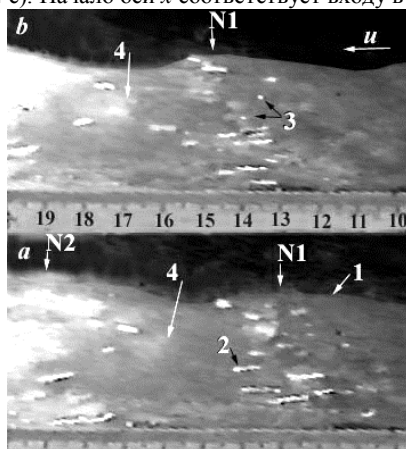
В канале под наклонной крышей была получена зависимость дрейфовой скорости  $u_{dr}$  от максимальной скорости ветра в поперечном сечении канала  $u$ . В диапазоне изменения скорости ветра от 1.5 до 5 м·с<sup>-1</sup> максимальное значение отношения  $u_{dr} \cdot u^{-1}$  менялось от значения 0.028 до 0.06. На входе в канал наблюдался быстрый рост дрейфовой скорости до значения  $u_{dr} \cdot u^{-1} = 0.03$  на участке протяженностью 50 см.

Измерения дрейфовой скорости, осредненной по длине волны, в натуральных и лабораторных исследованиях показывают, что отношение  $u_{dr} \cdot u^{-1}$  составляет по разным источникам от 0.08 до 0.05 [10-11]. В лабораторном эксперименте [11] по поверхности воды проходили группы волн (амплитуды  $a=1-2$ мм). Проводилась одновременная запись смещения водной поверхности и дрейфовой скорости. После прохода группы крутых волн на почти гладкой поверхности воды дрейфовая скорость увеличивается резким скачком в 4 раза. Среднее значение отношения  $u_{dr} \cdot u^{-1}$  для группы волн составляло 0.008, а для гладкой поверхности воды 0.03. Эти данные хорошо согласуются с результатами наших экспериментов.

Можно предположить, что уменьшение дрейфовой скорости на взволнованной поверхности воды связано с уменьшением силы трения в зоне замедления ветрового потока на заветренном склоне, обусловленным периодическим отрывом цилиндрических вихрей.

### Распределение скорости в воде и воздухе вдоль волны

В лабораторном эксперименте в канале с прозрачными стенками создавался воздушный поток высотой 10 см с максимальной скоростью на входе  $u=5 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$ . На поверхности слоя воды глубиной 30 см возникали волны длиной 5 – 6 см. Вертикальный профиль скорости ветра над гребнем волны был исследован с помощью анемометра. На высоте  $y=1 \text{ мм}$  был обнаружен максимум скорости. Амплитуда волн росла на начальном участке, показанном на рис. 3 (интервал между кадрами 0.04 с). Начало оси  $x$  соответствует входу в канал.



Амплитуда волны гребня N1 на первом кадре составляет  $a=0.13 \text{ см}$ ,  $\lambda=5.9 \text{ см}$  (крутизна волны  $ak=0.14$ ). На втором кадре амплитуда увеличивается до  $0.16 \text{ см}$ ,  $ak=0.17$ , фазовая скорость  $c=36 \text{ см}\cdot\text{с}^{-1}$ . Амплитуда волны гребня N2 на первом кадре равна  $0.29 \text{ см}$ ,  $ak=0.3$ . За этим крутым гребнем следует низкий гребень второй гармоники. На втором кадре этот гребешок отстает от основного, так как его фазовая скорость ниже из-за дисперсии.

Рис.3. 1-вода, 2-треки частиц, летящих в воздухе, 3- частицы в воде, 4-гребень второй гармоники.

На кадре видны белые треки, оставленные частицами, движущимися в воде и воздухе, за время экспозиции кадра. По трекам определялось распределение поверхностной дрейфовой скорости и скорости ветра вдоль волны (рис.4).

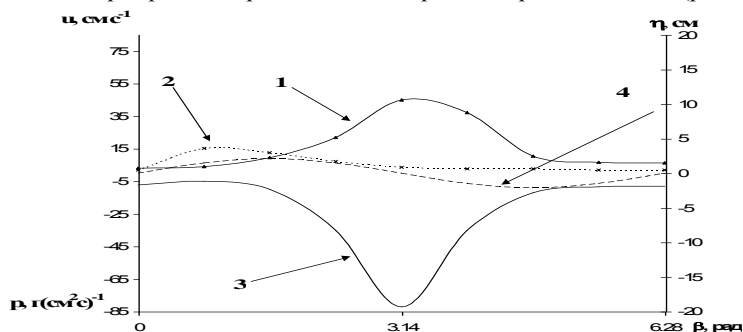


Рис.4 1-скорость воздуха, 2-дрейфовая скорость, 3-давление, 4-отклонение поверхности воды



Скорость ветра определялась по видеозаписи, сделанной видеокамерой, расположенной на уровне поверхности воды, и измерялась вдоль линии тока, прилегающей к поверхности воды. Приведенные данные представляют собой осредненные значения по 10 гребням волны для  $x=13$  см.

На заветренном склоне в зоне торможения потока воздуха приповерхностная скорость ветра имеет максимум  $u_s=50$  см·с<sup>-1</sup> и превышает фазовую скорость волны  $c=36$  см·с<sup>-1</sup>. Отношение максимальной скорости потока воздуха к приповерхностной скорости на заветренном склоне волны  $u \cdot u_s^{-1}=10$ .

Дрейфовая скорость на поверхности воды  $u_{dr}$  имеет максимальное значение на подветренном склоне. Отношение максимального значения дрейфовой скорости к максимальной скорости воздушного потока составляет 0.02, что обусловлено короткой длиной участка с положительным продольным градиентом скорости (2.5 см). Для той же скорости ветра в канале под наклонной крышей значение  $u_{dr} \cdot u_s^{-1}=0.3$  достигалось на участке 5см. На противоположном склоне волны это отношение падает до значения 0.01. Можно предположить, что это связано с периодической остановкой приводного слоя воздуха и отрывом цилиндрических вихрей.

### Образование вихрей в зоне торможения потока воздуха

Следуя результатам работ [7-8], период отрыва вихрей и расстояние между соседними вихрями определяются выражениями:

$$T = \left( \frac{\delta}{u_s \left| u_x^\delta \right| C_f} \right)^{1/2} \arctg \left( u_0 \sqrt{\frac{C_f}{u_s \left| u_x^\delta \right| \delta}} \right), \quad u_x^\delta = \left. \frac{\partial u}{\partial x} \right|_{y=\delta}, \quad u_\delta = 5u_s \quad (1)$$

$$s = Tu_s - \frac{\delta}{2C_f} \ln \left( 1 + u_s^2 \frac{C_f}{u_s \left| u_x^\delta \right| \delta} \right) \quad (2)$$

Здесь введены следующие обозначения:  $u_\delta$  – скорость потока на верхней границе придонного слоя толщиной  $\delta$ ,  $u_x^\delta$  – продольный градиент скорости основного течения для  $y=\delta$ ,  $C_f = 0.005$  – коэффициент трения скольжения воздуха по поверхности воды [7]. В эксперименте  $u_s = 50$  см·с<sup>-1</sup>,  $\delta = 0.05$  см, максимальное по модулю значение градиента скорости воздушного потока вдоль волновой поверхности в системе координат, связанной с волной,  $u_x^\delta = -ak^2(u_\delta - c) = -34$  с<sup>-1</sup>. В этой зоне вихри отрываются с периодом  $T=0.006$  с, расстояние между вихрями  $s=0.15$  см. Радиус вихря равен  $R = 2 \cdot \delta / 3$ .

Эксперименты показывают, что вихри начинают сворачиваться у поверхности раздела одновременно с началом торможения вязкого слоя потока. При этом вихри не меняют своего положения в пространстве. На рис.2 видно, что на месте вылетающих вихрей сразу же возникают новые вихри. Этот процесс удобнее наблюдать в более медленных потоках воды. На рис.5 приведены 4 последовательные кадры видеозаписи, изображающие придонный слой потока воды в процессе торможения после вылета вихря.

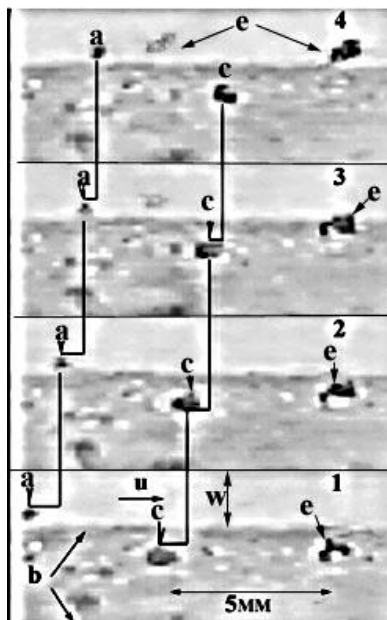


Рис.5 а,с-частицы, b-дно канала, w-вода, e-вихрь

Цепочка неподвижных вихрей находится у поверхности раздела тормозящегося потока жидкости в течение  $0.9T$  ( $T$  – периода отрыва вихрей). В условиях данного эксперимента период волны  $T_v = \frac{\lambda}{c} = 0.16$  с в 27 раз превышает период

отрыва вихрей  $T$ . Это позволяет не учитывать изменение формы волны за время  $T$  при исследовании воздействия вихрей на распределение давления у поверхности воды. Кроме того, размер основных вихрей, образующихся в воздухе над волной достаточно мал, для того, чтобы выполнялось критическое условие на расстояние между вихрями спутниками, при выполнении которого они начинают сближаться, сливаясь затем в один вихрь [8]. Этот вихрь образует с основным вихрем пару, улетающую от поверхности воды вверх. Это позволяет при расчете давления учитывать только возмущения от неподвижных вихрей.

### Распределение давления вдоль волны

Полученные данные позволяют оценить распределение стационарной составляющей давления воздуха вдоль поверхности волны. Давление  $p$  будет определяться интегралом Коши-Лагранжа для потенциального потока воздуха с вертикальным сдвигом скорости  $u(x,t) = u_s(t) + \chi y$ , имеющего начальную скорость  $u_0(t)$ , в вязком приводном  $\delta$  слое, при наличии цилиндрических вихрей, горизонтальная ось которых перпендикулярна направлению потока [12-14]:

Отрезками показано смещение частиц,двигающихся вместе с потоком. Длина отрезков уменьшается от кадра к кадру. В правой части кадров виден формирующийся вихрь, вращающийся по часовой стрелке, не меняющий своего положения. На последнем кадре виден вылет вихря в момент полной остановки придонного слоя потока.

$$p = -\rho_a \left[ \varphi_t + gy + (\dot{u}_0 x) + \frac{1}{2} (u_s - u_{dr} + \nabla \varphi)^2 - \chi \psi \right], \quad (3)$$

где  $\varphi$  – потенциал скорости возмущений,  $\rho_a$  – плотность воздуха,  $\psi$  – функция тока возмущений. В соответствии с полученными данными давление воздуха будет существенно меняться вдоль поверхности волны: на подветренном склоне оно будет определяться только разностью приповерхностной скорости воздуха и дрейфовой скоростью воды, а на заветренном – воздействием потока воздуха и вихрей.

Оценим вклад членов в давление (3) на заветренном склоне волны  $\eta = a \sin(kx)$  в зоне минимума отрицательного продольного градиента скорости (фаза волны  $\beta = \pi$ ), предполагая поверхность воды плоской. Разность скорости воздуха и дрейфовой скорости воды, представленная на рис.4, дает максимальный вклад в третье слагаемое  $10^3$  (см·с<sup>-1</sup>)<sup>2</sup>. Второе слагаемое имеет положительный знак при ускорении приповерхностного слоя сразу после вылета вихря (0.1T) от нуля до скорости  $u_0$  и отрицательный знак в интервал времени, когда этот слой замедляется до остановки (0.9 T) [8]. Поток ускоряется на отрезке длиной  $x = 0.02$ см до максимальной скорости  $u_0 = 50$  см·с<sup>-1</sup>. Вклад во второй член (3) составляет  $\dot{u}_{0,x} = 2500$  (см·с<sup>-1</sup>)<sup>2</sup>. Зависимость скорости слоя от времени на стадии торможения можно оценить по следующей формуле [8]:

$$u_0(t) = u_s - \sqrt{\frac{|u_\delta u_x^\delta| \delta}{C_f}} \operatorname{tg} \left( t \sqrt{\frac{|u_\delta u_x^\delta| C_f}{\delta}} \right) > 0, \quad t \sqrt{\frac{|u_\delta u_x^\delta| C_f}{\delta}} \ll \frac{\pi}{2} \quad (4)$$

Производная по времени равна:

$$\dot{u}_0 = - \left| u_\delta u_x^\delta \right| \left[ \cos^2 \left( t \sqrt{\frac{|u_\delta u_x^\delta| C_f}{\delta}} \right) \right]^{-1} < 0 \quad (5)$$

За период отрыва вихрей величина косинуса уменьшается до значения 0.99. Определяем среднее значение величины  $\dot{u}_0 x = -500$  (см·с<sup>-1</sup>)<sup>2</sup>. Суммируя все вычисленные члены, получаем максимальную оценку вклада фонового потока в (3):  $3 \cdot 10^3$  (см·с<sup>-1</sup>)<sup>2</sup>.

Оценим вклад в (3) возмущений, вносимых цилиндрическими вихрями, находящимися у границы раздела. В [7-8] показано, что при отрыве и приземлении вихрей их скорость у поверхности раздела равна нулю. Таким образом, для линии тока у поверхности воды вклад возмущений в третий член (3) равен нулю. Следуя [13] и учитывая, что скорость центра вихря вблизи границы раздела близка нулю, считая, что фоновый поток не имеет ускорения по вертикали, запишем выражение для производной по времени от потенциала скорости возмущений в системе координат связанной с центром вихря радиуса R [7-8]:

$$\varphi_t = (U_c - \dot{u}_c) \frac{R^2}{r} \cos \theta + \dot{V}_c \frac{R^2}{r} \sin \theta, \quad (6)$$

где  $u_c$  – скорость фонового потока на координате центра вихря,  $U_c$  и  $V_c$  – горизонтальная и вертикальная составляющие скорость вихря,  $r$ ,  $\theta$  – полярные координаты. Выражения для ускорения вихря получены в [12]:

$$\begin{aligned} \dot{U}_c &= \dot{u}_0 + (\chi + \omega)V_c \\ \dot{V}_c &= (\chi + \omega)(u_s + \chi y - U_c) \end{aligned} \quad (7)$$

Минимальное расстояние от центра вихря до границы раздела составляет  $2R$ , скорость вихря у поверхности раздела равна нулю. В приводном слое вертикальный градиент скорости  $\chi=4000 \text{ с}^{-1}$ , угловая скорость вращения вихря равна половине вертикального градиента скорости фонового потока [7]  $\omega = 2000 \text{ с}^{-1}$ , радиус вихря  $R = 0.02 \text{ см}$ . Получаем максимальную оценку выражения (6) для воздействия одного вихря на границу раздела, имеющую ту же горизонтальную координату:  $\varphi_t \leq 7 \cdot 10^3 \text{ (см} \cdot \text{с}^{-1})^2$ . Если учесть воздействие двух ближайших вихрей и усреднить на отрезке  $s$ , то эта величина оценивается как  $10^4 \text{ (см} \cdot \text{с}^{-1})^2$ .

Для функции тока возмущений для тех же условий, следуя [13]:

$$\psi = (U_c - u_c) \frac{R^2}{r} \sin \theta - (V_c) \frac{R^2}{r} \cos \theta - \frac{1}{4} \chi \frac{R^4}{r^2} \cos 2\theta - \frac{\gamma}{2\pi} \ln r \quad (8)$$

Учитывая, что циркуляция вихря  $\gamma = -2\pi R^2 \omega$ ,  $r$  – расстояние до центра вихря, получаем следующую усредненную по  $s$  оценку для вклада трех ближайших к исследуемой координате вихрей:  $\chi\psi \leq -70 \cdot 10^3 \text{ (см} \cdot \text{с}^{-1})^2$ . Сумма всех членов (3) можно оценить величиной  $p/\rho_a \leq -83 \cdot 10^3 \text{ (см} \cdot \text{с}^{-1})^2$  в зоне максимального торможения ветрового потока на наветренном склоне волны. Таким образом, последний член в (3) в пять раз превышает сумму остальных членов, причем положительный вклад дает последний член (8), не зависящий от угла  $\theta$ . Следует отметить, что этот член появляется в выражении для давления, если учитывается воздействие цилиндрического вихря и вертикального градиента скорости фонового потока  $\chi$ . Величина вклада зависит от расстояния между вихрями, которое определяется продольным градиентом скорости потока  $ak^2(u_s - c)\cos(kx)$ . Учитывая вклад трех ближайших основных вихрей с вихрями спутниками в возмущения для данной точки поверхности раздела, можно получить заниженную оценку амплитуды возмущения давления вдоль волновой поверхности (рис. 4).

Если разложить полученную функцию  $p(x)$  в ряд, то первая гармоника оказывается сдвинутой относительно поверхности волны на  $\pi/2$ , а амплитуда равна  $p_1=40 \text{ э/(см} \cdot \text{с}^2)$ . Минимум давления приходится на передний склон волны.

В [15] Ламб показывает, что для давления, заданного как  $p = C \cos kx$ ,  $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ , где  $\lambda$  – длина волны, отклонение поверхности воды для установившегося движения, когда приход энергии от ветра полностью расходуется на искусственно введенную работу силы трения, которая линейно зависит от скорости с коэффициентом  $\mu$ :

$$\rho g y = -\frac{kC}{\mu} \sin kx \quad (9)$$

Неопределенность, возникающую для  $\mu = 0$  Ламб трактует как свидетельство того, что в реальных процессах при таком распределении давления происходит перекачка энергии ветра в энергию волн. Нестационарную задачу усиления волн при таком распределении давления вдоль синусоидальной волны в линейной постановке решил Филлипс [16]. Для нелинейных волн малой крутизны  $ak < 0.2$  задача решена в [17]. Колебания давления на границе раздела, определяемые возмущениями, раскладываются в ряд:

$$p = p_0 + p_1 \cos(kx - \Omega t) + p_2 \cos 2(kx - \Omega t) \quad (10)$$

Для волн на глубокой воде для резонансного случая, когда длина волны совпадает с длиной волны возмущения давления, при равенстве частот

$$\Omega = \omega = kc = \sqrt{gk} \quad (11)$$

получено отклонение свободной поверхности (основная гармоника):

$$\eta(x, t) = -\frac{p_1 k}{2\rho_w \Omega^2} \sin kx \sin \Omega t + \frac{p_1 \Omega}{2\rho_w g} t \sin(kx - \Omega t) + \frac{p_2 k}{\rho_w \omega_{2k}} \left[ \frac{\cos(2kx + \omega_{2k} t)}{\omega_{2k} + 2\Omega} + \frac{\cos(2kx - \omega_{2k} t)}{\omega_{2k} - 2\Omega} \right] - \frac{2p_2 k}{\rho_w (\omega_{2k}^2 - 4\Omega^2)} \cos 2(kx - \Omega t) \quad (12)$$

где  $\omega_{2k} = \sqrt{2gk}$ . В качестве начальных условий принято нулевое отклонение поверхности воды. Рост амплитуды волны определяется выражением:

$$\frac{\partial a}{\partial t} = -\frac{p_1 \Omega}{2\rho_w g} \quad (13)$$

Если угловую скорость в (13) рассчитывать, используя экспериментальное значение фазовой скорости  $c = 36 \text{ см} \cdot \text{с}^{-1}$ , то для найденной амплитуды давления получаем скорость роста амплитуды волны:  $\frac{\partial a}{\partial t} = 0.78 \text{ см} \cdot \text{с}^{-1}$ . Экспериментальное

значение искомой величины в соответствии с данными рис.3 составляет  $0.8 \text{ см} \cdot \text{с}^{-1}$ . Расчетное и экспериментальное значения практически совпадают.

## Выводы.

Экспериментально исследовано поле скорости воздушного потока у поверхности воды в области усиления зародившихся ветровых волн. На наветренном склоне волны обнаружен максимум дрейфовой скорости воды и минимум скорости воздуха на приводной линии тока. На противоположном склоне волны обнаружен минимум дрейфовой скорости и максимум скорости ветра на приводной линии тока. Особенности поля скорости в воде и воздухе в зоне торможения ветрового потока обусловлены периодическим отрывом вихрей. С помощью интеграла Коши-Лагранжа рассчитано давление вдоль волны и скорость роста амплитуды волны. Расчеты подтверждаются экспериментальными данными. Основной вклад в амплитуду давления вносят возмущения цепочки вихрей, с учетом вертикального градиента скорости. Сравнение с экспериментальными данными без учета этого вклада, выполнявшееся ранее на основе других моделей, давало значительное расхождение расчетных и экспериментальных значений, что породило мнение ряда авторов об ошибочности всего подхода [2].

Работа выполнена при поддержке гранта Университеты России № 01.02.497.

### Литература

1. Кононкова Г.Е. Динамика морских волн. М.: изд. МГУ, 1969, 206 с.
2. Giovangeli J.P., Garat M.H. The influence of air flow separation on air sea interaction. //in The air-sea interface. Eds. by Donelan M. A., Hui W.H., Plant W.J., The University of Toronto Press. Toronto. 1996. P. 41-48.
3. Csanady G.T. Air-Sea momentum transfer by Means of Short-Crested Wavelets. //J/ Phys/ Oceanogr. 1985. № 15. P. 1486-1490.
4. Banner M.L., Melvill W.K. O the separation of air flow over water waves.// J. Fluid Mech. 1976. №77. P.825-832.
5. Kamura H., Toba Y. Ordered motion in the turbulent boundary layer over wind waves. // J. Fluid Mech. 1988. №197. P.105-119.
6. Kitaigorodskii S.A. The influence of breaking wind waves on aerodynamic roughness of the sea surface. in The air-sea interface. Eds. by Donelan M. A., Hui W.H., Plant W.J., The University of Toronto Press. Toronto. 1996. P. 177-186.
7. Волков П.Ю., Мартынов С.Л., Мельникова О.Н.и др. Оценка деформации поверхностей воды и песка в ветровом канале.// Известия АН, Физика атмосферы и океана, 2001. Т.37. № 6, С.834-841.
8. Егоров О.В., Мартынов С.Л., Мельникова О.Н. Влияние волнового характера скорости потока в придонном слое на формирование вихрей.// Известия РАН, серия физическая. 2002.Т.66. №12. С.1709-1715.
9. Достовалова К.В., Мельникова О.Н. Образование цилиндрических вихрей в приводном слое потока воздуха. //Известия АН. Серия физическая. 1998. Т.62. №12. С.2387-2392.
10. Huang N.E. Laboratory investigation of ocean surface roughness generation. //A.Brandt, S.E. Ramberg, M.F. Shlesinger (eds). Nonlinear Dynamics of ocean waves. World Scientific Press. Singapore. P. 128-149.
11. Caulliez G., Ricci N., Dupont R. On the coupling between the initial wind wave growth and the drift current structure.// in The air-sea interface. Eds. by Donelan M. A., Hui W.H., Plant W.J., The University of Toronto Press. Toronto. 1996. P. 27-34.
12. Жмур В.В. Дискровая модель мезомасштабного вихря в потоке со сдвигом скорости.// Океанология. 1988. Вып.5. С. 709-714
13. Бутов С.А., Волков П.Ю., Достовалова К.В., Жмур В.В., Мельникова О.Н. Влияние продольного градиента скорости потока на движение вихрей у границы раздела сред.// Изв. АН. Физика атмосферы и океана. 2002, Т. 38. № 1. С.109-118.
14. Новиков Е.А. Возбуждение поверхностных волн дискретными вихрями. // Изв. АН Физика атмосферы и океана. 1981. Т. 17. № 9. С. 956-964.
15. Ламб Г. Гидродинамика. М.-Л.: ОГИЗ ГОСТЕХИЗДАТ. 1947. С.498-500.
16. Phillips O. M. On the generation of waves by turbulent winds. //J. Fluid Mech. 2. P. 417-445.
17. Houry M., Kharif C., Giovanangeli J.P. Generation of gravity waves by a vortex street in air// in The air-sea interface. Eds. by Donelan M. A., Hui W.H., Plant W.J., The University of Toronto Press. Toronto. 1996. P. 83-90.

## ВЛИЯНИЕ ПОВЕРХНОСТНО-АКТИВНЫХ ВЕЩЕСТВ И ФЛОТАЦИИ НА ЗАРОЖДЕНИЕ ВЕТРОВЫХ СОЛИТОНОВ

Мочулин П.В., Шелковников Н.К.

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

Экспериментально показано, что увеличение концентрации поверхностно-активных веществ и количества флотации на поверхности жидкости в кольцевом аэрогидроканале при фиксированном значении ветра приводит к замедлению процесса образования ветровых солитонов, а дальнейшее увеличение этих параметров (ПАВ и флотации) – к его отсутствию.

Изучение уединенных волн на поверхности воды представляет интерес не только в научном плане, но и в практическом. В частности, знание параметров ветровых уединенных волн необходимо учитывать при проектировании и эксплуатации морских платформ, используемых для добычи нефти и газа. В последние годы в научной литературе появилось понятие метеоцунами [2]. Предполагается, что волны подобные цунами могут возникать под действием метеорологических факторов, в том числе под действием ветра. Это особенно важно для акваторий северных морей, где в основном и ведется строительство морских платформ. При этом важно знать, каким образом влияет на зарождение и параметры волн метеоцунами наличие на поверхности воды пакового льда и поверхностно – активных веществ. Работ в этом направлении явно недостаточно. Это объясняется тем, что в природных условиях измерения связаны с большими техническими трудностями и сложными гидрометеорологическими условиями, а теоретические исследования таких процессов осложнены необходимостью учета влияния ветра и решения уравнение Кортевега - Де Фриза с правой частью. Более результативным оказалось исследование ветровых уединенных волн в лабораторных условиях. Впервые ветровые солитоны в кольцевом аэрогидроканале были обнаружены на кафедре физики моря и вод суши МГУ имени М.В. Ломоносова [1].

Нами были проведены серии экспериментов в кольцевом аэрогидроканале с внутренним диаметром 165 см, внешним диаметром 202 см и высотой 40 см. Канал имел металлическое дно, боковые стенки его были изготовлены из оргстекла, благодаря чему через них можно было вести непосредственное наблюдение и осуществлять видео- и фотосъемку волн. Для создания воздушного потока использовался вентилятор, который нагнетал воздух в пространство между поверхностью

воды и крышкой канала через специальные раструбы. Вентилятор имел устройство, позволявшее регулировать поток воздуха, направляемый через рукава в канал от 3 до 15 м/с. Регистрация волн велась как при помощи видеосъемки, так и струнными волнографами, расположенными по периметру канала. Каждый волнограф представлял собой два параллельных электрода, изготовленных из нихромовой проволоки диаметром 0.5 мм и длиной 25 см, закрепленных на жесткой рамке. Волнографы включались в цепь генераторов переменного тока и модулированные таким образом сигналы подавались на плату АЦП компьютера, погрешность измерения волнографами составляла около 5%. Скорость ветра измерялась при помощи анемометрической вертушки, ошибка измерений скорости ветра не превышала 7 %.

Во время экспериментов канал заполнялся водой до заданной глубины и, при выбранном режиме, включалась ветровая установка. Непрерывная регистрация волн позволила детально проследить механизм зарождения ветровых уединенных волн: на поверхности жидкости возникала рябь, затем – периодические волны, высота  $h$  и длина  $\lambda$  которых со временем возрастали, а соотношение  $H/\lambda$  уменьшалось, т.е. формировалось условие мелководья. Со временем образовывалось несколько солитонов, постоянно взаимодействующих друг с другом, в результате чего оставался один из них.

Представляется важным исследование влияния ПАВ на процессы формирования ветрового солитона. Как известно, в океане повсеместно встречаются физико-химические неоднородности или аномалии поверхности океана, обусловленные поверхностными загрязнениями [6]. Они возникают как в результате деятельности человека, так и вследствие естественных процессов. Океанографические наблюдения показывают, что в настоящее время почти 20% площади Мирового океана покрыто органическими пленками, что, естественно, влияет на процесс генерации волн, а, следовательно, и на процесс развития ветровых уединенных волн. Согласно [3], гашение капиллярных волн поверхностно-активными веществами происходит за счет уменьшения поверхностного натяжения жидкости. В этом случае коэффициент затухания волн становится больше, чем на чистой воде [6]. Хотя наличие пленки ПАВ на водной поверхности оказывает непосредственное гасящее действие лишь на гравитационно-капиллярные волны, тем не менее, в результате нелинейных взаимодействий между компонентами волнового поля, происходит обмен энергией между короткими и длинными волнами, что приводит к уменьшению потока энергии к длинным гравитационным волнам. Таким образом, наличие поверхностно-активных веществ оказывает влияние на процессы развития ветровых волн и формирование уединенных волн на ранних стадиях их зарождения.

Для исследования влияния ПАВ на процесс формирования ветровых уединенных волн нами были проведены измерения в кольцевом аэрогидроканале при фиксированном значении ПАВ, при котором коэффициент поверхностного натяжения уменьшался более чем на 50%, по сравнению с чистой жидкостью. Полученные данные сопоставлялись с результатами измерений в чистой воде. Наличие ПАВ на поверхности жидкости приводило к гашению мелкомасштабных волн, что было причиной развития «длинноволнового» механизма формирования ветровых уединенных волн. Под ним понимается процесс, когда на начальном этапе наблюдались только длинноволновые колебания с амплитудой до 1 см. Это было обуслов-



лено тем, что ветер, действуя на практически гладкую водную поверхность, передавал энергию волнам в основном посредством нормальной составляющей давления, а не тангенциальной, как в случае отсутствия ПАВ. Такая ситуация продолжалась до тех пор, пока амплитуда волн не достигала некоторой величины, после которой происходило формирование нескольких уединенных волн с последующим их взаимодействием и образованием единственного солитона. На рис 1 показан график изменения длины волн в канале в ходе зарождения ветрового солитона. Видна значительная разница в динамике развития волн на начальной стадии (первая треть времени процесса) – непрерывное увеличение длины волн в чистой воде сильно отличается от «длинноволновой раскачки» поверхности жидкости в присутствии ПАВ. Необходимо отметить, что длительность фазы зарождения уединенной волны при «длинноволновом» механизме формирования занимала примерно в десять раз больше времени, чем при отсутствии ПАВ, а при значительном увеличении концентрации ПАВ, возникала ситуация, когда для развития «длинноволнового» механизма формирования волн энергии ветра было недостаточно. В таких случаях образование уединенных волн не происходило вообще.

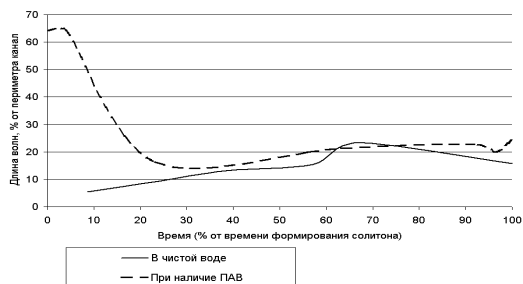


Рис. 1. Влияние поверхностно-активных веществ на механизм зарождения ветрового солитона.

Другой важной проблемой является изучения процессов зарождения ветровых солитонов на воде в присутствии флотации. Теория нелинейных волн на поверхности флотирующей жидкости была создана относительно недавно С.А. Габовым, который сформулировал основные уравнения и исследовал их свойства [4]. Наличие флотирующих масс приводит к смещению спектра волн в сторону малых волновых чисел и низких частот. Для длинноволновых и длиннопериодных составляющих спектра волн, заметной потери энергии в паковых льдах не происходит, но на начальной стадии зарождения солитона наличие флотации на поверхности жидкости является существенным фактором. Также необходимо отметить, что проведенные в [5] численные эксперименты по моделированию уединенной волны показывают некоторое отставание солитона во флотирующей жидкости от такой же волны, распространяющейся в жидкости без флотации. Причём эффект запаздывания усиливается по мере возрастания плотности флотирующего вещества.

Нами были проведены серии экспериментов вначале при чистой поверхности жидкости, а затем - при дискретном увеличении флотации. Прежде всего, нас интересовало, с какой скоростью и посредством каких механизмов происходило зарождение ветровой уединенной волны в этих условиях. Результаты проведения

экспериментов показаны на рис. 2, где приведена зависимость времени образования уединенной волны от количества флотации на верхней границе жидкости. Видно, что даже малое количество флотации (до 5% массы сформировавшегося солитона) резко замедляло образование солитона (рис 2а) – время формирования солитона увеличивалось до значения, в полтора раза большего, чем при чистой поверхности жидкости. При увеличении массы флотации, амплитуда солитона уменьшалась, а его длина увеличивалась. Более того, при дальнейшем увеличении количества флотации нами наблюдался «длинноволновый» механизм формирования уединенной волны, еще сильнее замедлявший формирование ветрового солитона. Так, например, флотация массой 20% от массы сформировавшейся уединенной волны увеличивала время образования солитона более чем на 10 минут (рис 2б), то есть в три раза по сравнению с чистой жидкостью. При еще больших значениях количества флотации, как и в экспериментах с ПАВ, образования ветрового солитона не происходило. Полученные данные могут быть полезны для понимания процессов, происходящих в условиях морей северных широт, акватория которых покрыта паковым льдом.

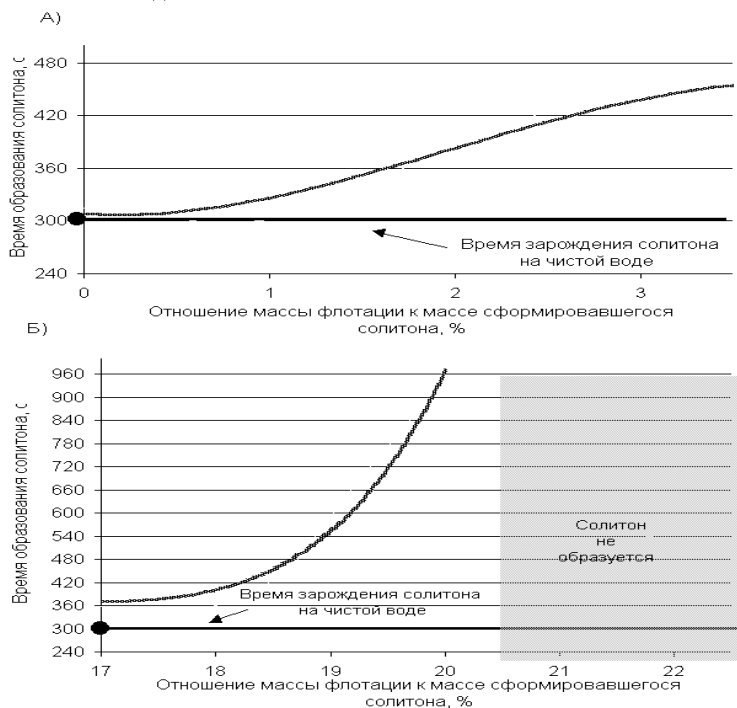


Рис. 2. Влияние флотации на время зарождения ветрового солитона.

## Литература

1. Шелковников Н.К. Ветровые уединенные волны в кольцевом аэрогидроканале // М.: МГУ. Деп в ВИНТИ 27.12.2002 № 2283-B2002 9с.

2. *Пелиновский Е.Н.* Гидродинамика волн цунами. // ИПФ РАН, Нижний Новгород, 1996г., 276с.
3. *Левич В.Г.* Физико-химическая гидродинамика // Госиздат физ-мат литературы, Москва, 1959, 699с.
4. *Габов С.А.* Новые задачи математической теории волн на воде // Наука, Москва, 1998.
5. *Кравцов Ал.В., Кравцов В.В. Шелковников Н.К.* Численные исследования уединенных волн в кольцевом канале при наличии флотации. // МГУ, Москва, Деп. в ВИНТИ 20.05.03 № 977 – В2003, 2003.
6. *Лазарев А.А. Показеев К.В. Шелковников Н.К.* Физико-химическая неоднородность поверхности океана и поверхностные волны. Часть 1 //Издательство Московского Университета, Москва, 1987, 91с.

## ФРОНТАЛЬНЫЙ МЕХАНИЗМ САМОСОХРАНЕНИЯ И САМООЧИЩЕНИЯ ОЗЕРА БАЙКАЛ И ЕГО ЭКОЛОГИЧЕСКОЕ ЗНАЧЕНИЕ

Шерстянкин П.П., Куимова Л.Н.

*Лимнологический институт СО РАН, г. Иркутск, E-mail:  
ppsherst@lin.irk.ru*

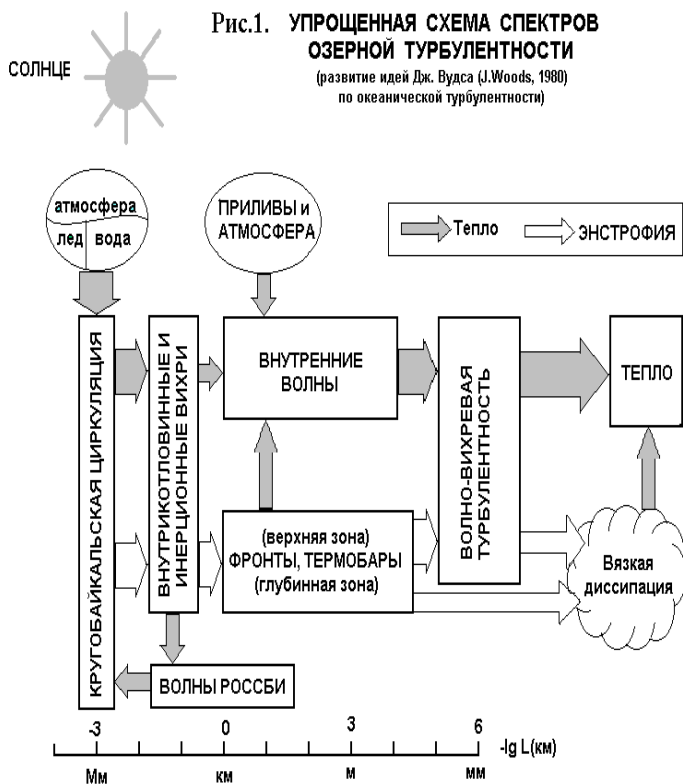
Байкал как озеро с уникальной биотой существует много миллионов лет. Какие механизмы осуществляют самоочищение и самосохранение озера? Когда они возникли? Для работы таких механизмов требуется огромная энергия. Откуда она берется? Здесь сознательно не рассматриваются биологические и другие механизмы самоочищения. Они есть, но они, с нашей точки зрения, работают на фоне и в сочетании с гидрофизическим механизмом, который, как и в Мировом океане, во многих случаях имеет фронтальную природу. Показать наши представления об этих проблемах и является задачей этой работы.

В спектрах океанической турбулентности фронты являются обязательным двойным каскадом, преобразующим энергию вихревого вращения, энтрофию, и тепловую энергию [25]. По аналогии с океаническими можно представить спектры озерной турбулентности для озера Байкал, так как это глубоководное озеро по своим гидродинамическим процессам отличается от океана не качественно, а количественно своими масштабами [20], рис. 1. Вся тепловая и кинетическая энергия, поступающая в байкальские воды, поступает от Солнца, включая взаимодействие водной поверхности с атмосферой и не учитывая тепло от внутреннего разогрева Земли.

Кинетическая энергия байкальских вод запасается в основном в течениях, в схеме которых выделяются: кругобайкальская циркуляция с линейными масштабами  $L \sim 640$  км, котловинные с  $L \sim 200$  и внутрикотловинные с  $L < 100$  км циркуляции или вихри [4, 12]. Из максимума прибрежных течений, реализующегося на некотором расстоянии от берега [2, 4], и уплотнения при смещении следует, что для условий Байкала (северное полушарие) в прибрежной области локализуются антициклонические, в открытой части озера - циклонические вихри, а фронтогенетическая (конвергентная) зона - в области максимума (стрезня) течений [22]. Анализ показывает, что все рассматриваемые вихри являются топографическими вих-

рями России. Области встречи котловинных и внутри котловинных вихрей в открытом Байкале (Академический хребет, Селенгинское мелководье, в Южном и Северном Байкале и др.) также являются зонами фронтов.

В чем заключается физический смысл фронтов как двойного каскада в спектре океанической или озерной турбулентности? Во-первых, это преобразование кинетической энергии вихрей – энстрофии, которое заключается в том, что горизонтальные движения вихрей с вертикальной осью преобразуются в вертикальные движения вихрей с горизонтальной осью, таким образом, что образуются зоны опускания, конвергенции и даунвеллинга и зоны подъема, дивергенции и апвеллинга [22]. Это означает, что в дивергентных и, особенно, конвергентных зонах нет физических оснований для существования внутренних волн, они вырождаются и не могут существовать и в местах их разрушения вблизи фронтальных зон происходит выделение тепла и проявляется для фронтов второй каскад - с преобразованием тепла, органически связанный с первым.



Тепло во фронтах получается напрямую от вязкой диссипации при разрушении и вырождении внутренних волн и опосредствованно через волно-вихревую турбулентность и, возможно, без прямого участия фронтов, рис. 1.

Фронты являются обязательным каскадом в турбулентном спектре водоема, преобразующем кинетическую энергию вращательного движения (энтрофия) и тепловую энергию и без их учета рассмотрение динамических и тепловых явлений не будет полноценным и корректным.

Физическая природа и структура байкальских фронтов упрощенно показана на схеме поперечного к фронту разреза, рис. 2. В общем

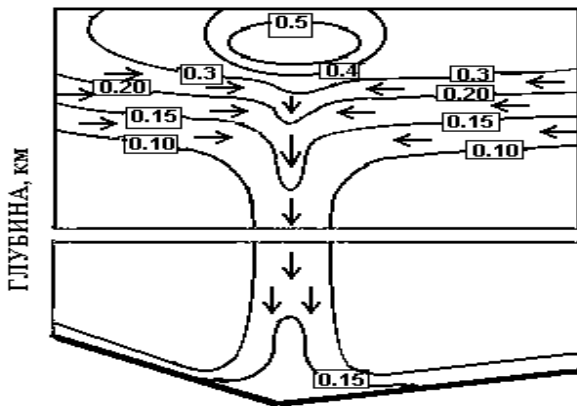


Рис. 2. Схема зарождения и структуры фронтов на Байкале по показателю ослабления направленного света ( $I/I_0$ ). Верхняя часть имеет толщину 0-0.1 км, нижняя - 0.1÷1.6 км. Стрелками схематично показано движение вод: вертикальными в конвергентной зоне в области разрушенного пикноклина; горизонтальными – в области устойчивого пикноклина.

случае, область зарождения фронта находится ниже слоя скачка плотности, пикноклина. Там, где нижняя часть пикноклина разрушена и возникает конвергентная зона фронта, которая поддерживается за счет слияния вод из нижних частей пикноклина, расположенных по разные стороны фронта. В конвергентной зоне происходит увеличение плотности воды за счет уплотнения при смешении разных по происхождению вод: прибрежных и открытого озера. Смешанные более плотные воды начинают тонуть и увлекают в этот процесс самые мутные воды из слоя скачка прозрачности, богатые растворенными и нерастворенными веществами и т.д.

Конвергентная зона, шириной порядка одного километра, достигает придонных слоев, образуя придонные слои повышенной мутности, которые могут достигать середины озера. В частном случае, когда пикноклин выходит на поверхность, фронты представляют собой известные термобары.

Ряд термодинамических, гидродинамических и экологически важных свойств фронтального механизма водообмена превращает его в гидрофизический фронтальный механизм самоочищения и самосохранения байкальских вод:

1. Конвергентная зона фронтов выполняет важнейшие функции механизма самоочищения:

а. Через слой скачка плотности, пикноклин, собирает взвесь, растворенные и нерастворенные вещества с прибрежных и центральных районов озера (область диапикнических процессов с замедленным вертикальным обменом), фактически по всему озеру, и препятствует прямому «загрязнению» глубинных слоев, способствует их изоляции от поверхностных;

б. Осуществляет вентиляцию придонных вод поверхностными водами из пикноклина в общем случае или с самой поверхности в случае термобаров (область изопикнических или близких к ним процессов);

в. Производит захоронение и утилизацию взвешенных и растворенных веществ в придонной области, обогащение ее кислородом и т.д. Область зарождения фронтов обычно прикрыта сверху ядром из мутных вод, и в периоды гомотермий, или близкие к ним, поднимается к поверхности. Глубинные фронты переходят в поверхностные фронты, термобары (весенние и осенние), и смешение самых плотных и мутных вод начинается с поверхности.

2. Конвергентная зона заполнена водами повышенной мутности и плотности, поэтому в этом месте происходит понижение уровня поверхности воды [14] и механизм фронтального обмена получает источник доступной потенциальной энергии.

3. Механизм фронтального обмена фактически является готовым физическим механизмом самоочистки и самосохранения вод, поскольку он решает все главные задачи, необходимые для этого механизма: сбор взвешенных и растворенных веществ; их транспортировку, постоянный «слив» в придонные области и уменьшает их контакт с водами центральных глубинных областей.

4. В зонах подъема вод, апвеллинга, реализуется принцип противотока, т.е. опять используется один из самых эффективных естественных способов самоочистки.

5. Скопление в конвергентных зонах взвеси, растворенной и нерастворенной органики и т.п. создает благоприятные условия для развития биоты; от микроформ от бактерий, утилизирующих органику до минеральных форм, до макроформ в виде рыб и т.п.; создания кормовой базы и имеет важное экологическое значение. Конвергентные зоны, фактически являются биогеохимическими реакторами водоемов.

6. С помощью постоянно действующих фронтов и на их основе механизма самоочистки и самосохранения на мелководьях, особенно в местах впадения крупных рек таких как Селенга, Верхняя Ангара с Кичерой, создаются биотопы, характерные черты которых даже входят в названия видов (рас) рыб, например, селенгинский, северобайкальский и т.д.

Таким образом, фронты являются как спусковым, так и рабочим механизмом самоочистки и самосохранения глубокого водоема (Байкала). Они осуществляют постоянный сбор мутных загрязненных вод из слоев скачка прибрежных и центральных областей озера и их «слив» по узким, шириной до 1 км, конвергентным зонам, опоясывающим весь Байкал, в придонные области, минуя ядра наиболее чистых прозрачных глубинных вод, рис.2.

Для понимания работы механизма самоочистки байкальских вод фронты необходимо рассматривать в рамках всего Байкала, фронтотенез, как минимум в масштабах полного поперечного разреза озера, а прибрежные течения по всему водоему, как показано на рис. 3.

Сезонный ход основных черт гидрофизического фронтального механизма самоочистки и самосохранения в течение года можно проследить по годовому ходу прибрежных течений [4, 5]. Наименьшие скорости течений в поверхностных слоях наблюдаются подо льдом и имеют порядок 3-5, но не более 10 см/сек. Отметим, что о полном вырождении течений в зимний период подо льдом речь не идет.



Течения подо льдом могут активизироваться топографией дна, неравномерным пропусканием солнечного излучения ледово-снежным покровом и другими причинами. Наибольшие скорости течений (свыше 40 см/с) наблюдаются в летний и осенний период [2, 4].

Прибрежные течения являются обязательным элементом байкальских (круго-, котловинных и внутрикотловинных) циркуляций, на некотором расстоянии от берега проходят через максимум – стрежень. Области стрежня прибрежных течений являются фронтогенетическими районами, как и участки встречных котловинных

На врезке показана схема фронтогенеза в прибрежных течениях Байкала [22].

1 – конвергентная зона, район стрежня прибрежных течений; 2 – горизонтальные (с вертикальной осью) и вертикальные (с горизонтальной осью) циркуляции; 3 – даунвеллинг; 4 – апвеллинг; течения направлены к читателю (5) и от читателя (6).

и внутри котловинных циркуляций, например, в районе разреза мыс Березовый – Танхой, вблизи Селенгинского мелководья, над Академическим хребтом и другие. Эти и другие фронтогенетические области Байкала показаны на рис. 3 и из этого следует, что фронты распространены по всему Байкалу.

Возникает естественный вопрос: почему, несмотря на широкую распространенность, фронты океанического типа были открыты не так давно, в 1991 г. [16]. Оказывается, что обнаружение фронтов, за исключением термобаров, которые хорошо просматриваются с поверхности, требует применения специальной методики: фронторазрешающей сетки станций. Это связано с тем, что обязательный элемент фронтов – конвергентная зона – имеет ширину не более 1 км и при редкой сетке станций, с расстояниями между станциями в несколько километров, фронты становятся «неуловимыми». Первые фронты были обнаружены на поперечном полуразрезе в Южном Байкале с шагом между станциями в 1 км в марте 1986 – 1990 гг. [17].

Была получена оценка вертикальных скоростей в конвергентных зонах подледных фронтов, которая имела порядок 0.07 см/с или 60 м/сутки или 22 км/год.

Рассмотрим схематически интенсивность вертикального обмена, инициируемого фронтами. Вертикальные скорости, полученные для конвергентной зоны в зимний период, будем рассматривать как среднегодовые, хотя они, скорее всего, ближе к минимальным. Например, в Южном Байкале на поперечном разрезе шириной в 1 км и длиной 30 км будут действовать две фронтальные конвергентные зоны и две зоны апвеллинга, рис. 3. При ширине конвергентной зоны в 1 км на рассматриваемом разрезе шириной также в 1 км за год опустится в течение года 22 км<sup>3</sup> воды и столько же поднимется (по закону сохранения) у крутого западного склона и в середине озера. Такая же картина должна наблюдаться у пологого восточного берега, значит, в опускании под западным и восточным берегом будут участвовать 44 км<sup>3</sup> воды и столько же в подъеме и в полном водообмене - 88 км<sup>3</sup>. Объем рассматриваемой поперечной полосы при треугольном профиле и максимальной глубине 1.4 км равен  $(1.4 \cdot 30 \cdot 1) / 2 = 21$  км<sup>3</sup>. Здесь не учитывается, что вертикальные скорости и водообмен в периоды весенней и осенней гомотермии должны быть гораздо выше. Отсюда следует, что только один фронтальный механизм способен в течение года, по крайней мере, четырежды полностью перемешать весь Байкал. Это подтверждается высоким содержанием кислорода в глубинной и придонной зонах [21]. По данным [23] полный водообмен в глубинной зоне

Южного Байкала происходит за 10-11 лет. В различии оценок водообмена в конвергентных зонах и глубинных центральных областях озера нет никаких противоречий, так как конвергентные зоны являются активными областями водообмена и высокие скорости опускания в них в узких границах конвергентной зоны приводят к гидродинамической изоляции центральных областей [19].

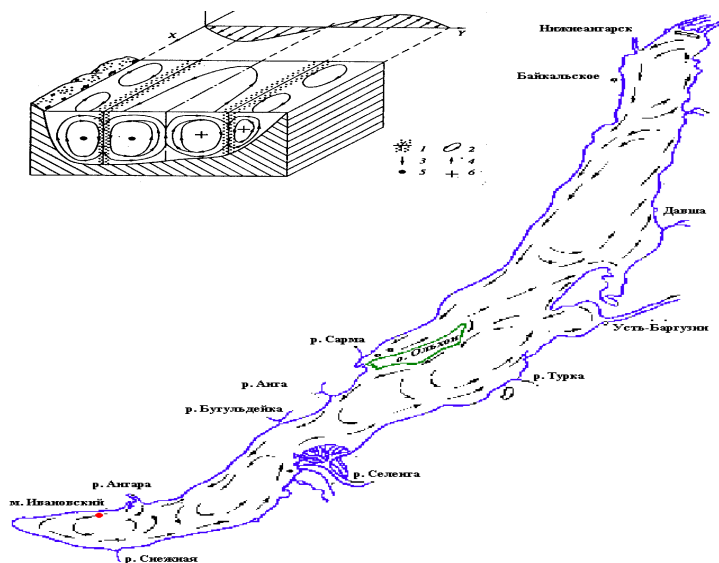


Рис. 3. Прибрежные течения на Байкале [4, 12].

Центральные области глубинных вод или ядра глубинных вод имеют замедленный водообмен по сравнению с фронтальными зонами и в этом заключается физический смысл формирования вертикальной структуры вод глубинных областей или физический смысл Механизма Самоочистения и Самосохранения вод озера.

По данным, которые получили с помощью нейтринного телескопа, максимальные пиковые вертикальные скорости  $W$  могут быть еще выше (сентябрь 1993 г.): 2.3 см/с или около 2 км/сутки, или примерно 700 км/год [3].

На морях и океанах по исследованиям К.Н.Федорова [14] синоптические фронты дают «наиболее эффективный механизм перемешивания (до 10-12 км/сутки) и переноса тепла и соли через гидростатически устойчивую толщу океанического пикноклина». Этот фронтальный парадокс К.Н.Федорова был разгадан при изучении байкальских фронтов: дело в том, что при формировании конвергентной зоны нижняя часть «устойчивого» пикноклина разрушается, а в верхней части гидростатически устойчивый пикноклин сохраняется [18], рис. 2.

В основе фронтов лежит явление гидродинамической неустойчивости. Оно дает эффективный пример применения глубоких физических аналогий, позволяю-

щих с единых позиций понять целый комплекс нелинейных диссипативных феноменов самоорганизации вихревых структур: в галактиках (спиральные рукава), в атмосферах планет (зональные течения и Большое Красное Пятно в атмосфере Юпитера), океанах, озерах, плазме и др. [10] и др.

Наиболее известными формами проявления фронтов на Байкале являются весенние и осенние термические барьеры (термобары), при которых глубины слоев скачка прозрачности, температуры и других параметров максимальны (по оптическим данным был зафиксирован слой скачка прозрачности на глубине 432 м). Хотя процессы конвективного перешивания во многом подобны, процессы, ведущие к гомотермии весной и осенью различны. Для весенней гомотермии ведущим процессом является объемное поглощение солнечной энергии, которое достигает максимума (день летнего солнцестояния), и ветровым перемешиванием можно пренебречь. Для осенней гомотермии все наоборот: ведущим процессом является ветровое перемешивание, а объемным поглощением, которое к тому же достигает годового минимума (день зимнего солнцестояния), можно пренебречь. Процессы конвекции при осенней гомотермии можно сравнить с некоторыми процессами конвекции в Средиземном море MEDOC [24], которые невозможно представить без ураганного и холодного мистрала.

Фронты на Байкале существуют круглый год и являются структурообразующими процессами. Явления интенсивного водообмена, так называемого вентилирования придонных вод поверхностными, было впервые замечено В.А. Толмачевым (1957) по гидрохимическим показателям и высокому содержанию кислорода в придонных областях у мыса Ухан острова Ольхон, вблизи от самых глубоких мест в Среднем Байкале, и у мыса Лиственничного в Южном Байкале. По мнению В.А. Толмачева, “динамически активная верхняя зона вод Байкала ... погружается вдоль подводных склонов на большие глубины” [13], но, если учесть, что станции наблюдений В.А. Толмачева были удалены от берега на 11 км [13], то речь здесь идет о наблюдениях в конвергентной зоне фронтов [18].

Для биоты важной особенностью фронтов является, что фронты, в строгом смысле, представляют собой совокупности пространственных градиентов различных гидрофизических, гидрохимических и других показателей, что очень важно для биоты и биохимических процессов [1, 6, 11].

Экологическая роль фронтов проявляется в основном в нескольких направлениях:

1. Вертикальный обмен захватывает всю толщу вод от поверхности или нижних частей слоя скачка (пикноклина) до дна, осуществляя вентиляцию придонных вод. Для озерной биоты это особенно важно, так как придонные воды насыщаются кислородом и не возникает заморных явлений.

2. Вся взвесь биологического и небиологического происхождения, которая собирается на слое скачка и вблизи от него в конвергентной зоне транспортируется в придонные слои, где и рассеивается, образуя донные отложения.

Рассмотрим одну из самых простых моделей фронтов, которая учитывает практически все основные характеристики их и основные условия, при которых они образуются. Основные характеристики фронтов:  $B$  – равновесная ширина фронта или ширина зоны смещения, км;  $W$  – вертикальная скорость опускания в конвергентной зоне, см/с. Основные характеристики условий возникновения фронтов:  $H$  – глубина, м или км;  $\rho_{TT}$  – двойная производная плотности по темпе-

ратуре, которая определяет уплотнение при смешении,  $\tau/\text{градус}^2$ ;  $K_1$  и  $K_z$  – коэффициенты горизонтальной и вертикальной диффузии,  $\text{см}^2/\text{с}$ ;  $\rho$  – скорость диффузии,  $\text{см}/\text{с}$  и др. Вертикальную скорость определим [9, 14] как:

$$W = gK_z1/2/(f/2)3/2 B^2 = K_1H/2B^2, \quad (1)$$

где  $g$  – ускорение свободного падения и  $f$  параметр Кориолиса. Из формулы (1) видно, что чем больше коэффициент горизонтальной  $K_1$  и или вертикальной диффузии  $K_z$  и чем меньше ширина равновесной зоны  $B$ , тем быстрее при прочих равных условиях происходит опускание воды за счет уплотнения при смешении и ряда других факторов. Выражая  $K_1$  через горизонтальные масштабы  $\tau$  и среднюю скорость диффузии  $\rho$  по формуле  $K_1 = \rho\tau/2$  и, полагая, что для случая фронтов  $\tau = B$ , получим [18]

$$W = \rho H/4B. \quad (2)$$

Для периода обратной температурной стратификации и близкого к осенней гомотермии для прибрежных районов было найдено, что  $\rho = 0.2 \text{ см}/\text{с}$  [16]. Если предположить, что порядок величины  $\rho$  сохраняется для прибрежной области в течение всего периода обратной стратификации (около семи месяцев), а также прямой [7], получим

$$W(\text{см}/\text{с}) = 0.05H/B, \quad (3)$$

где  $H$  и  $B$  выражаются в одних и тех же единицах длины [18].

Модель (формулы 2 и 3) дает разумные результаты как для фронтов под крутым северо-западным берегом Байкала, так и для термобаров Селенгинского мелководья.

Когда возник фронтальный механизм самоочищения и самосохранения озера Байкал и вид, близкий к современному ?

Свыше 5 миллионов лет назад климат на Байкале был субтропический со среднегодовыми температурами воздуха  $+10^\circ\text{C}$  и с температурами глубинных вод выше  $4^\circ\text{C}$ , температуры максимальной плотности  $T_{\text{мп}}$ . Режим перемешивания вод озера был мономиктический, регулярные повышения активности вертикального водообмена происходили один раз в году при сезонном понижении приходящей солнечной радиации (минимум в день зимнего солнцестояния – 21 декабря) и температур воздуха. Максимальное охлаждение поверхностных вод происходило в декабре-феврале, плотностная термическая конвекция также была максимальной и шла до дна. Современным аналогом таких событий является средиземноморская конвекция, MEDOC, для которой разность температур воды  $T$  и температур максимальной плотности  $T_{\text{мп}}$  или разность температур Менделеева  $T_{\text{Менд}} = T - T_{\text{мп}}$  приблизительно равна  $17^\circ\text{C}$ . Средиземноморская конвекция обладает большей интенсивностью и сопровождается жестокими штормами [24], тогда, как для байкальских условий разность температур Менделеева  $T_{\text{Менд}}$  гораздо меньше и равна примерно  $6^\circ\text{C}$ , уплотнение при охлаждении на Байкале примерно в три раза меньше, чем при MEDOC конвекции [8]. Кроме регулярного охлаждения поверхностных вод и соответственно усиления конвекции раз в году в течение года неко-

торые случаи охлаждения поверхностных вод носили спорадический характер и, хотя происходила кратковременная вентиляция придонных вод поверхностными, богатыми кислородом, в целом, это не спасало от заморных явлений на дне Байкала. Аналогом таких ситуаций может быть озеро Танганьика, но ситуация на Байкале была лучше за счет более значительных суточных колебаний температуры воздуха и поверхностных вод, что значительно усиливало суточную конвекцию.

Около трех миллионов лет назад среднегодовые температуры воздуха на Байкале упали до  $-6 \div -10^{\circ}\text{C}$ , что привело к резкому изменению гидрофизического режима на озере Байкал: температура глубинных вод стала меньше  $T_{\text{мп}}$  для поверхностных вод  $-4^{\circ}\text{C}$ , в поверхностных слоях стала появляться обратная температурная стратификация. Впоследствии среднегодовые температуры воздуха были и положительными, но результаты первоначального сильного выхолаживания озера с регулярными в годовом ходе обратными температурными стратификациями и ледовым покровом и сильных (великих) оледенений сохранились до сих пор.

Основные черты стратегии и тактики оптимального промышленного использования водных ресурсов озера Байкал

Рассмотрен гидрофизический фронтальный механизм само-очистения и само-сохранения (МСС) вод озера Байкал. Краткая сущность этого механизма заключается в следующем:

1. Иницирующей причиной зарождения фронтов на Байкале является проявление гидродинамической неустойчивости течений со сдвигом скорости, в частности прибрежных, в области максимума (стрежня) которых и рождаются фронты (рис.3, Шерстянкин, Куимова, Миненко, 1995). Гидродинамическая неустойчивость течений со сдвигом скорости не всегда ведет к турбулентности, хаосу (Незлин, Снежкин, 1990) и, как видно на этом примере, может приводить к образованию крупно масштабных диссипативных структур типа фронтов.

2. Фронт характерен созданием систем вихрей с вертикальными и горизонтальными осями.

Вихри с вертикальными осями это широко известные циркуляции: циклонические крупно масштабные с размерами  $L$  (км) – кругобайкальская,  $L \sim 640$ ; котловинные,  $L \sim 200$ ; межкотловинные,  $L \sim 100$ ; и др. ([4, 12] и др.) и антициклонические,  $L \sim 10$  и менее; которые имеют масштабы инерционных вихрей.

Вихри с горизонтальными осями - это прибрежные и захватывающие центральные области озера вертикальные циркуляции, в центрах которых сохраняются ядра чистых наиболее прозрачных байкальских вод.

3. В области стрежней прибрежных течений формируется самая активная область фронта – конвергентная зона, в которой, вследствие уплотнения при смешении вод и других динамических факторов, образуется область опускающихся вод (даунвеллинг). Конвергентная зона заполнена водами с пониженной прозрачностью из слоя скачка плотности (прозрачности, температуры и других характеристик) и простирается от поверхности или слоя скачка до придонной области, где образуется придонная область вод также с пониженной прозрачностью, но с высоким содержанием кислорода или осуществляется так называемая вентиляция придонных вод.

4. Предложена математическая модель трансфронтального водообмена по оценке вертикальных скоростей  $W$  в конвергентной зоне (формулы 2 и 3). Если считать, что зимой подо льдом вертикальные скорости  $W$  можно считать мини-

мальными (0.08 см/с или ~ 69 м/сутки, или ~22 км/год), то простые расчеты показывают, что это эквивалентно четырех кратному водообмену за год. Наблюдения в районе нейтринного телескопа дают пиковые максимальные значения  $W = 2.3$  см/с или ~ 1.9 км/сутки, или ~ 700 км/год [3]. Расчеты водообмена по тритию, для которых не применялась фронторазрешающая сетка станций, для Южного Байкала дали значения в 79 м/год [22]. Таким образом, можно считать это значение  $W$  дает возможность оценить уровень самоочищения и самосохранения байкальских вод в их ядрах прозрачности и указывает на гидродинамическую изолированность этих ядер [19].

Основные черты стратегии и тактики оптимального промышленного использования водных ресурсов озера Байкал должны учитывать свойства и характеристики природного гидрофизического фронтального механизма самоочищения и самосохранения. Антропогенные загрязнения, плотность которых меньше или близка к плотности байкальских вод, не сразу попадают и смешиваются с глубинными водами, а в начале по поверхности воды или по слою скачка плотности достигают конвергентной зоны, преодолевая для этого несколько километров от берега. За это время они проходят механическую очистку за счет гравитационного опускания, химическое разложение за счет процессов фотолиза на солнечном свете и т.д. и после этого опускаются в придонные слои воды и попадают в донные отложения. Таким образом, природный фронтальный механизм самоочищения и самосохранения сам по себе обладает экологическими свойствами. Антропогенные загрязнения, плотность которых существенно превышает плотность байкальской воды, сразу попадают в придонные области озера и наносят, тем или иным способом, вред байкальской биоте.

Специфический учет свойств байкальского фронтального механизма самоочищения и самосохранения должен учитываться при решении таких промышленных или социальных вопросах, как выбор мест для водозаборов или сбросов использованных вод, зон отдыха и других возможных источников потребления байкальской воды.

Использование научного потенциала и знаний об озере Байкал при промышленном и хозяйственном использовании даст возможность для устойчивого социального и промышленного развития этого региона и сохранении озера Байкал как Участка Мирового Наследия.

Работа поддержана РФФИ, грант РФФИ № 96-05-65850, № 01-05-65097, № 02-05-65345.

### **Литература:**

1. Айзатулин Т.А., В.Л.Лебедев, К.М.Хайлов, 1974. Океан как динамическая система. 1979. Океан. Активные поверхности и жизнь. 1984. ОКЕАН. Фронты, дисперсия, жизнь. Л. Гидрометеиздат, 192 с.
2. Айнбунд М.М., 1973. В сб. Режим и исследования озер и водохранилищ. Тр.ГГИ, Вып. 246, с.3.
3. Белолопиков И.А., Безруков Л.Б., Борисовец Б.А и др., 1998. О нестационарности потоков глубинных байкальских вод по данным нейтринного телескопа. ФАО, т. 34, № 1, с. 90-96.
4. Верболов В.И., 1977. Течения в Байкале. Новосибирск, Наука, 160 с.

5. Верболов В.И., 1996. Течения и водообмен в Байкале. Водные ресурсы, т.23, №4, сс.413-423.
6. Вернадский В.И., 1968. Биосфера. М.: Мысль. 374 с.
7. Коротенко К.А., Сухов А.Л., 1991. Экспериментальные исследования процессов турбулентной диффузии вещества в Южном и Среднем Байкале. В сб.: Гидрофизика и гидрология водоемов. Новосибирск: Наука, с. 30 – 36.
8. Куимова Л.Н., Шерстянкин П.П. 2003. Развитие гидрофизических процессов при переходе от субтропического к умеренному климату на озере Байкал в последние 5 миллионов лет. Докл. РАН, т. 390, № 3, с.396-401.

### СЕКЦИЯ 3

## ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ ФИЗИКИ ЗЕМЛИ

# ИЗМЕНЕНИЕ ГЕОФИЗИЧЕСКОЙ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ ФУНКЦИИ ЛИТОСФЕРЫ В УСЛОВИЯХ ТЕХНОГЕНЕЗА

Жигалин А.Д. (\*), Зилинг Д.Г., Трофимов В.Т. (\*\*)

(\* *Институт геоэкологии РАН*

(\*\*) *Московский государственный университет им. М.В.  
Ломоносова, Геологический факультет*

Геофизическая экологическая функция литосферы определяется как функция, отражающая свойства геофизических полей литосферы природного и техногенного происхождения влиять на состояние биоты и здоровье человека, как «способность» литосферы обеспечивать и поддерживать на поверхности планеты и в приповерхностной ее части, сверху и снизу, энергетические условия, пригодные для существования живых организмов [1].

Непрерывно осуществляемый процесс энергетического обмена между живой и косной природой включает также физическое (энергетическое) воздействие окружающего пространства (среды обитания) на объекты биосферы. Различие геофизических условий во многом определяет географическую (климатическую) зональность расселения растений и животных, создавая все многообразие биосферной оболочки нашей планеты.

Энергетическое воздействие окружающей среды на живые организмы осуществляется через природные геофизические поля, важнейшими для жизни из которых являются гравитационное, температурное, геомагнитное и электромагнит-

ное, и физические поля искусственного происхождения (техногенные физические поля), являющиеся неотъемлемым атрибутом современных технологий. Суперпозиция и взаимодействие природных геофизических и техногенных физических полей приводит к резкому усложнению картины их распределения в верхней части литосферы, появлению новых (в количественном и качественном отношении) аномалий. Глубина проникновения ощутимого техногенного физического воздействия в толщу литосферного пространства составляет десятки, иногда сотни, метров.

В процессе длительного периода геологической коэволюции литосферы, геофизической обстановки и биосферы сформировалось динамическое энергетическое равновесие между планетой и населяющими ее живыми организмами. Всякое отклонение от «привычных» энергетических условий может нести с собой опасность возникновения негативных для биосферы и человека как ее части последствий. В истории Земли такие эпизоды известны – это периоды оледенения (резкого изменения температурного режима поверхности планеты), повлекшие за собой биокатастрофы, инверсии (смена полярности) геомагнитного поля, сопровождаемые значительным (на 70-80%) снижением защитных свойств магнитосферы, последствия которых в явном виде не обнаружены, и их идентификация ждет своего часа, катастрофические извержения вулканов и разрушительные землетрясения. Современная технократическая цивилизация также богата примерами губительного воздействия, в том числе и физического, на биосферу. Ответной реакцией живых организмов на оказываемое физическое воздействие является, в соответствие с принципом Ле Шателье-Брауна, адаптация, полная или частичная, кратковременная или устойчивая [4]. Возможность живых организмов приспособляться к изменяющимся условиям определяется соотношением энергии воздействия и адаптационным потенциалом представителей биосферы. При достижении определенного уровня воздействия возможны патологические изменения в живых организмах, представляющие собой своего рода «плату» за жизнь в условиях, в том числе и энергетических, отличающихся от нормальных для данной формы жизни.

Создание за счет мыслительной деятельности человека, его труда и искусства техносферы (ноосферы), в идеале предназначенной для улучшения условий труда и быта человека, сопровождалось стремительным ростом энергетического потенциала. На рубеже XX и XXI веков количество ежегодно создаваемой энергии достигло примерно 145 Эдж (1 эксаджоуль равен 10<sup>18</sup> Дж). Такое количество энергии сопоставимо с энергией, выделяемой при сильных землетрясениях, извержениях вулканов и термоядерных взрывах. Производство и использование энергии, в первую очередь электрической и тепловой, является в настоящую эпоху основным мировым показателем уровня промышленного развития. В то же время большое количество производимой и потребляемой энергии породило феномен техногенного физического загрязнения, оказавшийся существенным фактором изменения геофизической экологической функции литосферы [2,3].

Современные технологии предполагают использование энергии в самых разнообразных ее формах. Распределяясь по разным отраслям хозяйственной, научной и военной деятельности, обращающаяся энергия многократно переходит из одного вида в другие (электрическую, тепловую, механическую, химическую и др.), теряясь в окружающем геологическом пространстве. Статистика показывает, что при транспортировке и потреблении теряется примерно 12% электрической и



4% тепловой энергии, что составляет в совокупности примерно 20 Эдж. Теряемая энергия и формирует так называемое техногенное физическое (энергетическое) загрязнение. Таблица 1 помогает представить, какие из видов техногенных физических полей присущи тому или иному виду деятельности, и, соответственно, показывает, какого вида воздействие на природную среду и экосистемы оказывают различные отрасли хозяйства. Из таблицы 1 следует, что основными «возмутителями» являются промышленная деятельность, из которой следует дополнительно выделить горнодобывающую, производство энергии и транспортные перевозки. Не последнюю роль играет также такая форма деятельности, как ведение городского коммунального хозяйства. Показатели для военной деятельности относятся ко времени отсутствия боевых действий, когда часть этой деятельности «скрыта» в промышленной и научной формах. В случае военных конфликтов, тому есть немало примеров, воздействие на литосферу существенно возрастает, что влечет за собой кардинальные изменения ее геофизической экологической функции.

Видоизменение энергии в процессе ее производства, потери при передаче и потреблении приводят к расширению спектра энергетического загрязнения среды. Наибольший вклад в техногенное физическое загрязнение привносится электромагнитным, акустическим и температурным полями, а также полем техногенной виброемиссии (в первую очередь полем вибрации). Существенную роль играет также изменение радиационного фона. Физическое загрязнение, обусловленное влиянием полей указанных видов, имеет по большей части локальный характер, но может выходить и на региональный таксономический уровень. При этом литосфера, ее самая верхняя обитаемая часть, играет роль среды-носителя физических полей, что несомненно отражается на ее качестве как природного комплекса, обесценивающего энергетические условия существования биосферы.

Техногенное физическое воздействие и загрязнение, благодаря присущему им энергетическому характеру, принципиально отличаются от других видов воздействия и загрязнения (химического и биологического), являющихся вещественными по своей сути. Не будучи в состоянии воспринять полностью поступающую в избытке энергию техногенных физических полей, геологическая среда (верхняя интерактивная часть литосферы) реагирует на ее поступление изменением своих свойств, следствием чего и является трансформация геофизической экологической функции литосферы.

Техногенные физические поля по своим характеристикам, как правило, превосходят природные аналоги, что способствовало образованию с течением времени новой оболочки нашей планеты – энергосферы – единого электромагнитного поля, между земной поверхностью и ионосферой, а также существенному изменению температурного режима верхних слоев литосферы, приведшему в ряде областей к деградации и частичному исчезновению многолетнемерзлых пород, формированию тепловых «куполов и шапок» на территориях мегаполисов и крупных промышленно-городских агломераций, и радиационного фона. В таблице 2 приведены в сопоставлении характеристические параметры некоторых видов физических полей природного происхождения и их техногенных аналогов. Из таблицы 2 следует, что в большинстве случаев, параметры техногенных физических полей имеют существенно большие величины, если сравнивать их с уровнем естественных, фоновых, полей. Так, если для радиационного поля такое различие составляет 1,2-1,5 раза, для акустического 3-4 раза, для температурного поля – десятки раз, то

для вибросейсмического поля разница достигает уже трех порядков, а для электромагнитного и того больше – 8-9 порядков.

Большинство источников техногенных физических полей сосредоточены в местах интенсивного освоения пространства планеты – в пределах крупных промышленно-городских агломераций (мегаполисов), промышленных центров и т.п. На этих территориях как правило наблюдается наиболее высокая плотность населения. Там же производится и используется основная часть обрабатываемой энергии. Так, например, Москва, один из крупнейших мегаполисов мира, в течение года производит в среднем  $2,15 \cdot 10^{17}$  Дж энергии, что соответствует реализации мощности в  $6,82 \cdot 10^3$  МВт. Это примерно в полтора раза превышает мощность Братской ГЭС ( $4,1 \cdot 10^3$  МВт) и сопоставимо с мощностью Красноярской ГЭС ( $6,0 \cdot 10^3$  МВт). Как следствие этого в пределах промышленно-городских агломераций и областей интенсивного хозяйственного освоения (областей техногенеза) формируются зоны, характеризующиеся существенными изменениями геофизической экологической функции литосферы.

В пределах урбанизированных территорий и территорий интенсивного промышленного использования природные экологические системы практически полностью перешли в категорию природно-технических экосистем, и именно там наиболее сильно ощущается техногенное физическое (энергетическое) воздействие. Для природно-технических систем характерно изменение природного компонента, выражающееся в «обеднении» растительного и животного мира, в преобладании устойчивых к воздействию видов животных и растений. Глубина изменения исходных природных экосистем при переходе их в категорию природно-технических определяется потенциалом оказываемого воздействия, в том числе физического. Так, увеличение уровня шума (акустическое воздействие) приводит к значительному сокращению в пределах городских территорий числа видов гнездящихся птиц, оставляя горожанам в основном ворон, воробьев и голубей. Изменение температурного режима верхних обжитых слоев литосферы приводит в случае поступления дополнительного тепла к увеличению вегетационного периода растений, смене растительного покрова, увеличению биомассы в открытых перестояющих замерзать на зимний период водоемах.

Особо следует остановиться на роли техногенного радиационного загрязнения. Экстраординарные события, такие как катастрофические аварии на атомных электростанциях или предприятиях атомной промышленности, могут существенно изменять радиационный фон на региональном и даже в отдельных случаях на глобальном уровнях, чему способствует циркуляция атмосферы. К счастью, такого рода события происходят не часто. Однако во многих городах существуют предприятия и учреждения (в первую очередь научные и медицинские), располагающие ядерными установками и радиоактивными материалами, используемыми в производственных, научных и терапевтических целях. Ядерные технологии предусматривают сложные и достаточно надежные способы защиты от радиоактивного облучения как персонала соответствующих предприятий, так и населения на прилегающих территориях. Однако в аварийных случаях, когда ядерный процесс выходит из-под контроля, возможно значительное превышение уровня радиации не только над фоновым, но и над допустимым санитарным уровнем. Подтверждением этого служит ряд известных событий, к числу которых можно отнести аварии на АЭС в Тримайл-Айленде (США) в 1979 г., на Чернобыльской АЭС в 1986 г., ава-

рии на предприятиях, связанных с переработкой радиоактивных материалов, – на ПО «Маяк» (СССР, Челябинская обл.) в 1957 г., на военном заводе в Уиндскейле (Великобритания) в 1957 г. и др. Существует также фактор «остаточного» увеличения фона радиоактивности, сформировавшийся во второй половине прошлого XX столетия вследствие проводившихся в атмосфере ядерных испытаний. Радиоактивное «эхо» этих событий ощущается до сих пор как в виде глобального увеличения радиоактивного фона, так и в виде повышенного содержания радионуклидов в почвенном слое, растительности, мясе животных и т.п. [5].

Эволюционная приспособленность живых организмов, и в том числе человека, к энергетическому фону, создаваемому природными геофизическими полями, надежно защищает их от естественных флюктуаций, но оказывается недостаточной при резком увеличении уровня техногенного физического воздействия, характерном для современного состояния ноосферы (техносферы). Значительные изменения свойств природных и техногенных, в первую очередь техногенных, физических полей несет с собой опасность негативных для биоты в целом и, в частности для здоровья человека, последствий либо непосредственно при наблюдаемых изменениях, либо через отдаленные, иногда довольно значительные, промежутки времени. В условиях возрастающего природно-техногенного (в первую очередь техногенного) физического воздействия живым организмам, в том числе и человеку, приходится адаптироваться к новой обстановке, которая не всегда «укладывается» в рамки приспособительных реакций представителей растительного и животного мира, что вызывает определенную дисгармонию в их существовании и нарушение принципов коэволюции экосистем различного иерархического уровня.

Повышенный уровень суммарного геофизического воздействия неизбежно приводит к трансформации геофизической экологической функции литосферы, являющейся средой-носителем геофизических полей и регулятором энергетического обмена между литосферой и биосферой. Трансформация геофизической экологической функции литосферы при этом сводится не к изменению ее фундаментального свойства обеспечивать энергетический обмен в геоэкосистемах, а к изменению энергетического потенциала, значительное увеличение которого может достичь пределов устойчивого существования компонентов экосистем. Следует заметить, что при определенных уровнях техногенного физического воздействия, свойства геофизической экологической функции могут измениться кардинальным образом и из поддерживающих жизнь (витагенных) превратиться в свою противоположность – стать угнетающим, или патогенным, фактором. В таблице 3 приведены данные, показывающие, как и при каких численно определенных уровнях воздействия дискретно изменяется общая экологическая обстановка и какие последствия вызываются происходящими изменениями. Данные, приведенные в таблице 3, касаются только психической и физиологической реакций человека на изменение условий среды жизнедеятельности. При дискретном изменении уровня природно-техногенного физического воздействия от слабого до опасного условия жизнедеятельности (психическая реакция населения) изменяются от комфортных, когда геофизическая обстановка практически не отличается от естественной фоновой, до опасных для проживания. При той же последовательности изменения условий физиологическая реакция организма, сначала квалифицируемая как «здоровье», переходит через «напряжение» и «утомление» к «болезни», то есть сигнализирует об опасности существования в новых условиях. В таблице 3 анализиру-



|  |     |     |     |     |   |    |   |    |
|--|-----|-----|-----|-----|---|----|---|----|
| Горнодобывающая                                  | *** | *** | *** | *** | * | ** | * | *  |
| Промышленная                                     | *** | *** | *** | *** | * | ** | * | ** |
| Научная  | *   | *   | *   | *   | * | *  | * | *  |
| Производство энергии                             | *** | *** | **  | **  | * | *  | * | *  |
| Городское строительство и коммунальное хозяйство | *** | **  | *** | *** | * | *  |   | *  |
| Сельскохозяйственная                             | *   | **  |     | *   |   | *  |   |    |
| Транспортные перевозки                           |     | *** | *** | *** |   |    | * | *  |
| Военная  | *   | **  | **  | **  | * | *  |   |    |

Примечания: число звездочек характеризует уровень оказываемого воздействия, чем их больше, тем сильнее воздействие (для военной деятельности показатели соответствуют «мирному» времени)

**Таблица 2 – Сравнительные характеристики некоторых природных физических полей и их техногенных аналогов**

| Вид поля   | Величина характеризующего параметра             |                  | Нормативные ограничения |
|--|---|------------------|-------------------------|
|  | естественное поле                               | техногенное поле |                         |
| Температурное (°С)<br>Значения, наблюдаемые на поверхности<br>Границы жизни  | от – 88 до + 58<br><br>от – 200 до + 250        | от -160 до +1500 | 16-24                   |
| Акустическое (дБ(А))   | 25-30   | 80-140           | 45-60                   |
| Электромагнитное (10-6 В/м)<br>Фоновые значения<br>Вариации<br>Наблюдаемые аномалии                                | 0,1-10<br>100-200<br>до 30-40                   | (2,5-10,0)·109   | 5,0·109                 |
| Сейсмическое (мм/с; (мм/с <sup>2</sup> ))<br>Уровень микросейсм<br>Землетрясение 3 балла<br>Землетрясение 5 баллов | 0,02-0,50<br>2,5-5,0 (30-60)<br>10-20 (120-250) | 0,02-16,0        | 0,12 (0,20-0,40)        |
| Радиационное (10-3 Гр/год)<br>Фоновые значения<br>Наблюдаемые значения   | 1,2-1,3<br>20-90                                | 1,6              | 2,1                     |

**Таблица 3 – Влияние физических полей на экологическую обстановку**

| Природное и техногенное физическое воздействие |                                   |                                   |  |                                   | Экологические характеристики        |                              |  |
|--|-----------------------------------|-----------------------------------|--|-----------------------------------|-------------------------------------|------------------------------|--|
| Уровень (индекс) воздействия                   | Виды воздействия                  |                                   |  |                                   | Условия жизнедеятельности населения | Состояние организма человека |  |
|  | акустическое, уровень шума, дБ(А) | вибрационное, виброскорость, мм/с | электромагнитное, напряженность поля, кВ/м | Радиоактивное, доза излучения, Гр |                                     | качественная оценка          | заболеваемость, отклонение от нормы, % |
| Слабое   | < 30                              | < 0,31                            | < 5  | < 0,25                            | комфорт                             | здоровье                     | < 30                                   |
| Умеренное                                      | 30-65                             | 0,31-2,5                          | 5-10                                       | 0,25-1,0                          | дискомфорт                          | напряжение                   | 31-50                                  |
| Сильное  | 65-100                            | 2,5-94                            | 10-25                                      | 1,0-4,0                           | сильный дискомфорт                  | утомление                    | 51-74                                  |

|         |       |      |      |       |                |         |      |
|---------|-------|------|------|-------|----------------|---------|------|
| Опасное | > 100 | > 94 | > 25 | > 4,0 | опас-<br>ность | болезнь | > 74 |
|---------|-------|------|------|-------|----------------|---------|------|

### Литература

1. Экологические функции литосферы /В.Т. Трофимов, Д.Г. Зилинг, Т.А. Барашкина и др.; Под ред. В.Т. Трофимова. М.: Изд-во МГУ, 2000. 432 с.
2. Жигалин А.Д. Техногенные физические поля. // Природа, 1993, № 2. С. 15-23
3. Богословский В.А., Жигалин А.Д., Хмелевской В.К. Экологическая геофизика. М.: Изд-во МГУ, 2000. 256 с.
4. Кожевина Л.С., Кофф Г.Л., Жигалин А.Д. Общие принципы устойчивости городской экосистемы. / Геозкология, 1997, № 4. С. 55-64

## ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ ПОСЛЕДСТВИЯ ИСКУССТВЕННОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ

### НА НЕКОТОРЫЕ ПРИРОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ

А.Д. Жигалин, А.В. Николаев, С.Д. Васютинская

*Институт геоэкологии РАН*

Энергетические возможности современной цивилизации в верхних своих пределах в значительной мере перекрывают энергетические интервалы, характеризующие некоторые геологические процессы, а также процессы, протекающие в мировом океане и приземных слоях атмосферы. При сопоставлении энергетических параметров, характеризующих природные процессы (диапазон от 106 до 1032 Дж), и возможностей человечества на современном уровне технологий (до 1018 Дж), становится очевидной техногенная уязвимость природной среды, в частности литосферы, мирового океана и атмосферы.

Эксперименты по воздействию на литосферу, проводимые с источниками энергии большой мощности, показывают, что можно влиять на режим сейсмичности, снижая риск катастрофических сейсмических событий или, наоборот, провоцируя так называемые техногенные землетрясения. Это явление известно как наведенная сейсмичность.

Наведенной, или индуцированной, сейсмичностью называют сейсмопроявления, вызванные природными или техногенными внешними воздействиями. Наведенная сейсмичность выражается обычно либо в уменьшении временных интервалов между отдельными подземными толчками в сейсмически активных зонах, либо в возникновении ощутимых землетрясений в тех регионах, которые традиционно относятся к сейсмически мало активным. Внешними воздействиями, способными вызывать землетрясения различной интенсивности, могут оказаться не только природные процессы (например, извержения вулканов, далекие землетрясения), но также и искусственное воздействие на верхнюю часть земной коры (ядерные и химические взрывы, электромагнитное воздействие импульсами большой мощности, закачка флюидов в глубокие горизонты, заполнение водохранилищ). Во второй половине прошлого XX столетия после начала испытаний ядерного оружия обнаружилось, что, с одной стороны, такие испытания инициируют землетрясения с магнитудой  $M = 3-4$ , а, с другой стороны, уменьшают вероятность землетрясений с большей магнитудой. Появилась идея «размена» сильных землетрясений и одновременно возник фантом тектонической, или геофизической, войны.

Создавшаяся тревожная ситуация послужила основанием для принятия в 1976 г. Генеральной ассамблеей ООН «Конвенции о запрещении военного или любого иного враждебного использования средств воздействия на природную среду». В перечне объектов, активное воздействие на которые может наносить значительный ущерб или иметь катастрофический характер, Конвенция указала среди других компонентов природной среды поверхность суши и земные недра.

Геофизические исследования, проводившиеся при испытаниях оружия большой разрушительной силы или при осуществлении мощных взрывов, а также других экспериментов, имеющих «мирный» характер, показали, что существует энергетический порог, за которым оказываемое на верхнюю часть земной коры воздействие может вызывать реакцию массивов горных пород, сходную по проявлению с тектоническими землетрясениями. Сопоставление уровней энергетического воздействия с откликом природной среды показано в таблице 1.

Приведенные в таблице ранжированные по четырем категориям (уровням) данные показывают, что ощутимая реакция горных массивов, проявляющаяся в виде обширных экзогенных и эндогенных процессов, носящих зачастую катастрофический характер, возможна при искусственном воздействии, энергия которого превышает  $10^8-10^{10}$  Дж. Такое воздействие следует квалифицировать как сильное или опасное. Энергия указанной величины выделяется при подрывах ядерных зарядов или химических взрывах большой мощности, при крупных авариях на топливопроводах, при запусках больших космических кораблей и др. Массированные сосредоточенные бомбардировки, которые стали использоваться в последнее время в локальных конфликтах, также могут рассматриваться как сильное воздействие на верхнюю часть литосферы. В частности, установлено, что ракетные и бомбовые удары при проведении военных операций в сейсмически активных регионах могут вызывать повышение сейсмической активности, сохраняющееся в течение длительного периода времени после активных боевых действий.

Локальные конфликты в мире происходят постоянно. В этих конфликтах державы-производители средств ведения войны, сами, как правило, не участвующие в боевых действиях непосредственно, или участвующие ограниченно, испытывают новые виды вооружений и военной техники. В качестве средств ведения войны



при этом используются тяжелые ракеты дальнего действия с большой точностью наведения, боеприпасы повышенной мощности, обладающие высокой разрушительной силой, т.е. средства, могущие оказывать сильное воздействие на верхние слои литосферы, вызывающие ответную реакцию. Таким образом, государства, располагающиеся в пределах тектонически активных зон, даже не причастные к военным действиям, могут оказаться во власти индуцированных катастрофических сейсмических событий. К таким странам в частности относятся те, которые располагаются в пределах пояса кайнозойской складчатости, простирающегося от Пиренейских гор на западе через Средиземноморье, Кавказ, Загрос, Памир, Гималаи и юго-восточную Азию.

Причинно-следственная связь между массивными сосредоточенными бомбардировками и повышением сейсмической активности была обнаружена при анализе рядов землетрясений, происшедших после бомбардировок в Югославии в 1999 г., Афганистане в 2001 г. и Ираке в 2003 г. Все указанные страны расположены в пределах субширотного Средиземноморско-Кавказско-Памирско-Гималайского тектонического сейсмически активного пояса. Анализировалось число сейсмопроявлений в соответствующих регионах до и после времени наиболее сильных ракетно-бомбовых ударов. Результаты проведенного анализа представлены на рис. 1.

В пределах указанных регионов (на территории в радиусе 1500 км от мест наиболее сильных ракетно-бомбовых ударов) в процессе обработки имеющегося материала (сводки о землетрясениях, поступающие от ГС РАН) было установлено увеличение числа и повышение интенсивности землетрясений в самые первые дни после ракетно-бомбовых ударов. Такая реакция земной коры на сильное воздействие обнаруживалась и ранее, хотя особого внимания не привлекала. Однако во всех рассматриваемых случаях наблюдалась также и вторая волна увеличения сейсмической активности по прошествии 4-7 месяцев. Так, в Югославии вторичное усиление сейсмичности отмечено через 5 (и, возможно, через 7) месяцев после интенсивных ракетных обстрелов и бомбардировок (рис. 1, верхняя часть). При этом заметно как увеличение общего числа землетрясений в Средиземноморском регионе, так и возрастание их магнитуды до  $M = 6$  и более. Предшествующий бомбардировкам 8-ми месячный период времени, как это видно на рис. 1, отличается от постбомбардировочного по обоим выбранным критериям. Аналогичная картина наблюдалась в районе Гиндукуша после бомбардировок в Афганистане. Усиление сейсмической активности в первые дни после бомбардировок сменилось 5-ти месячным периодом относительного «затишья», после которого сейсмическая активность вновь возросла. В данном случае особенно заметно увеличение числа землетрясений после бомбардировок, тогда как различие в величинах магнитуды менее выражено (рис. 1, средняя часть). После бомбардировок в Ираке временной лаг до вторичного усиления сейсмичности сократился до 4 месяцев. Однако общее число землетрясений в постбомбардировочный период оказалось заметно большим, чем в предшествующий отрезок времени, и их магнитуды выше (рис. 1, нижняя часть). Если сопоставить величину интервала времени до момента вторичного усиления сейсмичности для всех трех эпизодов, можно заметить сокращение периода «ожидания» от примерно 7 месяцев для событий в Югославии до 5 и 4 месяцев для Афганистана и Ирака, соответственно. Возможно, это свидетельствует о том, что после бомбардировок на Балканах «разгрузилась» в первую очередь только часть

тектонического напряжения, сосредоточенного в определенной структуре затем следующая порция после событий в Афганистане, уже после более короткого промежутка времени и, наконец, третья часть (но последняя ли ?) после иракских событий. На данном уровне знания возможны также и другие объяснения обнаруженного феномена.

Для проверки сделанного предположения о связи повышения сейсмической активности в регионе с военными действиями было изучено временное распределение энергии (магнитуды) и глубины очагов землетрясений. Результаты подобного рода анализа показаны на рис. 2 и 3.

На рис. 2 в сопоставлении показаны уровень сейсмической активности в пределах 1500-километровой зоны вокруг Ирака за 16-ти месячный период времени (по 8 месяцев до и после интенсивных бомбардировок), а также число землетрясений с магнитудой, меньшей или равной 4, магнитудой в интервале от 4 до 5 и магнитудой, большей 5. Наиболее заметно различие между указанными полупериодами в 8 месяцев для землетрясений с магнитудами, меньшими, равными или большими 4. Менее выражено, но все равно достаточно заметно различие для землетрясений, магнитуды которых превышают  $M=5$ . Из этого можно сделать вывод о том, что «постбомбардировочные» землетрясения в основном относятся к категории не очень сильных, что косвенным образом подтверждает возможность «размена» катастрофических землетрясений на серии слабых. Одновременно можно констатировать, что землетрясения с магнитудой  $M$ , меньшей или равной 4, являются «типичными» для данной области. Одновременно такая «кучность» событий, проявившихся в таком числе за сравнительно короткий промежуток времени, может служить подтверждением связи между массивными бомбардировками и наблюдавшимися землетрясениями.

Глубина очагов землетрясений в пределах 1500-километровой зоны вокруг Ирака в те же периоды времени как правило невелика. В основном очаги зафиксированных землетрясений располагались на глубинах 30-40 км. Однако, случаев, когда глубина очагов землетрясений достигала 100 и даже 250 км, в период времени после бомбардировок оказалось больше, чем в период времени, предшествующий бомбардировкам. Это обстоятельство также позволяет связать активизацию сейсмопроявлений с сильным воздействием на литосферу, оказываемым в ходе боевых действий. При этом приходится констатировать, что техногенное воздействие способствует «пробуждению» глубинных сейсмических сил.

Таким образом, результаты проведенного анализа подтверждают наличие связи между усилением сейсмической активности и сильным воздействием на верхнюю часть земной коры, оказываемое во время военных действий с применением оружия большой разрушительной силы. Установлено общее увеличение числа сейсмических событий в период времени после бомбардировок для всех трех рассматриваемых эпизодов. Для 1500-километровой зоны вокруг Ирака отмечено преобладание землетрясений с магнитудой  $M$ , меньшей или равной 4. Кроме того, для этой же территории обнаружено преобладание в постбомбардировочный период времени глубокофокусных (до 150 и более км) землетрясений. Это может означать, что активизация сейсмичности имеет техногенный характер (в данном случае речь идет об инициированной сейсмичности) и является прямым следствием военных действий. Предположительно установлено сокращение временного лага до вторичного усиления сейсмической активности в постбомбардировочный период

для последовательности событий, происшедших сначала на Балканах, затем в Афганистане и, наконец, в Ираке.

«Постбомбардировочные» землетрясения, о которых шла речь, наблюдались в сейсмически активных регионах там, где они, скорее всего, уже были подготовлены или готовились самой природой. При естественном ходе событий землетрясения в указанных регионах могли бы произойти через год или два, может быть и через еще большее время. Землетрясения, возможно, имели высокую степень «готовности». При таких обстоятельствах достаточно даже относительно небольшого воздействия, чтобы инициировать землетрясение. В данном случае роль «спускового механизма» могли сыграть бомбардировки, которые «сжали» временной интервал (в нашем случае до 4-7 месяцев), «заставив» землетрясения происходить раньше срока. Землетрясения, вызванные интенсивными сосредоточенными бомбардировками, могли, в свою очередь, согласно «принципу домино» повлечь за собой сейсмопроявления, напрямую не связанные ни пространственно, ни по времени с вызвавшими их событиями. Время и место вторичных сейсмопроявлений предугадать очень сложно, что делает их весьма опасными. Неопределенность времени и места техногенных инициированных землетрясений в определенной мере затрудняет реализацию идеи геофизического (тектонического оружия). Вместе с тем установленный факт наличия связи между сильными воздействиями на литосферу и увеличением сейсмической активности в сейсмоопасных регионах открывает путь к постижению тайны управления грозными проявлениями стихии, к которым несомненно относятся землетрясения.

Тектонический отклик на сильные воздействия на литосферу представляет собой лишь часть спектра возможных реакций природных процессов на оказываемое на них воздействие. Уязвимыми при энергетическом воздействии оказываются также мировой океан и приземные слои атмосферы. Известны научные эксперименты по управлению погодой с целью создания благоприятных условий для сельского хозяйства, а также с целью прогнозирования и предотвращения катастроф, связанных с циклонической деятельностью. Однако те же эксперименты (относящиеся к категории «двойных технологий») могут быть направлены на разработку так называемого погодного оружия.

Геофизические исследования показывают, что на поверхности планеты, на суше и на акватории мирового океана существуют области, характеризующиеся особой чувствительностью к оказываемому воздействию. Относительно небольшие, энергетические «инъекции» в пределах таких областей могут приводить в действие такие природные силы, как, например, тайфуны, наводнения, цунами и т.п., несущие разрушения и гибель людей на больших территориях. С учетом того, что на нашей планете очень многие государства, островные или прибрежные, зависят от погодных условий, любые эксперименты в области управления погодой могут быть чреваты непредсказуемыми и возможно крайне тяжелыми последствиями для этих стран.

При современном развитии технологий, идея создания геофизического (тектонического и погодного) оружия представляется относящейся не только к области фантастики. И, как следует из опыта мирного и военного использования атомной энергии и имеющихся результатов воздействия на литосферу, гидросферу и атмосферу, эколого-геофизические аспекты оценки последствий осуществляемых даже с самыми благими намерениями экспериментов непременно должны учиты-

ваться при проведении исследований в области управления природными процессами.

**Таблица 1 – Классификация воздействия на литосферу**

| Уровень воздействия | Энергия воздействия, Дж | Геодинамические признаки  | Характеристика последствий воздействия   |
|---------------------|-------------------------|---|--|
| Низкий              | менее $10^6$            | особые геодинамические признаки отсутствуют   | наблюдаемые изменения не выходят за рамки естественных процессов и не приводят к заметным нарушениям сложившихся геоэкологических условий                |
| Умеренный           | $10^6 - 10^8$           | ограниченные проявления экзогенных геологических процессов  | наблюдаются заметные, выходящие за рамки фоновых, изменения окружающей среды и геоэкологической обстановки, не требующие специальных мероприятий         |
| Высокий             | $10^8 - 10^{10}$        | обширные проявления экзогенных геологических процессов  | наблюдаемые изменения в геоэкологической обстановке требуют специальных мероприятий для предотвращения или уменьшения негативных последствий воздействия |
| Опасный             | $10^{10} - 10^{18}$     | обширные проявления экзогенных геологических процессов; проявления эндогенных геологических процессов | разрушительные и катастрофические изменения в окружающей среде, сопровождаемые гибелью людей и значительным материальным ущербом                         |

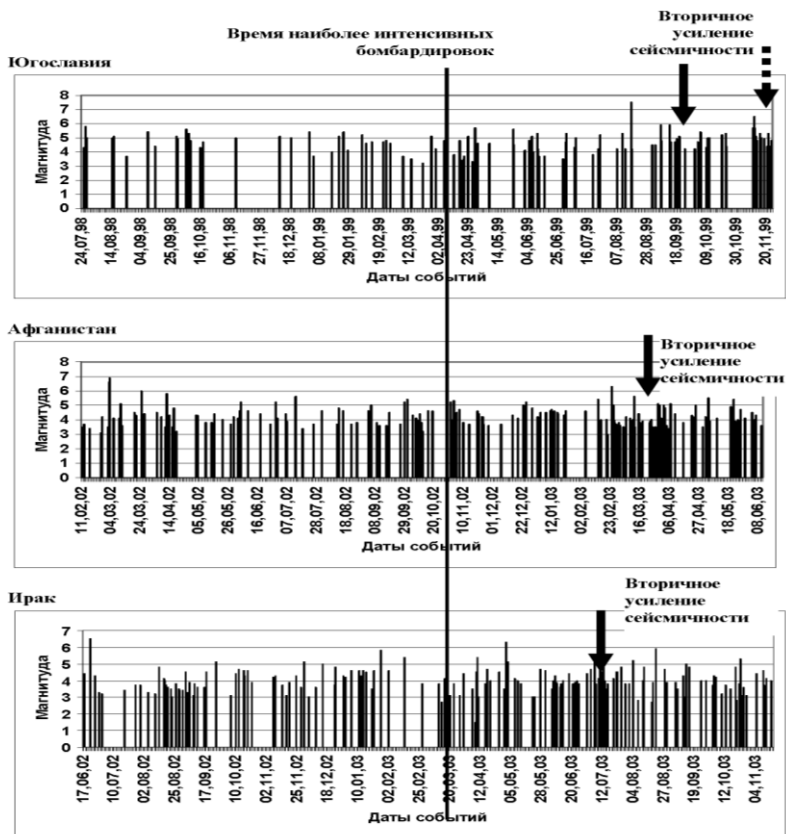


Рис. 1. Сопоставление времени бомбардировок в Югославии, Афганистане и Ираке с сейсмической активностью в этих регионах

Сейсмическая активность, период 17.06.02-04.11.03

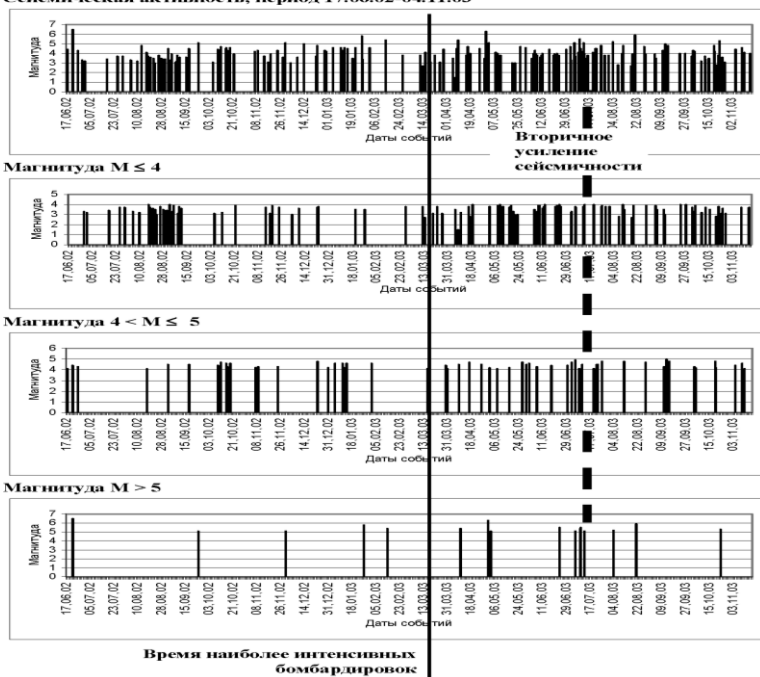


Рис. 2. Магнитуды землетрясений в пределах 1500-км зоны вокруг Ирака

Сейсмическая активность, период 17.06.02-04.11.03

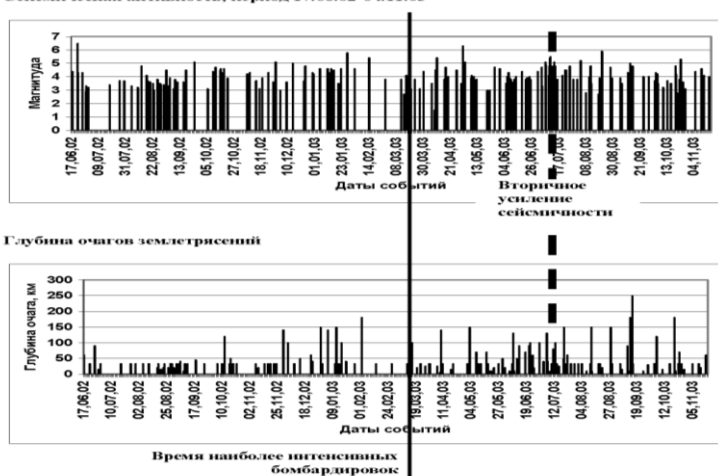


Рис. 3. Сейсмическая активность и глубина очагов землетрясений в пределах 1500-км зоны вокруг Ирака

**БИОФИЗИЧЕСКАЯ ЭКОЛОГИЯ****ПРЕДВЕСТНИКИ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ И  
ВЕКТОРНЫЕ ЗВУКОПРИЕМНИКИ У БИООБЪЕКТОВ**

Е.Л.Гордиенко\*, В.А.Гордиенко\*\*, Т.В. Гордиенко\*\*, А. В.  
Купцов\*\*\*, Б. М. Шевцов\*\*\*

\* *Московская сельскохозяйственная академия им. К. Тимирязева;*

\*\* *Физический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова, E-mail:  
vgord@list.ru*

\*\*\* *Институт космофизических исследований и распространения  
радиоволн (ИКИР) ДВО РАН, E-mail: ikir@ikir.kamchatka.ru*

Повышенная чувствительность многих животных к предвестникам стихийных природных бедствий является предметом внимания людей уже более 2 тысяч лет.

Некий прогностический признак, по-крайней мере, на землетрясения отмечен практически во всех сейсмически активных районах мира. Реакция животных обнаруживается как на континентальные землетрясения, так и на землетрясения, эпицентр которых находится в море.

Обработка огромного объема имеющейся информации об аномальном поведении биологических объектов, и, прежде всего, животных, показала, что опережение животными события тем длиннее, чем больше его магнитуда. Обнаружено отчетливое увеличение времени опережения при переходе от домашних животных к диким. Большинство сухопутных животных хорошо «вписываются» в группу

краткосрочных предвестников (до 3-4 недель), из которых почти 75 % относятся к оперативным (от нескольких часов до недели).

Судя по всему, никаких чудес здесь нет. Впервые научную и вполне обоснованную точку зрения о причинах землетрясения высказал еще в 1757 году М.В. Ломоносов. В своей речи «О рождении металлов от трясения Земли» он разделил землетрясения на 4 типа, причем, впервые были установлены волнообразные колебания, распространяющиеся в коре, и нечувствительные трясения, незаметные для ощущения. Эдуард Зюсс высказал учение о связи землетрясения с тектоническими процессами.

Одним из важнейших достижений современной сейсмологии явилось понимание того, что землетрясения, извержения вулканов, цунами и другие близкие к ним по сущности события не являются внезапными. Это процесс, который готовится более или менее продолжительное время и обнаруживает себя в разнообразных физических проявлениях. Безусловно, сейсмологи знают, что возможность предсказания землетрясений не вызывает сомнений, так как накопление огромных количеств упругой энергии не может протекать без каких-либо изменений свойств окружающей среды. Однако критерии, на которые можно было бы опираться в таких предсказаниях, сформулировать до сих пор не удалось. Одной из значительных удач считают предсказанное за несколько часов землетрясение 1975 года в городе Хайчен. Однако, как оказалось, далеко не все землетрясения следовали Хайченскому образцу. Уже 26 июля 1976 года произошло не предсказуемое землетрясение с магнитудой 7 и эпицентром в 150 км к востоку от Пекина. После этого случая оптимизм мировой общественности относительно прогноза землетрясений сильно уменьшился. До сих пор основной процент составляют землетрясения, которые не были предсказаны. Как результат, обнаруживаемые сейсмологами предвестники (различные по своей физической сущности) не завоевали всеобщего признания, т.к., с одной стороны, не меньшее число свидетельств доказывало необязательность их проявления перед каждым землетрясением, с другой – не после каждого предвестника случалось то или иное стихийное бедствие.

Судя по всему, в первом случае обычно либо не хватало чувствительности приборов, либо измерения проводились не в том частотном диапазоне. Что касается второго случая, то, по всей видимости, специалистам так и не удалось выявить главные причинно-следственные связи.

Тем не менее, в настоящее время не вызывает сомнений тот факт, что предвестники землетрясений все-таки существуют, и главной причиной их существования является необходимость конечного времени накопления энергии для разрывов пород в очаге землетрясения. Исходя из этого построено много различных моделей, число которых продолжает расти. Не останавливаясь на самих моделях, отметим лишь наиболее общие результаты из них вытекающие, а именно, перед землетрясением должны проявиться следующие явления:

- деформации и наклоны земной поверхности;
- изменение скоростей сейсмических волн при прохождении зон с динамическим развивающимся процессом трещинообразования;
- изменение электросопротивления пород;
- геохимические и гидродинамические эффекты;
- увеличение содержания радона и других продуктов радиоактивного распада, а также увеличение количества источников, связанных с трещинообразованием;



– поляризация пород и, как следствие, возникновение атмосферного электричества;

– акустическая эмиссия.

В рамках данной работы, по-видимому, наибольший интерес представляют последние два механизма, которые, как правило, и воспринимаются биологическими предвестниками. При этом электромагнитные возмущения (первое известное упоминание о существовании предвестников электромагнитной природы относятся к 373 г. до н.э.) в системе прогноза выступают, в первую очередь, как оперативные (рис. 1).

Что касается акустической эмиссии, то она может возникать задолго до самого землетрясения. Вместе с тем, ее наблюдение, к сожалению, является необходимым, но не достаточным условием возникновения землетрясения.

Акустическая эмиссия – явление возникновения отклика образца на динамическую локальную перестройку структуры, сопровождающуюся испусканием упругих волн.

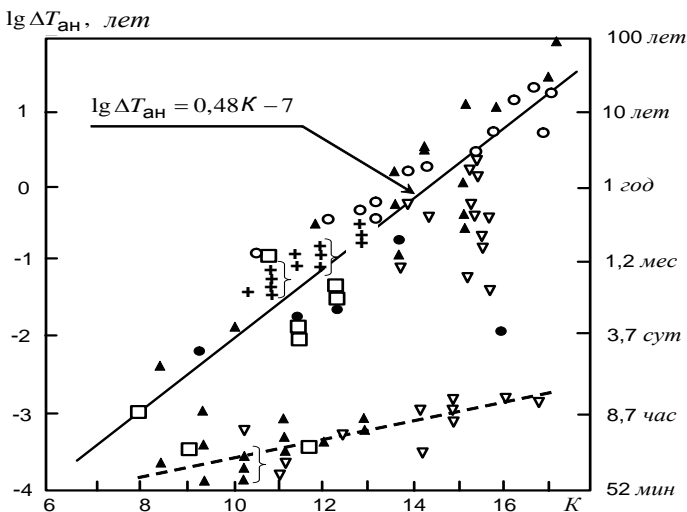


Рис.1. Сводный график распределения времени  $\Delta T_{ан}$  появления аномалий свойств, перечисленных выше явлений (по литературным источникам), предшествующих землетрясению энергетического класса  $K$ . Пунктир соответствует преимущественно оперативным предвестникам. Квадратиками выделены предвестники, соответствующие акустической эмиссии.

Важной особенностью акустической эмиссии является то, что ее частотный диапазон существенно более высокий, чем используемый в сейсмологии и поэтому, как правило, не регистрируемый сейсмодатчиками. Неудивительно поэтому, что в качестве предвестников акустического характера в сейсмоакустике в основном ориентируются на форшоки, т.е. достаточно мощные толчки, обусловленные наличием достаточно крупных трещин в коре Земли.

Тем удивительнее выглядит ситуация, когда такие связи устанавливаются животными, птицами

Речь идет не только о самом восприятии источников звука, но и достаточно высокой точности их локации при отсутствии видимой корреляционной обработки сигналов, и невозможности во многих случаях использовать бинауральный эффект. Как считают биологи, такая высокая точность, конечно, достигается за счет последовательного включения многих адаптивных механизмов, коррелированных с поведением и от этапа к этапу увеличивающих точность локации, доводящих ее до биологически необходимого предела. Ни один отдельно взятый адаптивный механизм решить эту задачу не в состоянии, как не в состоянии ее решить отдельно сама слуховая система.

Вместе с тем, изучение слуховых органов многих насекомых и рыб (размеры которых меньше или сравнимы с длиной регистрируемых акустических волн) показывает наличие у них наряду с приемниками звукового давления, звукоприемников, реагирующих на векторные характеристики поля – градиент давления, колебательную скорость и пр. (см. примеры на рис.2).

Как известно, использование наряду со скалярной характеристикой поля – звуковым давлением  $P$ , его векторных характеристик – колебательной скорости, в частности, позволяет существенно расширить круг решаемых акустических задач и, в том числе, повысить помехоустойчивость и точность определения направления на источник сигнала при ограниченных возможностях осуществления пространственно-временной выборки [1].

В свое время такой подход к решению акустических задач, основанный на одновременной регистрации в фиксированных точках пространства поля давления и его градиента (или колебательной скорости) с учетом фазовых соотношений между ними, и не накладывающий обязательных условий потенциальности на поле мы назвали концепцией векторно-фазовых методов [2].

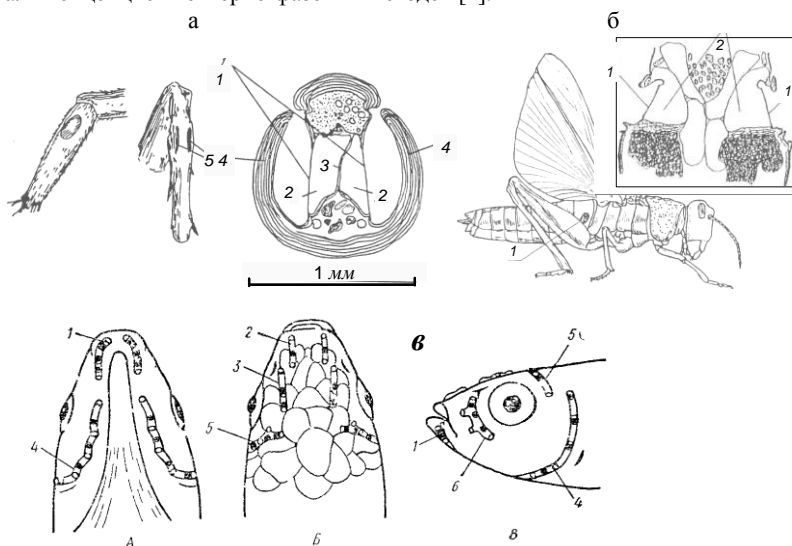


Рис.2. а – тимпанальный орган кузнечика в его передних лапках: 1 – мембраны звукового давления, 3 – мембрана градиента давления; б – приемник градиента звукового давления у саранчи: 1 – мембраны приемника градиента давления; в – распределение органов (1 – 5), связанных с боковой линией и реагирующих на векторные характеристики звукового поля на голове *rundulus heterochtus*.

Основываясь на данных, полученных биологами (в частности, Р.Д. Жангиевым при участии одного из соавторов), и результатах собственных многолетних исследований в области векторно-фазовых методов, можно предполагать, что именно использование достаточно полной информации о скалярно-векторной структуре акустических полей, порождаемых процессами подготовки к предстоящему землетрясению, позволяет биологическим особям не только осуществлять локацию таких источников слабых сигналов на фоне окружающих шумов, но и принимать соответствующие решения.

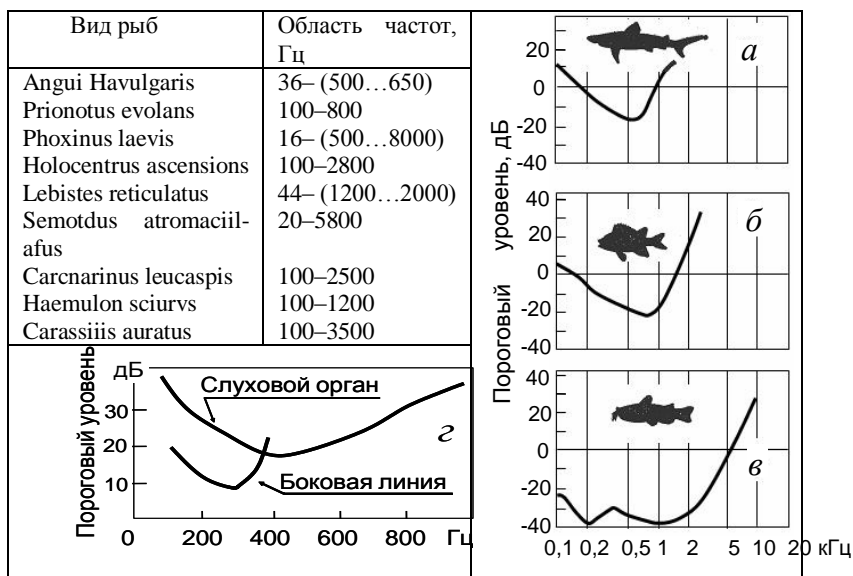


Рис.3. Слева в таблице – область частот повышенной акустической чувствительности некоторых видов рыб;

Справа – примеры частотной зависимости потенциальной чувствительности некоторых пород рыб к акустическим сигналам; г – сравнение аудиограмм слухового органа и боковой линии у *Lutjanus apodus*.

В результате многочисленных наблюдений за поведением животных установлено, что перед землетрясениями со сравнительно небольшой магнитудой или же в районах, удаленных от эпицентра, у животных возникает, как правило, диффузное беспокойство под действием, как полагают, подпороговых интенсивностей раздражителя. Считается, что целенаправленное поведение (у домашних животных отмечается бегство из помещений, дикие животные покидают норы и мигрируют из района будущего землетрясения, птицы взлетают в воздух перед толчком и т.п.) наблюдается при повышенной интенсивности воздействия предвестников.

Использование информации о векторно-фазовой структуре акустического поля позволяет объяснить довольно низкие уровни сигналов, которые могут быть обнаружены биообъектами (в некоторых частотных областях – на 20...40 дБ ниже порога слышимости человеческого уха –  $2 \cdot 10^{-5}$  Па, принимаемого обычно за 0 дБ). Наименьшей из приводимых на рис.3,а-в видов рыб чувствительностью обладает акула (рис.3,а), однако она компенсирует это одной из самых высоких известных в природе чувствительностей (наряду с электрическим скатом) к электромагнитным полям, которая по электромагнитной составляющей поля достигает  $5 \cdot 10^{-9}$  В.

Вместе с тем, характерно, что повышенная акустическая чувствительность как у гидробионтов (рис.3), так и у многих наземных биообъектов, наблюдается обычно в области достаточно высоких для «классической» сейсмологии частот. Обычно

считается, что предвестники землетрясений, которые можно наблюдать на значительных удалениях от эпицентра будущего землетрясения, должны быть низкочастотными. Причина здесь в следующем. Согласно существующим представлениям о механизмах подготовки сейсмических событий, медленное и продолжительное сжатие горных пород перед землетрясениями меняется на быстрый рост упругих напряжений, приводящих к лавинному трещинообразованию [3, 4], которое сопровождается интенсивной геоакустической эмиссией. Акустическая энергия трещинообразования выделяется в очень широком диапазоне частот [3, 5, 6], но распространению высокочастотных колебаний препятствует сильное ослабление, возрастающее в зависимости от частоты. Например, на частоте 3 кГц коэффициент ослабления в осадочных породах достигает 260 дБ/км, а в базальтах – 1,5 дБ/км, что соответствует ослаблению волны по амплитуде в  $e$  раз на расстояниях 33 м и 5,9 км (так называемая «длина» ослабления сигнала). Это означает, что наблюдение сигналов трещинообразования даже в базальтах возможно на удалении лишь нескольких километров (см. табл.1). Поэтому, если в спектре регистрируемых сигналов наблюдаются высокочастотные составляющие, то они характеризуют преимущественно процесс трещинообразования в осадочных породах непосредственно вблизи места установки приемной системы. Традиционно считалось, что эти составляющие не информативны, поэтому в стандартных сейсмодатчиках обычно не предусмотрена возможность их регистрации.

Таблица 1. Оценка затухания акустических сигналов в осадочных породах

|                             |          |          |            |              |
|-----------------------------|----------|----------|------------|--------------|
| Частотная область, Гц       | 0,1...10 | 10...100 | 100...1000 | 1000...10000 |
| «Длина» ослабления сигналов | 100 км   | 10 км    | 1 км       | 100 м        |

Таким образом, если биообъекты могут регистрировать предвестники на удалении десятков и сотен километров от будущего эпицентра землетрясения, то довольно трудно объяснить, что повышенная чувствительность наблюдается, как правило, в килогерцовой области частотного спектра.

Однако, есть основания полагать, что ситуация на самом деле иная.

Исследования особенностей геоакустической эмиссии на Камчатке в районе Авачинской губы и анализ ее аномалий, приуроченных к сильным сейсмическим событиям, проводившиеся последние полтора года двумя из соавторов [8], показывают, что имеется довольно выраженная корреляция между появлением аномалий геоакустической эмиссии, направленностью распространения их акустической энергии и эпицентром будущего землетрясения. Описываемые исследования в этом регионе впервые выполнялись на основе регулярных широкополосных наблюдений в частотном диапазоне 0,1...10000 Гц с использованием гидроакустических методов. Одна из систем была установлена в искусственном водоеме объемом  $2 \times 2 \times 2 \text{ м}^3$ , в пункте комплексных геофизических наблюдений на р. Карымшина, вторая – на удалении 20-ти км к северу в оз. Микижа, площадь поверхности которого  $200 \times 700 \text{ м}^2$ , а наибольшая глубина 4 м. Толщина осадочных пород в пунктах наблюдений по данным бурения равняется примерно 50 м.

Регистрация акустических шумов осуществлялась непрерывно через полосовые фильтры шестого порядка в семи частотных диапазонах: 0,1...10, 10...50,

50...200, 200...700, 700...1500, 3000...6000, 8000...11500 Гц. Получающиеся данные сохранялись примерно неделю и анализировались с целью обнаружения и архивирования аномальных геоакустических сигналов.

Под аномалиями мы понимаем повышение на два-три порядка частоты следования шумовых импульсов, а при регистрации в интегральном режиме, такое же увеличение амплитуды шумов над фоновым уровнем в выбранном спектральном диапазоне. Аномалии возникают, как правило, в килогерцовой области (рис.4, рис.5,а), но иногда появляются одновременно и на более низких частотах (рис.5,б).

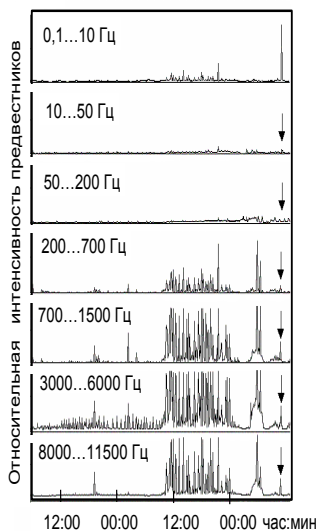


Рис.4. Высокочастотные аномалии за-регистрированные на оз. Микижа перед событием от 11:09 час 18 декабря 2002 г. ( $D = 113$  км,  $KS = 12,1$ ). Момент землетрясения показан стрелкой.

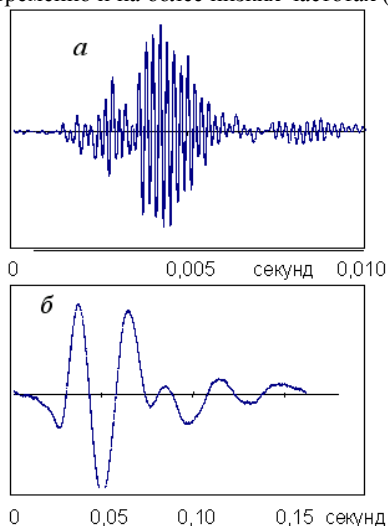


Рис.5. Пример фрагментов регистрации сигнала высокочастотного (а) и низкочастотного (б) предвестников перед событием от 11:03 час 4 августа 2004 г. ( $D = 150$  км,  $KS = 13,0$ )

Оказалось, что эти аномальные шумы интенсивны и специфичны. На слух они воспринимаются как сильный гул с превышением на 30...40 дБ уровня фоновых шумов. Их появление происходит, как правило, примерно в суточном временном интервале перед сильными сейсмическими событиями с энергетическим классом  $K_S \geq 11$ . Продолжительность аномалий варьируется от десятков минут до нескольких часов. Аномальные шумы всегда пространственно анизотропны.

Аномалии проявляются обычно в виде импульсов с достаточно простой структурой (рис.5) в виде релаксационных колебаний с ударным возбуждением. При наблюдаемом времени затухания 0,015 с и примерной скорости 3 км/с попе-

речных колебаний в земной коре коэффициент ослабления на частоте 3 кГц (соответствующей рис.5,а) составляет примерно 190 дБ/км, что ближе по свойствам к осадочным породам. Сказанное выше указывает на то, что действительно наблюдается процесс трещинообразование в осадочных породах.



Рис.6. Внешний вид установленного 4-х канального векторного приемника, конструкции ГМЦГИ ГП ВНИИФТРИ

С целью выявления направленных свойств отдельно взятых импульсов летом 2004 г. на оз. Микижа на глубине около полуметра от дна была установлена приемная система, включающая помимо гидрофона высокочастотный векторный приемник (ВП), регистрирующий три взаимно ортогональных компонента градиента звукового давления (колебательной скорости) до частот 10 кГц (рис.6). Безусловно, при переходе сигнала из грунта в воду некоторые специфические характеристики сейсмоакустического сигнала оказались утерянными, в том числе поперечная поляризация волн. Однако общее направление прихода акустической энергии, по крайней мере, в горизонтальной плоскости сохранялось. К сожалению, специфичным для оз. Микижа явился достаточно высокий уровень реверберации в высокочастотной области (рис.7,а). Поэтому информативным является преимущественно начальный период импульсного сигнала, на который еще не наложены сигналы, переотраженные от границ озера.

Выборочные результаты анализа отдельных импульсов, обработанных с использованием информации, снимаемой с горизонтальных каналов ВП, приведены на рис.7-9. Выбранный день наблюдений (3 августа 2004 г) соответствовал времени, непосредственно следующему за достаточно выраженной аномальной временной областью следования импульсов, что могло явиться признаком надвигающегося землетрясения. Среди импульсов присутствовали как высокочастотные (с основной частотой заполнения 3...4 кГц), так и низкочастотные импульсы (с полосой 30...300 Гц). Последнее могло свидетельствовать, в соответствии с имеющимися литературными данными, о достаточной мощности готовящегося землетрясения.

На рис.7,б-г приведена характерная траектория движения частиц среды в горизонтальной плоскости одного из высокочастотных импульсов, а на рис.7,д-е – низкочастотного. Характерно, что в низкочастотных предвестниках даже в диапа-

зоне времен, в которых еще не наблюдается реверберация, сохраняется эллиптический характер движения частиц.

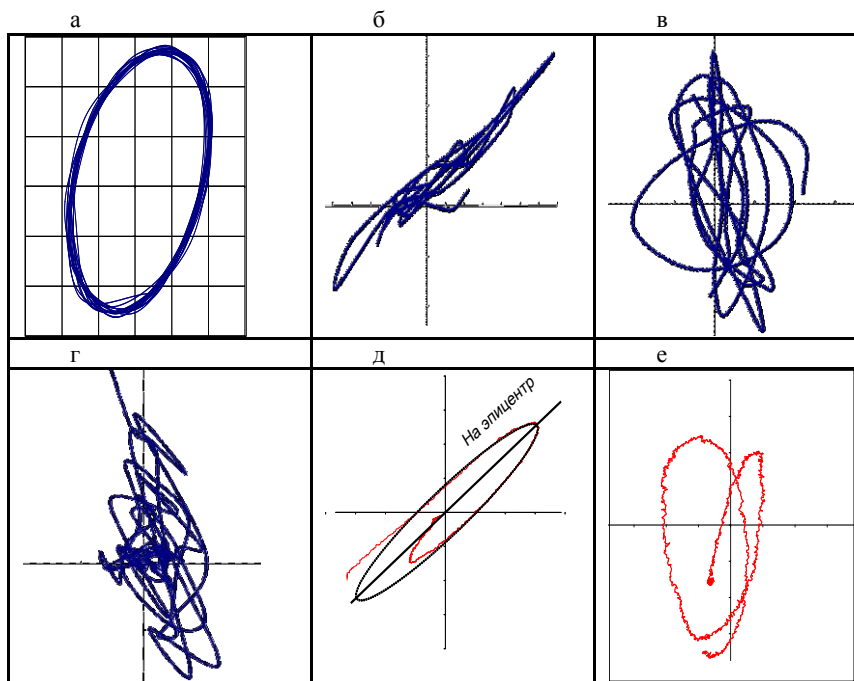


Рис.7. Траектория частиц среды в озере: а) при работе тонального излучателя на частоте 5 кГц (ярко выраженная эллиптичность траекторий движения частиц среды); б) высокочастотный предвестник до возникновения реверберации – с большой степенью точности продольная волна ; в) высокочастотный предвестник после возникновения реверберации – появляется эллиптичность движения частиц среды; г) «хвост» высокочастотного предвестника; д) низкочастотный предвестник, первый период (показан эллипс с направлением главной оси примерно на эллипсы последующих землетрясений); е) низкочастотный предвестник после возникновения реверберации.

Пеленги прихода акустической энергии, определенные с учетом эллиптичности движения частиц [7] в пределах примерно 20-ти минутной записи группировались в диапазоне углов 118...1300 по отношению к направлению на север. Примеры определения пеленга приведены на рис.8,9.



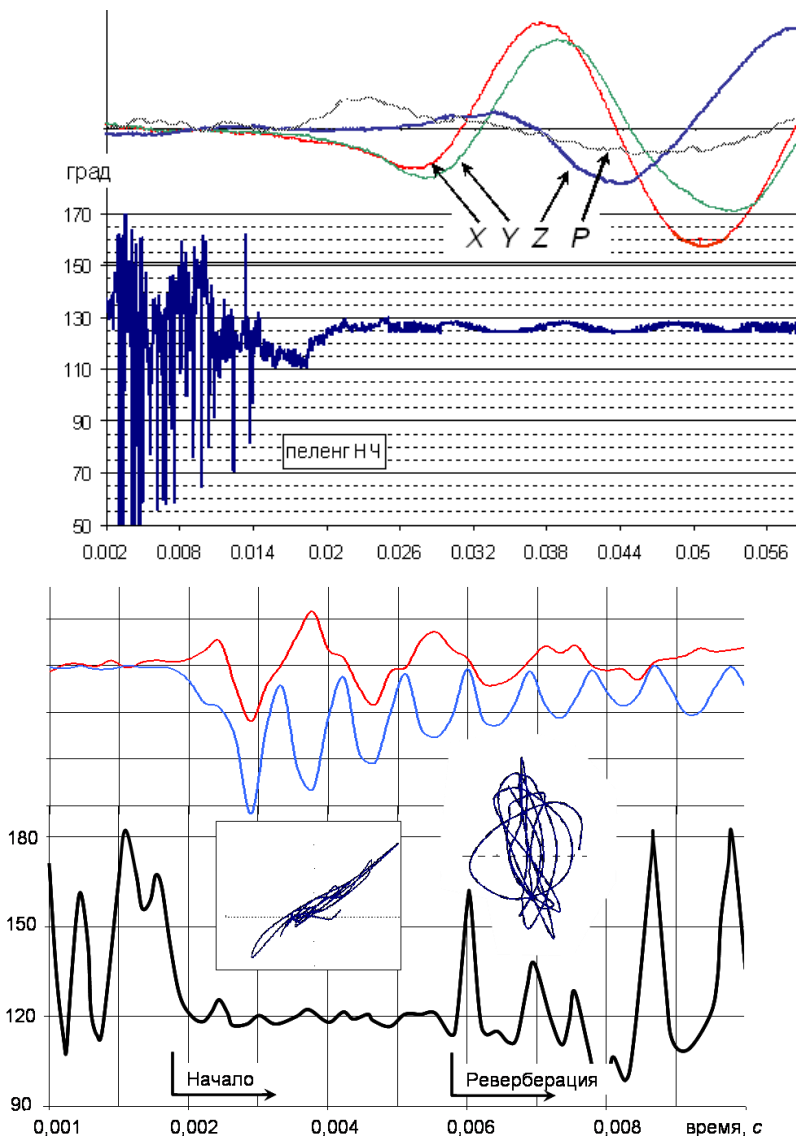


Рис. 8. Примеры определения направления прихода акустической энергии низкочастотного (вверху) и высокочастотного (внизу) предвестников; на врезках – траектории движения частиц среды, соответствующие обозначенным участкам (приведены начальные участки зависимостей от времени отдельных компонентов поля, зарегистрированных ВП).

Примерно через сутки после проведенных записей последовало землетрясение, основные характеристики которого приведены в табл.2, а на рис. 9 – фрагмент карты с взаимным расположением точки наблюдения и области землетрясения для позиции 2 табл.2, которому, по-видимому, и соответствовало наличие относительно низкочастотных предвестников.

Таблица 2.

|  | Дата           | Вре<br>мя      | широта    | долгота    | S   | Б<br>аллы |
|--|----------------|----------------|-----------|------------|-----|-----------|
|  | 2004.<br>08.04 | 9:48:29.5      | 5<br>2.22 | 15<br>9.92 | 2.9 | 5<br>,5   |
|  | 2004.<br>08.04 | 11:0<br>3:31.0 | 5<br>2.24 | 15<br>9.84 | 3.0 | 5<br>,6   |
|  | 2004.<br>08.04 | 11:0<br>9:05.8 | 5<br>2.30 | 15<br>9.68 | 8.3 |           |
|  | 2004.<br>08.04 | 11:3<br>8:20.2 | 5<br>2.29 | 15<br>9.73 | 5.5 |           |

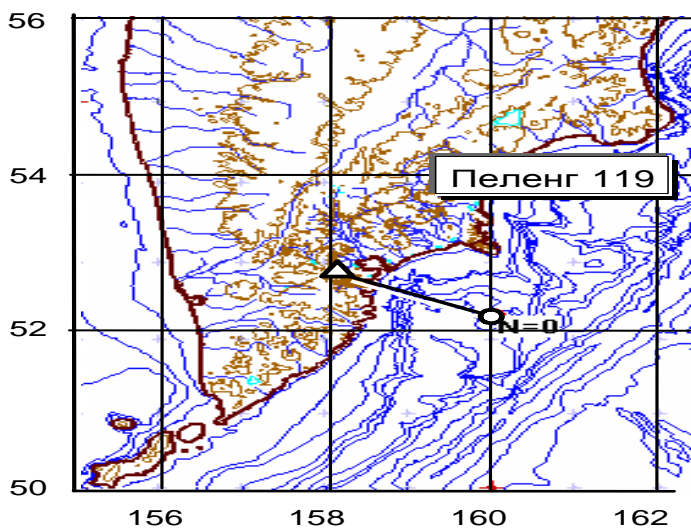


Рис.9. Карта землетрясения на 11 час 03 мин по Гринвичу 4.09.2004 г.

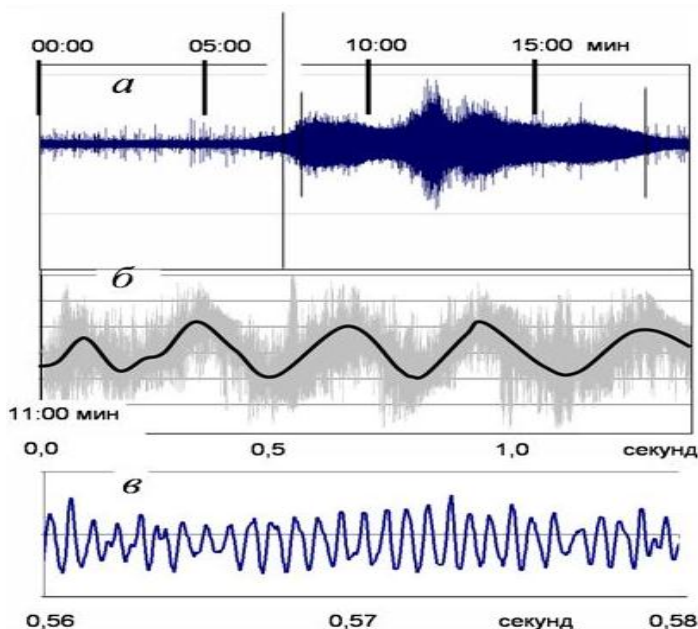


Рис.10. Фрагмент записи акустического сигнала, зарегистрированного широкополосным приемником в момент наиболее сильного землетрясения 4 августа 2004 г. на озере Микижа в 11 час 03 мин:

а – 20-ти минутная реализация сигнала в полосе частот до 10 кГц;

б – полторасекундная реализация, соответствующая наиболее интенсивным уровням сигнала на рис.10,а (показана наиболее интенсивная низкочастотная составляющая сигнала);

в – высокочастотные составляющие сигнала на интервале 0,02 секунды, соответствующая временному интервалу, приведенному на рис.10,б.

На рис.10 приведен фрагмент записи наиболее сильного землетрясения, соответствующего моменту времени 11:03 час в табл.2.

Таким образом, полученные результаты, в дополнение к уже обсуждавшимся ранее [8], свидетельствуют о наличии преимущественного направления распространения энергии геоакустических сигналов краткосрочных предвестников в направлении от источника будущего события.

Разброс пеленгов для описываемого эксперимента обусловлен двумя причинами. Первая, безусловно, связана с погрешностью определения пеленга из-за относительно малой длительности импульса, пригодной для пеленгования вследствие наличия сильной реверберации. Вторая обусловлена наличием нескольких близкорасположенных очагов готовящихся землетрясений.

На основании описанных экспериментов можно сделать следующий важный вывод.

Динамические процессы при подготовке сильных землетрясений охватывают области в десятки и сотни километров. По уровню относительных деформаций 10–8, сравнимых с окружающими шумами (например, с амплитудами приливных колебаний), радиус влияния очага землетрясения обычно оценивается как  $r = 100,42 M$  км, где  $M$  – магнитуда [9]. С приближением к гипоцентру готовящегося землетрясения относительные деформации нарастают.

Деформации, распространяющиеся из очагов землетрясений (рис.11), создают вблизи пунктов наблюдений в упруго-вязкой среде сдвиговые напряжения, определяющие преимущественную ориентацию трещин. Как следствие, появляется направленность колебательного движения частиц среды с переносом акустической энергии в направлении от зоны субдукции и очага готовящегося землетрясения. Возникает акустическая эмиссия, растущая с увеличением напряжений, которые остаются значительно ниже предела прочности.

Размер трещин определяет и амплитуду, и частоту заполнения сигналов, что приводит к зависимости между этими параметрами.

Оценка размера  $r$  трещин при частоте заполнения наблюдаемых импульсов  $f = 3$  кГц дает значение порядка 1 м [10, 11]. Считается, что при понижении частоты заполнения  $f$  размер трещин возрастает как  $1/f$ . Формирование трещин начинается с малых масштабов, но соответствующие им высокочастотные колебания сильно затухают и не наблюдаются.

Преимущественная ориентация трещин, возникающих при сдвиговых напряжениях вблизи пунктов наблюдений, может привести к неоднородности в распределении геоакустических шумов по направлениям. То же самое можно сказать и о трении, и об абразивных процессах в сдвиговых движениях. Появляющаяся при этом анизотропия в шумах связана с направлением распространения деформаций, а значит, и с направлением на эпицентр.

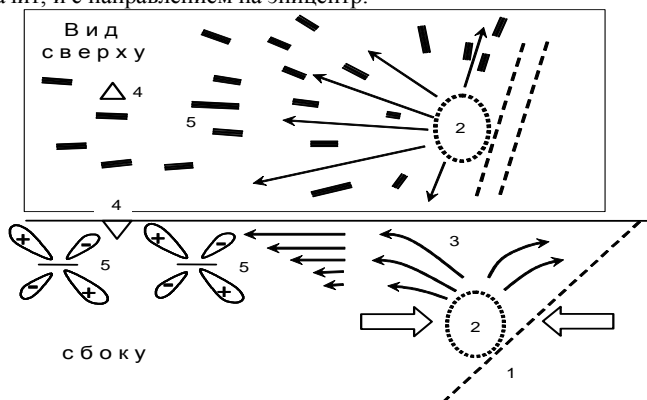


Рис. 11. Схема, поясняющая возникновение анизотропии движения частиц среды в геоакустических шумах. 1 – зона субдукции, 2 – очаг подготовки землетрясения, 3 – стрелки, показывающие направления распространения деформаций, 4 – пункт наблюдения на земной поверхности, 5 – ориентированные трещины с направленным излучением сейсмоакустической энергии.

Таким образом, на основании изложенного можно сделать вывод, что существуют аномальные геоакустические шумы, обусловленные напряжениями, возникающими при подготовке сильных сейсмических событий, и выступающие в качестве их предвестников. При этом высокочастотный килогерцовый диапазон является наиболее информативным при наблюдении процессов трещинообразования. Пеленг зарегистрированных в водной среде сигналов, определяемый по направлению главной оси эллипса траектории движения частиц среды в волне (поляризации волны) с учетом фазы сигнала, регистрируемого каналом звукового давления, позволяет осуществлять локацию областей подготовки сейсмических событий.

Следовательно, имеется возможность определять возможное приближающееся землетрясение, анализируя сейсмоакустические сигналы, зарегистрированные в воде в относительно высокочастотном диапазоне.

Есть основания полагать, что аналогичное пеленгование возможно и при размещении широкополосного высокочастотного векторного приемника в грунте (например, в скважине)

### Литература

1. Гордиенко В.А., Ильичев В.И. Одиночный приемник потока акустической мощности как эквивалент пространственной антенной решетки// Докл. РАН, Т.339, N 5. 1994.
2. Гордиенко В.А., Захаров Л.Н., Ильичев В.И. Векторно-фазовые методы в акустике. – М.: Наука, 1989. 360 с.
3. Мячкин В.И. Процессы подготовки землетрясений. – М.: Наука, 1978, 232 с.
4. Райс Дж. Механика очага землетрясений. – М.: Мир. 1982. 217 с.
5. Крылов В.В. Об излучении звука развивающимися трещинами. // Акустический журнал. Том XXIX. Выпуск 6. 1983. С. 790-798. Equation Chapter 1 Section 1
6. Соболев Г.А., Пономарев А.В. Физика землетрясений и предвестники. М.: Наука. 2003. 270 с.
7. Гордиенко В.А., Гончаренко Б.И. Векторно-фазовые методы в низкочастотной аэро- и сейсмоакустике. Физическая и нелинейная акустика/ Сб.трудов сем. научн. школы проф. Красильникова. М.: Физфак МГУ, 2002, с.209-229
8. Купцов А.В., Богданова Т.А., Ларионов И.А., Шевцов Б.М., Шумилов Ю.С. Изменения характера акустической эмиссии Земли, соответствующие ранней стадии развития сейсмических событий// III Всероссийский симпозиум «Сейсмоакустика переходных зон». Владивосток. 2003. С. 108-109.
9. Чернышев С.Н. Трещины горных пород. М.: Наука. 1983. 240 с.
10. Виноградов С.Д. Упругие волны, излучаемые трещиной отрыва и сдвиговой подвижкой по готовому разлому//Исследования по физике землетрясений.М.Наука.1976. С.67-74;
11. Виноградов С.Д. и др. Физическая природа разрыва и излучение сейсмических волн.//Физические процессы в очагах землетрясений. М.Наука.1980. С.129-140.

## ПРОБЛЕМЫ САМООРГАНИЗАЦИИ И СИММЕТРИИ

### В ПРИРОДНЫХ СИСТЕМАХ

В.А.Твердислов, В.В.Сидорова, Л.В.Яковенко

*Кафедра биофизики Физического факультета МГУ им.  
М.В.Ломоносова*

*tverdislov@mail.ru*

Активные среды рассмотрены как основа пространственно-временной самоорганизации и эволюции распределенных неживых и живых систем. Предложена, разработана и экспериментально обоснована принципиально новая гипотеза, касающаяся происхождения жизни на Земле, согласно которой возникновение термодинамически неравновесных дискретных предшественников живых клеток связано с «холодной» поверхностной пленкой мирового океана, где возникли ионная и хиральная асимметрии, свойственные живым клеткам. Развита новая представления о хиральной безопасности биосферы. Биосфера со свойственной ей хиральной асимметрией, закрепившейся в ходе биологической эволюции на уровне L-аминокислот и D-сахаров, а также некоторых биомолекул, сталкивается с мощным потоком хиральных соединений, формируемым химической, перерабатывающей, фармацевтической, аграрной, пищевой промышленностью и т.д. Эффективное использование одних энантиомеров в медицине или агрокомплексе сопровождается токсическим и мутагенным действием их зеркальных энантиомеров на организмы.

С давних времен человечество восхищалось удивительным внешним сходством многих живых и неживых структур. Похожесть вызывала необходимость осмысления и вызвала появление редукционизма – методологического направления, согласно которому высшие формы материи могут быть полностью объяснены на основе закономерностей, присущих низшим формам. Естественной и понятной стала критика редукционизма, заключающаяся в утверждении о «несводимости». Так, вряд ли сейчас имеет смысл искать причинную общность в геометрическом подобии гексагональных пчелиных сот и бензольных колец. И тем не менее...

Представления о самоорганизации в открытых системах, как правило, ассоциируются с образованием регулярных пространственно-временных структур с низкой степенью симметрии (высшей – обладает изотропная среда). Так, гистологиче-

ский срез ткани печени или расположение деревьев в лесу не образуют выраженных периодических структур, однако, даже на первый взгляд, мы оцениваем их как высокоорганизованные по своим внутренним законам развития системы. Вместе с тем, физические подходы к изучению сложных систем базируются на изучении максимально упрощенных объектов для выявления самых общих закономерностей.

Одним из направлений современной экологии, имеющей дело с взаимодействием живых и неживых систем, является экспериментальное и теоретическое изучение процессов их пространственно-временной самоорганизации. Образование свойственных живым системам регулярных структур, симметричных и несимметричных, является проявлением общих закономерностей эволюции природных открытых систем. Данный подход, в принципе, не должен быть непосредственно связан с рассмотрением физической основы систем, но призван отражать общую синергетическую природу их поведения и эволюции. Речь идет о единстве законов самоорганизации в термодинамически открытых живых и неживых сложных системах.

### **Активные среды и самоорганизация**

Представления об активных средах, сопрягающих разнородные процессы энергетически и информационно во времени и пространстве, позволяют рассматривать с общих позиций конкретные механизмы самоорганизации на разных уровнях биологической организации, в том числе и вопросы возникновения жизни.

Многие динамические системы, независимо от того являются ли они физическими, химическими или биологическими, могут быть описаны в традиционных терминах «реакция – диффузия» [1]. Пусть в какой-то области пространства протекает некий процесс («реакция») со своим характерным временем. Между соседними областями происходит перенос – «диффузия» - компонентов или продуктов процесса. Если характерное время основного процесса значительно больше времени переноса, то мы имеем дело с сосредоточенной, или точечной, системой (или с идеальным точечным реактором). Процессы в такой системе синхронны (синфазны). Когда же времена переноса сопоставимы с характерными временами самих процессов или превышают их, система становится распределенной. Таким системам свойственно или образование регулярной, согласованной в пространстве и времени структуры, или хаотическое чередование процессов в различных точках.

Распределенные системы являются пассивной средой, когда перенос массы или какого-либо возмущения, например, волны, направляется из определенной точки (точек) и оттуда же питается энергией. Запас свободной энергии может быть, например, обеспечен градиентом концентрации какого-либо компонента смеси, а его диффузия может сопровождаться образованием нерастворимого осадка. Известно образование регулярных равновесных структур [1, 2] - слоев Лизеганга («ритмических осадков») в виде колец (рис.1А) или спиралей (рис.2А).

Способность к более высокому уровню самоорганизации распределенные системы приобретают, когда они становятся активной средой. Важнейшей особенностью активной среды является ее способность подпитывать энергией идущие в системе процессы в каждой точке пространства. После завершения процесса в каждой малой области системы идет процесс самовосстановления - локальное накопление энергии, способной обеспечить следующую фазу процесса.

Известно много систем разной природы - физической, химической, биологической, в которых процессы распространяются, не затухая. Так распространяется фронт горения высушенной травы в степи, волна кристаллизации в переохлажденной жидкости, волна излучения в лазере, нервный импульс. Распространяющиеся таким способом волны называются автоволнами. В однородной среде фронт волны движется с постоянной скоростью и его амплитуда и форма не изменяются. Известно большое число биологических структур, обладающих ярко выраженной регулярностью и симметрией, начиная от клеточного и заканчивая биосферным уровнями. Имеется множество примеров упорядоченного спирального расположения листьев вдоль ствола или их зачатков в почках. Сложные спиральные структуры наблюдаются в цветках ромашки или в корзинке подсолнуха (вложенные или пересекающиеся спирали). Вьюнки имеют преимущественно правоспиральную закрученность. Белые грибы в лесу образуют кольцевые структуры - «ведьмин круг».

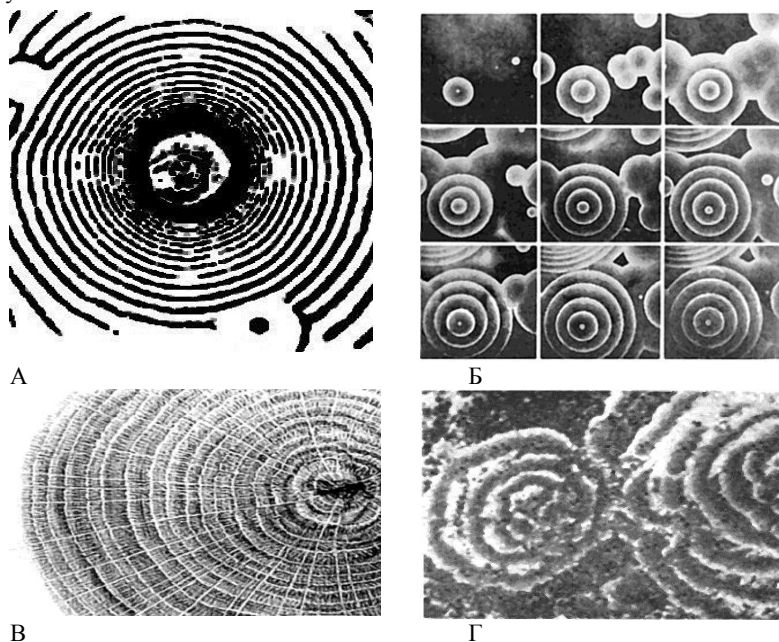
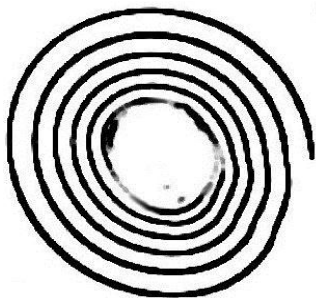


Рис.1. А – кольца Лизеганга – равновесная структура, образующаяся к концу реакции. Б – концентрические концентрационные волны, наблюдаемые в ходе реакции Белоусова. В – поперечный разрез ствола дерева. Г – концентрические кольца, образуемые лишайником *Parmelia centrifuga*.





А



Б

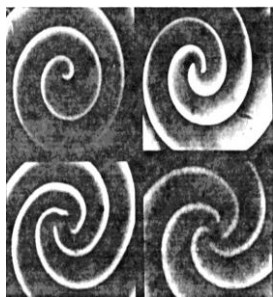
Рис. 2. А – равновесная спиральная структура, образовавшаяся в ходе реакции Лизе-ганга. Б – спиральные волны в реакции Белоусова.

Раковины многих видов моллюсков имеют правоспиральную закрученность. Окраска раковин также может иметь вполне выраженную регулярность. Примером могут служить также концентрические кольца, образуемые лишайником *Parmelia centrifuga* (рис. 1Г). Концентричность распределения лишайников при их распространении вызвана истощением питательных веществ и их последующей регенерацией на субстрате. Известны целые классы спиральных бактерий, также преимущественно «правых».

Наиболее известный пример, которой позволяет выделить характерные режимы поведения активной среды - колебательная химическая реакция Белоусова-Жаботинского-Заикина [2]. Эта реакция по своей природе такова, что в каждой точке реактора происходят самопроизвольные осцилляции, сопровождающиеся изменением цвета раствора. Если весь объем реактора быстро перемешивается, система ведет себя, как точечная - осцилляторы связаны перемешиванием. В этом случае во всем объеме наблюдаются синфазные самоподдерживающиеся осцилляции - автоколебания - раствор периодически изменяет цвет.

При отсутствии перемешивания в тонком слое жидкости реакция Белоусова-Жаботинского-Заикина становится распределенной системой - двумерной активной средой, в которой точечные осцилляторы последовательно взаимодействуют друг с другом, что сопровождается появлением распространяющихся концентрических цветных пространственных структур - автоволн (рис. 1Б). Эти кольцевые волны распространяются вокруг так называемых водителей ритма (т.н. пейсмекеров) - спонтанно возникающих центров колебаний. Водитель ритма с самой высокой собственной частотой постепенно "съедает" всех своих конкурентов и втягивает всю систему в работу со своей частотой вплоть до полного истощения запаса свободной энергии в системе. Распространяясь, автоволны не изменяют своей амплитуды, как это бывает с волнами в пассивной среде, где они затухают (как, например, звуки в воздухе). Автоволны не проходят друг сквозь друга, а аннигилируют при столкновении.

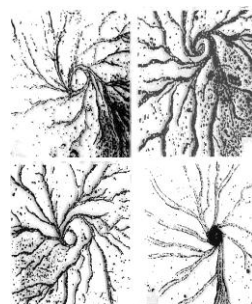
До сих пор речь шла об автоволнах в однородной среде. В неоднородной активной среде происходит искажение волнового фронта, возможен его разрыв, возникновение и размножение спиральных автоволн, т.н. ревербераторов (рис. 2Б). Ревербераторы иногда представляют собой сочетание право- и левозакрученных спиралей или вложение нескольких спиралей, соответственно, правых и левых (рис. 3А).



А



Б



В

Рис. 3. А – спиральные концентрационные волны разных порядков в реакции Белоусова. Б – поперечный разрез аксоподии солнечника; микротрубулы на поперечном срезе образуют две вложенные спирали. В – аттракторы разных порядков при агрегации слизевика *Dictyostelium discoideum*.

На фотографиях среза аксоподии солнечника *Actinosphaerium eichhorni* можно увидеть двойную вложенную спираль, образованную микротрубочками. По-видимому, здесь это уже фиксированный результат автоволнового формирования аксоподии (рис. 3Б). Эволюционный выбор подобной структуры, по-видимому, связан с ее высокой эффективностью для совершения аксоподией поворотов, вращений и укорочения при захвате частичек пищи.

Известен пример спиральной автоволновой самоорганизации так называемых «социальных» амёб *Dictyostelium discoideum*, объединяющихся в определенной фазе жизненного цикла в единый организм под действием специфического аттрактанта цАМФ, выделяемого отдельными клетками (рис. 3В). Отмечено волновое движение протоплазмы на представленной стадии морфогенеза, формирующее структуру из вложенных спиралей. Следует заметить, что волновые движения протоплазмы скорее не исключение, а правило. В ряде работ рассмотрены эксперименты и модели механохимических автоволн в протоплазме клеток плазмодия *Physarum polycephalum* и в яйцеклетках лягушки *Rana temporaria*.

Несколько лет назад Ф.И.Атауллахановым была высказана автоволновая гипотеза свертывания крови [4]. Было предположено, а затем и подтверждено экспериментально, что рост тромба обеспечивается распространением в крови концентрационной тромбиновой автоволны. При этом в зоне за движущимся фронтом этой волны создаются условия для зарождения еще одной автоволны – волны торможения свертывания. Последняя, двигаясь с большей, чем первая скоростью на некотором расстоянии от места повреждения сосуда настигает тромбиновую волну, останавливая дальнейшее свертывание.

### О двух фундаментальных асимметриях в биосфере

В биологических системах на клеточном и молекулярном уровнях имеется две фундаментальные асимметрии: ионная, определяющая термодинамическую неравномерность дискретных клеточных систем, а также хиральная (аминокислоты, углеводы, многие биомолекулы), лежащая в основе стереоспецифичности белков и нуклеиновых кислот [5 - 7]. Вне зависимости от своей физической природы хиральным объектом считается тот, который не может быть совмещен со своим отображением в плоском зеркале: ни перемещениями, ни поворотами, ни изменениями масштаба. По всем классам соединений биологические системы во всей биосфере гомохиральны (L или D). Это принципиально, и от этого свойства живой материи пошло представление о «хиральной чистоте биосферы».

Хиральные соединения содержат один и более асимметричных атомов углерода, являются оптическими энантиомерами, вращающими плоскость поляризации света в разные стороны, и не могут никоим образом быть совмещены со своим зеркальным изображением. Обе связанные между собой на молекулярном уровне асимметрии являются великолепным проявлением эволюционной приспособленности тех форм жизни, какие известны нам на Земле. Другие формы нам не известны. Но, как всегда, уникальность уязвима. Человечество активнейшим обра-

зом создает и выбрасывает в биосферу зеркальные формы биологически активных молекул, не свойственные земным организмам.

Известно, что в клетках содержится инвертированный по отношению к внеклеточной среде электролит: цитоплазма аккумулирует преимущественно катионы калия и кальция, тогда как во внеклеточной среде – крови и лимфе (как и в морской воде) содержатся, в основном, ионы натрия и магния.

Вместе с тем все организмы, входящие в биосферу, как и органические вещества биогенного происхождения, включают хиральные соединения: L-аминокислоты и D-сахара. Это связано с необходимостью стереоспецифичности белков и нуклеиновых кислот. Подобная хиральная асимметрия, сформировавшаяся, по всей видимости, еще в процессе абиогенной эволюции в галактике (что показывает анализ метеоритного вещества) и на Земле, была жестко закреплена в ходе биологической эволюции и однозначно реализуется на генетическом уровне и в биосинтезе.

Ранее нами была предложена, разработана и экспериментально обоснована гипотеза, касающаяся происхождения жизни на Земле, согласно которой возникновение исходно термодинамически неравновесных дискретных предшественников живых клеток связано с неравновесной «холодной» поверхностной пленкой мирового океана, где возникли ионная и хиральная асимметрии, свойственные живым клеткам [1, 5]. Термодинамическое неравновесие между морской водой и атмосферой возникает из-за охлаждения поверхностного слоя мирового океана вследствие испарения воды. В градиенте температуры в поверхностном слое происходят термодиффузионные, конвекционные и электрохимические процессы, вызывающие перераспределение ионов и хиральных органических молекул между объемной фазой воды и холодной пленкой.

Было установлено, что в результате тепломассообмена между морской водой и атмосферой поверхностная пленка обогащается ионами калия и кальция, а также одним из энантиомеров рацемической смеси аминокислот. В случае, когда поверхность морской воды покрыта монослоем липидов, асимметричное и неравновесное распределение катионов между первичной клеткой и водой, а также хиральная асимметрия аминокислот и углеводов, характерные для биологических систем, фиксируются при спонтанном замыкании липидных пузырьков-везикул в ходе образования аэрозолей при разрыве воздушных пузырей у поверхности воды. В условиях термодинамического равновесия между водной и воздушной фазами ионного и хирального фракционирования не происходит.

По-видимому, существует глубокий биофизический и эволюционный смысл в том, что энергетическая стоимость хиральной чистоты биополимеров некоей «обобщенной» клетки близка к энергетической стоимости ионной асимметрии [5]. Близкое совпадение значений свободной энергии, необходимой для создания хирально чистых биополимеров и ионной асимметрии клетки, может быть связано с общностью механизмов их первичного формирования. Бифуркация, в результате которой появились две неравновесные асимметрии, фундаментальные для живых систем, могли возникнуть и, вероятно, возникли в одно и то же время и в одном и том же месте в ходе общих процессов.

Ионная асимметрия в клетках поддерживается с помощью системы ионных насосов и каналов – мембранных белковых комплексов. Модельные компьютерные эксперименты, выполненные А.В.Дмитриевым, показали, что ионная избира-

тельность ионных каналов, в которых проведена замена L-аминокислотных остатков на D, драматическим образом теряется или изменяется [8]. Это еще одно свидетельство связи ионной и хиральной асимметрий.

### **Биологические эффекты хиральных соединений и экологическая безопасность**

Под экологической безопасностью в настоящее время понимается защищенность населения и экосистем от негативных последствий техногенных и природных антропогенно индуцированных катастроф, а также последствий антропогенного воздействия на качество компонентов окружающей среды. В связи с тем, что многие органические вещества природного и антропогенного происхождения имеют изомерные формы, существенно различающиеся по эффектам воздействия на живые организмы, вплоть до токсического и мутагенного, проблема «хиральной безопасности биосферы» приобретает все большее значение в результате интенсивного использования энантиомеров различных веществ [9, 10].

В последние десятилетия природа сталкивается с мощным потоком хиральных соединений, формируемых нефтяной, оптической, химической, перерабатывающей, фармацевтической, агрохимической, пищевой промышленностью и т.д. Хиральные соединения составляют около половины из всех синтезируемых органических соединений. Из десятков тысяч синтезируемых органических соединений только 30% соединений, используемых в фармацевтической промышленности, и около 25% веществ, используемых в агрохимии, контролируются и являются го-мохиральными (L или D). Эффект воздействия лекарственных препаратов, инсектицидов, органолептических и аллергических проявлений веществ связан с их хиральной чистотой.

Как правило, лекарства имеют положительный эффект в L-форме, что связано со стереоспецифичностью рецепторов, транспортных систем, комплементарностью взаимодействия белков-ферментов и нуклеиновых кислот с лигандами. Существуют хиральные фармпрепараты, эффективные в форме одного энантиомера и токсичные – в другой (например, талидамид, этамбутол, пеницилламин). Известна трагическая история 60-х годов, связанная с использованием лекарственного препарата талидамида в качестве успокоительного для беременных женщин. Оказалось, что положительным действием обладал L-изомер, его зеркальный энантиомер в ничтожной примеси приводил к генетическим мутациям и врожденным уродствам.

Область применения хиральных соединений чрезвычайно широка: от фармацевтических препаратов до сельского хозяйства и производства оптических кабелей. Традиционный химический синтез органических соединений, не включающий участие энантиоспецифических хиральных катализаторов, приводит к образованию рацемических смесей, содержащих равное количество D- и L-энантиомеров. Но и при их разделении и очистке, при хирально-специфическом синтезе, трансформации хиральных соединений в искусственных и природных условиях образуются токсические хиральные продукты. От 20 до 30% всего совокупного выброса антропогенных загрязнителей в мире являются отходами сельского хозяйства. В частности, новые методы защиты растений часто основаны на использовании хиральных нейропептидов, полусинтетических соединений или одного стереоизомера традиционного пестицида.

В результате переноса в составе водных аэрозолей барическими водными и ветровыми потоками из зон эмиссии хиральные поллютанты переносятся на расстояния межконтинентального масштаба. На сегодняшний день не существует ни норм предельного содержания в окружающей среде (ПДК) для различных хиральных соединений, ни общей картины путей миграции и превращений хиральных соединений, ни системы глобального биосферного мониторинга. Учитывая стремительное развитие химической, перерабатывающей, электронной промышленности, а также биотехнологий, можно с уверенностью прогнозировать, что в ближайшие десятилетия опасность “хиральных загрязнений” приобретет глобальный характер.

Настоящая работа выполнена при частичной поддержке Гранта НШ №1881.2003.2. и ФЦП «Интеграция».

### Литература

1. Твердислов В.А., Яковенко Л.В. Активные среды, автоволны и самоорганизация. От физико-химических систем к биологическим и социальным системам. // Российский химический журнал. (Журнал российского химического общества им. Д.И.Менделеева), 2000, том 44, вып. 3, с 21 – 32
2. Жаботинский А.М. Концентрационные автоколебания. // “Наука”, М., 1974, 178 с.
3. Буравцев В.Н. Периодический фазовый переход в растворе аммиака. //Журн. физ. химии, 1983, т. 57, с. 1822–1824 (За. Твердислов В.А., Яковенко Л.В. Электрические эффекты в интерфазном осцилляторе Буравцева. // В сб.: Нелинейные явления в открытых системах, 59-66. Гос. ИФТП, Москва 1995, ред. акад. Лупичев Л.Н.).
4. Атауллаханов Ф.И., Волкова Р.И., Гурия Г.Т., Сарбаш В.И., Сафрошкина А.Ю. Автоволновая гипотеза свертывания крови. // Физическая мысль России, 1995, N 1, стр. 64 – 73
5. Яковенко Л.В., Твердислов В.А. Поверхность Мирового океана и физические механизмы предбиологической эволюции. // Биофизика, 2003, Том 48, вып. 6, с. 1137 – 1146
6. Аветисов В.А, Гольданский В.И. Физические аспекты нарушения зеркальной симметрии биоорганического мира // Успехи физических наук. 1996 Т 166, №8, с 873-891
7. Гутина В.Н., Кузьмин В.В. Теория молекулярной диссимметрии Л.Пастера. // “Наука”, М., 1990, 215 с.
8. А.В.Дмитриев, В.А.Твердислов О методах расчета распределения потенциала в белковом канале. //Биофизика, 2004, Том 49, вып. 3, с. 506 – 510
9. Kallenborn R., Huhnerfuss H. Chiral Environmental Pollutants. // Springer Verlag Telos, 2001, 280 pp., Risk World Bookstore, 2001, ISBN 3540664238
10. В.А.Твердислов, В.В.Сидорова Хиральная безопасность биосферы как биофизическая проблема. // Биофизика, 2004, Том 49, вып. 3, с. 529 – 538

## СЕКЦИЯ 5

### ФИЗИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ МОНИТОРИНГА ПРИРОДНЫХ СРЕД

## УЛЬТРАФИОЛЕТОВАЯ ЛАЗЕРНАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ ВОДНЫХ СРЕД

Горелик<sup>1</sup> В.С., Козлова<sup>2</sup> Г.В.

*1 - Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН*

*2 - Московский государственный университет прикладной  
биотехнологии*

На основе разработанной методики импульсного ультрафиолетового возбуждения вторичного излучения водных сред исследованы спектры вторичного излучения проб воды, очищенных доступными фильтрующими системами. Порог чувствительности анализа для ароматических соединений, присутствующих в водных средах, составил 1 нг/л. Проведен анализ флуоресценции микроорганизмов, находящихся в водной среде. Применение метода задержки в системе регистрации вторичного излучения позволило отделить сигнал флуоресценции от сигнала комбинационного рассеяния, синхронного с импульсом возбуждения. Анализ вида спектров комбинационного рассеяния света в низкочастотной области позволил оценить степень структурирования воды, связанную с ее вкусовыми качествами. Разработанная методика позволяет также установить присутствие в исследуемых образцах тяжелой воды. По виду спектров флуоресценции микроорганизмов, расположенных в ультрафиолетовой области, устанавливаются тип микроорганизма, его концентрация в водной взвеси, а также степень деструкции под действием различных возмущающих факторов: жесткого ультрафиолетового излучения, нагревания.

### **1. Введение**

Молекулярная структура воды обусловлена как строением ее молекул, так и формированием так называемого дальнего порядка, приводящего к образованию микрокластеров и пространственно организованной «сетки». При введении в воду различных объектов в виде растворенных компонентов или частиц, находящихся во взвешенном состоянии, молекулярная структура воды может существенно видоизменяться.

Весьма эффективными средствами анализа молекулярной структуры и состава воды являются методы лазерной молекулярной спектроскопии, включающие в себя флуоресценцию (ФЛ) и комбинационное рассеяние света (КР) [1]. Характерным свойством воды является ее прозрачность в видимом и ультрафиолетовом спектральном диапазоне. В связи с этим представляется перспективным при изучении воды и более сложных молекулярных объектов, формируемых на ее основе, использовать для возбуждения спектров ФЛ и КР ультрафиолетовые источники света. В данной работе сообщается о результатах исследования различных проб воды,

водных растворов некоторых органических соединений и взвесей микроорганизмов при ультрафиолетовом лазерном возбуждении.

## 2. Методика исследований

Для решения поставленной задачи нами был использован разработанный в последние годы лазер на парах меди, характеризующийся сравнительно высоким коэффициентом полезного действия [2].

Схема экспериментальной установки, использованной в данных исследованиях, приводится на рис.1. Лазер на парах меди генерирует излучение в видимой области спектра с длинами волн 510,6 и 578,2 нм. Средняя мощность излучения для приборов такого типа может достигать 10 Вт. Излучение генерируется в импульсно-периодическом режиме с большой частотой следования (104 Гц) коротких (20 нс) импульсов генерации с пиковой мощностью 105 Вт. Высокая пиковая мощность лазерного излучения позволяет осуществить эффективное удвоение и сложение частот линий генерации лазера путем использования нелинейно-оптических кристаллов ( $\text{BaB}_2\text{O}_4$ ). Излучение от активного элемента лазера на парах меди, работающего в режиме неустойчивого резонатора, фокусировалось длиннофокусной линзой в нелинейно-оптическом кристалле  $\text{BaB}_2\text{O}_4$ . Кристалл  $\text{BaB}_2\text{O}_4$  был вырезан таким образом, что условие синхронизма выполнялось для удвоения частот исходного лазерного излучения. Таким образом, на выходе лазерной установки было получено ультрафиолетовое излучение с длинами волн 255,3; 271,2 и 289,1 нм. Наиболее эффективной для решения поставленной задачи оказалась вторая оптическая гармоника зеленой линии (510,6 нм) генерации, соответствующая длине волны излучения  $\lambda = 255,3$  нм. Излучение с такой длиной волны сильно поглощается всеми ароматическими соединениями, а также микроорганизмами, в составе которых присутствуют хромофорные группы в виде гетероароматических аминокислот (триптофан, тирозин, фенил-аланин) и нуклеиновых оснований (аденин, гуанин, цитозин, тимин и урацил).

Коэффициент преобразования видимого излучения в ультрафиолетовое составлял около 1%. Таким образом, возбуждающее ультрафиолетовое излучение характеризовалось средней мощностью 10 мВт и пиковой мощностью 100 Вт. Ультрафиолетовое излучение фокусировалось в цилиндрическую кварцевую кювету с плоскопараллельными окнами и прозрачной цилиндрической боковой поверхностью.

Вторичное излучение, возникающее в кварцевой кювете, представляет собой ФЛ ароматических и других хромофоров, а также КР, происходящее за счет неупругих процессов в молекулах воды и в других молекулах, присутствующих в воде в виде посторонних компонентов.



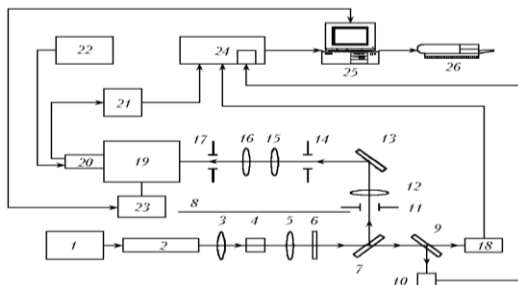


Рис. 1. Блок-схема экспериментальной установки для наблюдения вторичного излучения в водных растворах ароматических соединений: 1 – блок питания лазера; 2 – активный элемент лазера; 3, 5, 12, 15, 16 – кварцевые линзы; 4 – нелинейно-оптический кристалл; 6, 7, 9 – диэлектрические зеркала; 8 – экран; 10 – блок формирования стробимпульса; 11, 14, 17 – диафрагмы; 13 – кювета с исследуемым веществом; 18 – фотодиод; 19 – монохроматор; 20 – фотоумножитель; 21 – усилитель; 22 – блок питания ФЭУ; 23 – шаговый двигатель; 24 – система регистрации; 25 – компьютер; 26 – принтер

Подробное описание экспериментальной установки приведено в [3].

### 3. Спектры вторичного излучения различных проб воды, возбуждаемые ультрафиолетовым лазерным источником света

Известно [1], что в спектре КР воды присутствуют полосы, соответствующие трем фундаментальным типам колебаний молекулы  $H_2O$ : A1-тип,  $\nu_1 = 3450 \text{ см}^{-1}$  (валентное полносимметричное колебание); A1-тип,  $\nu_2 = 1645 \text{ см}^{-1}$  (деформационное полносимметричное колебание) и B1-тип,  $\nu_3 = 3830 \text{ см}^{-1}$  (валентное неполносимметричное колебание).

Частоты внутримолекулярных и межмолекулярных колебаний молекул воды, проявляющихся в спектрах КР [1]

Для исследования спектров КР воды нами были подготовлены различные пробы, полученные путем очистки исходной воды с помощью фильтрующих систем, разработанных к настоящему времени промышленностью. Для сравнения эффективности различных коммерческих фильтров были проанализированы спектры ФЛ проб воды, прошедших очистку с помощью этих фильтров. Рис.2

| Тип колебания | Частота, $\text{см}^{-1}$ |
|---------------|---------------------------|
|               | $H_2O$                    |
| $\nu_1$       | 450                       |
| $\nu_2$       | 780                       |
| $\nu_2(A1)$   | 1645                      |
| $\nu_1(A1)$   | 3450                      |
| $\nu_3(A1)$   | 3630                      |
|               | $D_2O$                    |
| $\nu_h2$      | 175                       |
| $\nu_1$       | 375                       |

иллюстрирует результаты анализа спектров ФЛ таких проб воды для различных фильтров. На этом рисунке слева присутствует возбуждающая линия ( $\lambda = 255,3 \text{ нм}$ ); затем виден резкий пик (показан стрелкой), соответствующий КР в воде на полносимметричном колебании  $\nu_1 = 3450 \text{ см}^{-1}$ ; при больших значениях длин волн проявляются полосы ФЛ, обусловленные присутствием ароматических

хромозомов в пробах воды. Как видно из этого рисунка, кривая 1 (фильтр «Аквафор Модерн») соответствует наименьшей концентрации ароматических компонентов. Для проведения количественного анализа были приготовлены образцы с различным содержанием ароматического компонента – флуорена.

На рис.3 приводится сопоставление спектров ФЛ пробы воды, прошедшей через фильтр «Аквафор Модерн» (кривая 4), водного раствора флуорена с концентрацией 1 мкг/л (кривая 5) и других проб воды (кривые 1, 2, 3), взятых из природных источников. Из этого рисунка следует, что концентрация ароматических компонентов в пробе, соответствующей кривой 4, находится на предельно низком уровне – 1 нг/л. Для пробы 1 уровень концентрации превышает ПДК (1 мкг/л). В пробах 2, 3 концентрация ароматических компонентов ниже уровня ПДК.

Были проведены сравнительные исследования спектров проб воды, очищенной фильтром «Аквафор Модерн», тяжелой воды D2O и смесей тяжелой и легкой воды. Для тяжелой воды характерно присутствие непрерывного фона в области внутримолекулярных частот; при этом колебание  $\nu_2(A_1)$  практически не обнаруживается в спектре КР. В смесях тяжелой и легкой воды проявляются интенсивные полосы, обусловленные валентными колебаниями  $\nu_1(A_1)$ ; в области межмолекулярных мод интенсивность либрационных мод в спектре КР для смеси резко падает.

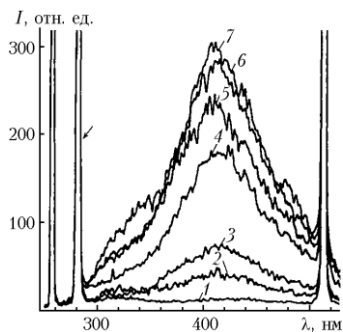


Рис. 2

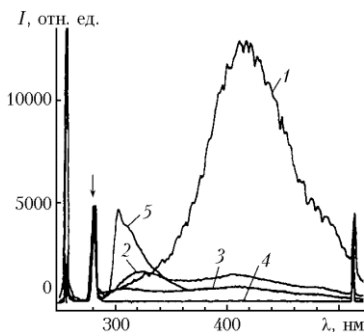


Рис. 3

Рис. 2. Спектры КР и ФЛ различных проб воды: 1 – «Аквафор Модерн», 2 – «Барьер», 3 – «Спринг», 4 – «Парагон», 5 – «Бриз», 6 – «Гейзер», 7 – исходная вода из водопроводной сети г. Москвы. Стрелка соответствует положению линии КР валентного колебания  $\nu_1(A_1)$  молекулы воды

Рис. 3. Спектры КР и ФЛ водных проб: 1, 2 – вода из водопроводной сети г. Москвы, 3 – «чистая» вода из Подмосквы, 4 – вода, очищенная с помощью фильтра «Аквафор Модерн», 5 – водный раствор флуорена с концентрацией 1 мкг/л. Возбуждение линий 255,3 нм. Стрелка показывает положение линии КР полносимметричного колебания  $\nu_1(A_1)$  молекулы воды.

Присутствие межмолекулярных мод либрационного и трансляционного типа в спектрах КР чистой воды свидетельствует об образовании квазикристаллической сетки молекулярных кластеров, т.е. характеризует степень структурированности воды. Структурированность воды является важным фактором, связанным с эффективностью усвоения воды клетками живых организмов. Интенсивность низкоча-

стотных полос КР, обусловленных межмолекулярными кластерными колебаниями, может служить дополнительным критерием качества воды.

Спектры вторичного излучения, приведенные на рис.2,3, соответствуют ситуации, когда строб-импульс в системе регистрации является синхронным с сигналом вторичного излучения. Возможность сдвига по времени этого строба позволила изучить спектры вторичного излучения, задержанные по отношению к импульсу возбуждающего излучения.

На рис. 4 приводятся спектры водного раствора антрацена с концентрацией 1 мкг/л. Важно отметить, что спектр «задержанной» ФЛ (кривая 2 на рис. 4) существенно отличается от «синхронного» спектра: резко ослаблены пики, обусловленные возбуждающим излучением ( $\lambda = 255,3$  нм) и КР, происходящим практически синхронно с импульсом возбуждающего излучения; ряд максимумов в «задержанном» спектре проявляется гораздо более отчетливо.

Рис. 5 иллюстрирует влияние задержки на спектры вторичного излучения водного раствора флуорена (1 мкг/л). При этом кривая 1 на рис. 5а получена при нулевой задержке, кривая 2 на этом же рисунке соответствует задержке  $\tau = 50$  нс; кривые 1 и 2 на рис. 5б получены с задержками  $\tau = 50$  и 70 нс соответственно.

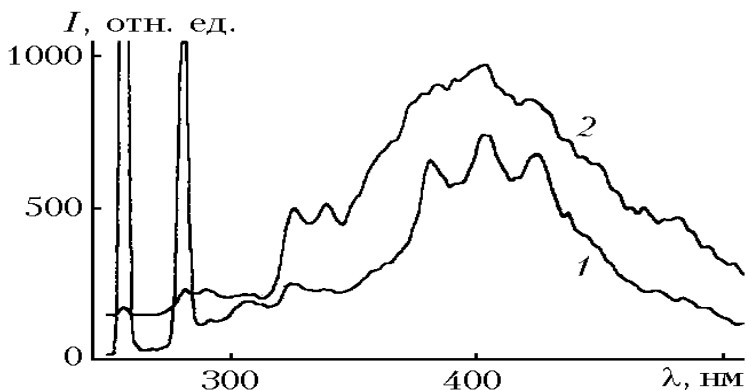


Рис. 4 Спектры вторичного излучения водного раствора антрацена, полученные без задержки (кривая 1) и с задержкой  $\tau = 50$  нс (кривая 2, приведена с 7-кратным увеличением). Возбуждение линией 255,3 нм.

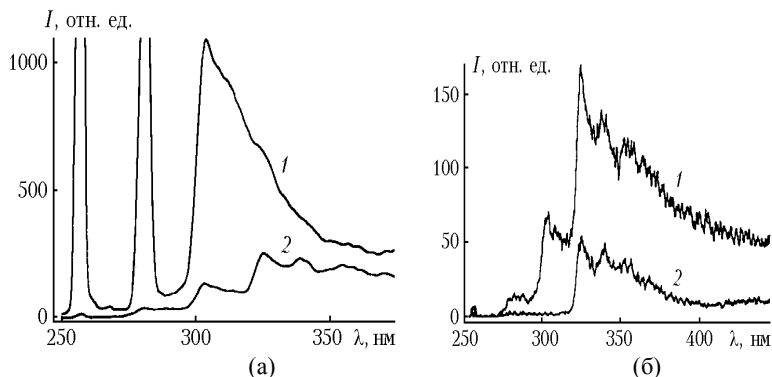


Рис. 5 Спектры вторичного излучения водного раствора флуорена (а): кривая 1 –  $\tau = 0$ , кривая 2 –  $\tau = 50$  нс при той же чувствительности; (б) кривые 1 и 2 соответствуют задержке  $\tau = 50$  и 70 нс. Возбуждение линией 255,3 нм. Максимум вблизи 280 нм (б) соответствует КР на полносимметричном колебании воды  $\nu_1(A1)$ .

Таким образом, анализ спектров вторичного излучения водных растворов с задержкой позволяет получать дополнительную информацию о типах и концентрации посторонних компонентов, присутствующих в воде. При этом происходит разделение двух видов вторичного излучения: комбинационного рассеяния, синхронного с возбуждающим импульсом, и ФЛ, «задержанной» во времени.

#### 4. Вторичное излучение микроорганизмов, находящихся в водной среде

Как одноклеточные, так и многоклеточные организмы могут быть источниками электромагнитного излучения, возникающего в результате процессов их жизнедеятельности. Известно, в частности, что живые организмы характеризуются ФЛ, спектр которой расположен в видимом диапазоне.

В микроорганизмах имеются хромофорные группы, связанные с присутствием гетероароматических соединений: аминокислот в белках и нуклеиновых оснований в ДНК и РНК. Спектр ФЛ таких групп соответствует среднему ультрафиолетовому диапазону. Однако вследствие сильного тушения этой ФЛ ее наблюдение до последнего времени было затруднено. В настоящей работе на основе развитой методики ультрафиолетового импульсно-периодического возбуждения вторичного излучения в конденсированных средах получены спектры вторичного излучения водных растворов триптофана, взвесей нуклеиновых соединений и двух типов микроорганизмов.

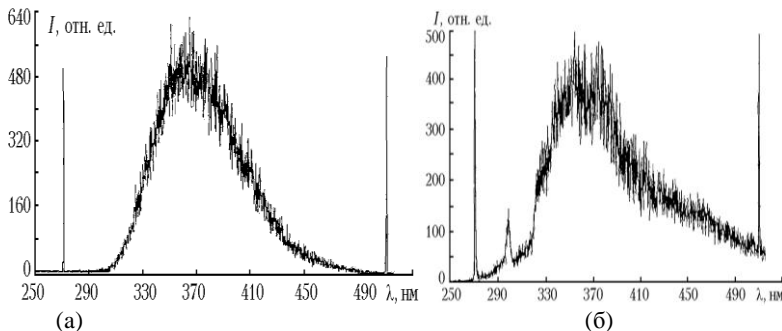


Рис. 6. Спектры ФЛ водного раствора L-триптофана (без задержки): а – концентрация 10 мг/л; б – концентрация 10 мкг/л

Рис. 6 иллюстрирует полученные спектры ФЛ водных растворов L-триптофана (основного хромофора белков), возбуждаемые линией 271,2 нм – составным тоном двух линий генерации лазера на парах меди. При большой концентрации (рис. 6,а) спектр ФЛ оказывается бесструктурным; при уменьшении концентрации до 10 мкг/л (рис. 6,б) обнаруживается тонкая структура в наблюдаемом спектре.

На рис. 7 показан вид спектра ФЛ гуанозинтрифосфата (ГТФ), полученный при возбуждении линией  $\lambda = 271,2$  нм без задержки ( $\tau = 0$ ). Как видно из этого рисунка, в наблюдаемом спектре непосредственно вблизи возбуждающей линии проявляются линии резонансного КР, характерные для данного соединения, а при больших длинах волн – полоса ФЛ с максимумом в области 300 нм. Следует отметить, что, как видно из сравнения рис. 6,7 максимум в спектре ФЛ ГТФ сдвинут в коротковолновую область по отношению к максимуму L-триптофана.

В качестве одного из объектов исследования была выбрана бактерия *Bacillus thuringiensis*, находящаяся в споровом состоянии в физиологическом (0,9%) водном растворе. Концентрация микроорганизмов изменялась в диапазоне 10–106 мл<sup>-1</sup>. Рис. 8 и 9 иллюстрируют вид спектров ФЛ водной взвеси такой бактерии для концентрации 103 мл<sup>-1</sup>.

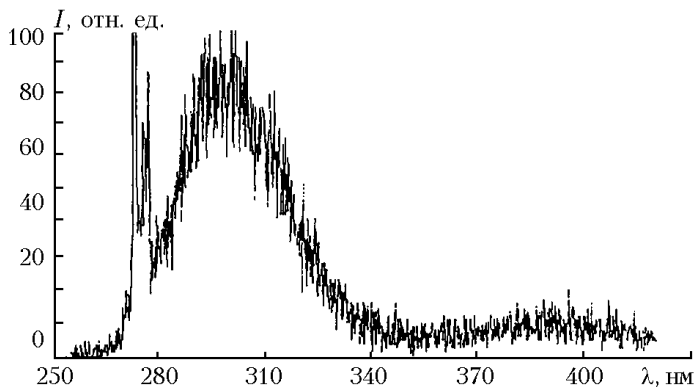


Рис. 7. Спектры резонансного КР и ФЛ ГТФ. Возбуждающая –  $\lambda = 271,2$  нм (слева); КР – резкие пики вблизи возбуждающей линии; широкая полоса в области 300 нм – ФЛ

При этом спектр, представленный на рис. 8, соответствует бактерии *in vivo*, а спектр на рис. 9 – бактерии, предварительно подвергнутой облучению жестким ультрафиолетом (ксеноновой лампой) в течение 30 мин. Как видно из сравнения рис. 1.5.12 и 1.5.13, в результате облучения бактерий жестким ультрафиолетом происходит существенное изменение вида спектра ФЛ.

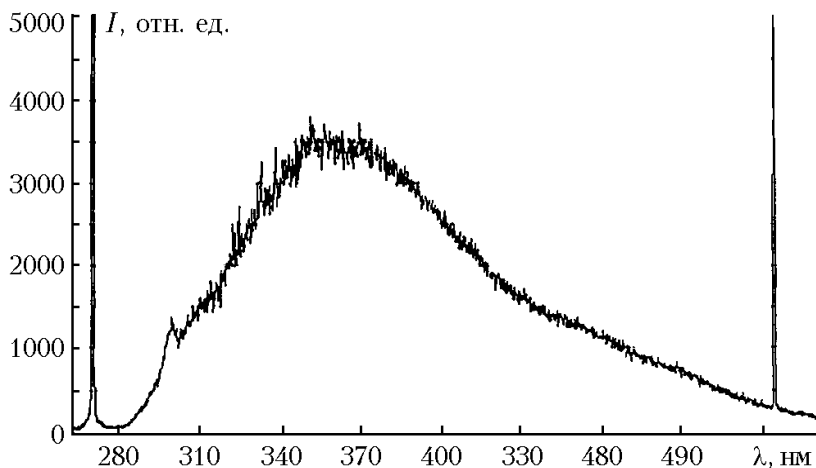


Рис. 8. Спектр ФЛ бактерии *Bacillus thuringiensis* при концентрации 103 мл<sup>-1</sup> (*in vivo*). Возбуждение линией 271,2 нм

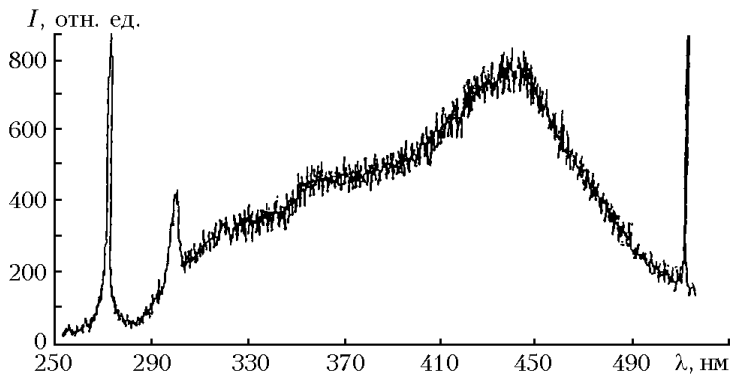


Рис. 9. Спектр ФЛ бактерии *Bacillus thuringiensis*, подвергнутой воздействию жесткого ультрафиолетового облучения в течение 30 мин. Концентрация бактерий в водной взвеси – 103 мл-1. Возбуждение линией 271,2 нм

При этом максимум спектра перемещается в длинноволновую область до 450 нм. Такой эффект можно объяснить деструкцией микроорганизмов, при которой длинные цепи белков и ДНК превращаются в короткие цепочки полипептидов.

На рис. 10 приведено изменение вида спектра ФЛ микроорганизма *Bacillus thuringiensis* при переходе от синхронной с импульсом возбуждения ( $\tau = 0$ ) регистрации (рис. 10,а) к регистрации с задержкой  $\tau = 50$  нс (рис. 10,б). Как видно, при использовании задержки спектр ФЛ приобретает ряд характерных максимумов, что может быть использовано для идентификации типа анализируемого микроорганизма.

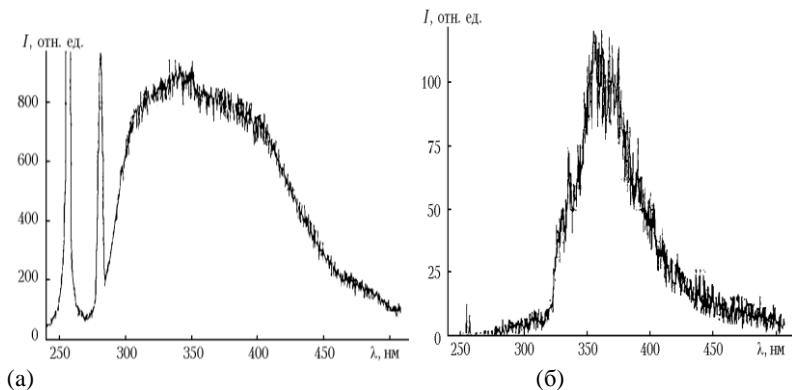


Рис. 10. Спектры ФЛ микроорганизма *Bacillus thuringiensis* при концентрации 105 мл-1 в воде: а – при нулевой задержке ( $\tau = 0$ ); б – с задержкой  $\tau = 50$  нс. Возбуждение линией 255,3 нм

Рис. 11 и 12 иллюстрируют спектры ФЛ водной взвеси другого микроорганизма: бактерии *Bacillus subtilis* при концентрации 102 мл<sup>-1</sup>. Спектр на рис. 12 соответствует взвеси бактерий, предварительно кипятившейся в течение 20 мин. Как видно из наблюдаемых спектров, кипячение приводит к частичной деструкции микроорганизмов, что проявляется в сдвиге максимума полосы ФЛ микроорганизмов в длинноволновую область.

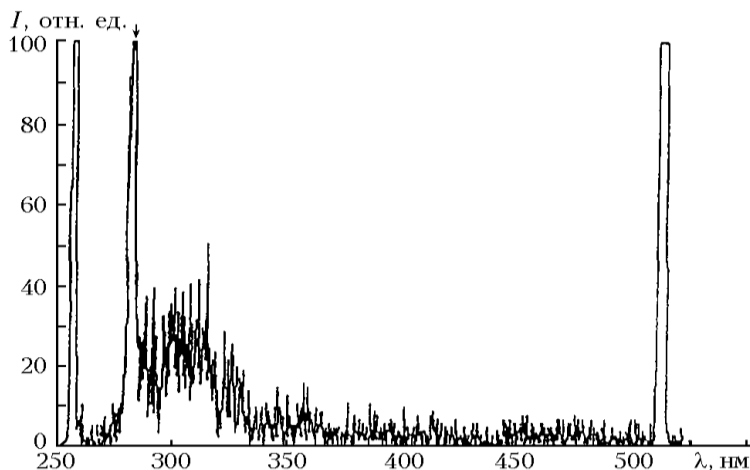


Рис. 11 Спектр ФЛ водной взвеси бактерий *Bacillus subtilis* при концентрации 102 мл<sup>-1</sup> (in vivo). Линия возбуждения –  $\lambda = 255,3$  нм. Стрелка соответствует линии КР в воде

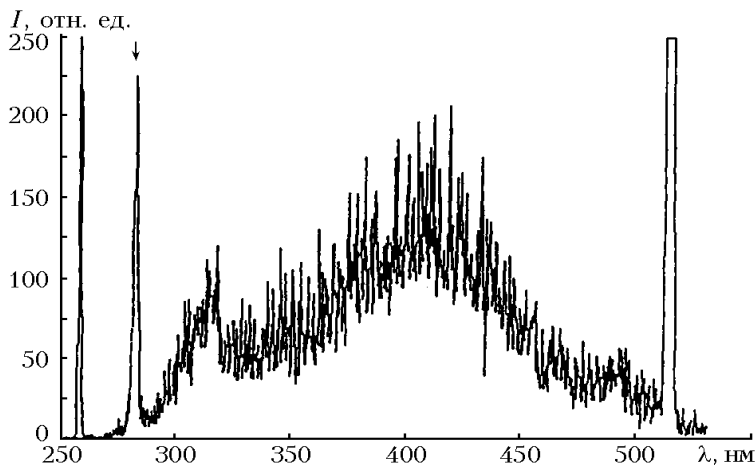


Рис. 12. Спектр ФЛ водной взвеси бактерий *Bacillus subtilis* при концентрации 102 мл<sup>-1</sup>, подвергнутой кипячению в течение 30 мин. Линия возбуждения –  $\lambda = 255,3$  нм. Стрелка соответствует линии КР в воде



## 5. Выводы

Таким образом, разработанная методика импульсного ультрафиолетового возбуждения вторичного излучения образцов воды, водных растворов и взвесей позволяет проводить анализ молекулярной структуры воды и посторонних компонентов, присутствующих в водной среде. Порог чувствительности анализа для ароматических соединений составил 1 нг/л. Это существенно ниже порога ПДК содержания типовых ароматических соединений в воде и позволяет идентифицировать наличие следов разных токсических веществ. Применение метода задержки регистрации вторичного излучения позволило отделить сигнал ФЛ от сигнала КР, синхронного с импульсом возбуждения. Анализ вида спектров КР воды в низкочастотной области позволил оценить степень структурирования воды, связанную с ее вкусовыми качествами и эффективностью усвоения организмами. Разработанная методика позволяет также установить присутствие в пробах тяжелой воды.

По виду расположенных в ультрафиолетовой области спектров флуоресценции микроорганизмов, устанавливаются тип микроорганизмов, их концентрация в водной взвеси, а также степень деструкции микроорганизмов под действием различных возмущающих факторов: жесткого ультрафиолетового излучения и нагревания.

## Литература

1. Walfaren G.E. J. of Chem. Phys. 1964, 40, p. 3249
2. Горелик В.С., Агальцов А.М., Моро Р.А. Лазерный анализатор молекулярной структуры и состава воды. "Наука – производству", №6, 2000. – с. 7 – 12.
3. Горелик В.С., Козлова Г.В., Куркин Ю.П., Показеев К.В. Лазерная спектроскопия пищевой продукции. МГУПБ, 2004 г., 157 с.

## ЛАЗЕРНАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ ПРИРОДНЫХ ВОД: ЗАДАЧИ КЛАССИФИКАЦИИ, ОБРАТНЫЕ ЗАДАЧИ

Т.А.Доленко, В.В.Фадеев

*Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова,  
физический факультет tdolenko@radio-msu.net,  
fadeev@lid.phys.msu.ru*

Концепция, методы и средства лазерного мониторинга водных экосистем входят в настоящее время на новый уровень: внедряются новые эффективные методы обработки данных и анализа результатов, эмпирические подходы сменяются научно обоснованными методами диагностики природных вод, адекватными их сложному составу.

В аппаратной реализации все больший приоритет завоевывают следующие два типа лазерных анализаторов.

- Лидары берегового базирования, предназначенные для квазинепрерывного неконтактного дистанционного контроля выбранной акватории с характерными размерами порядка 1 км. Лидары берегового базирования могут быть установлены в рекреационных зонах (пляжах, заповедниках и т.д.) и, напротив, в районах источников загрязнений (нефтяных терминалов, портов, промышленных, сельскохозяйственных и коммунальных предприятий и т.д.). Показатель эффективности/стоимость берегового лидара многократно выше этого показателя для других средств квазинепрерывного мониторинга (самолетов, вертолетов, патрульных судов).

- Портативные лазерные спектрометры для контактного дистанционного контроля выбранных горизонтов с борта судна, в том числе, маломерного. Один из вариантов созданных нашей группой портативных лазерных спектрометров оснащен световодным приемо-передающим зондом и прокачной кюветой. Заборное устройство погружается на заданный горизонт, и вода прокачивается через лазерный спектрометр, установленный в судовой лаборатории и регистрирующий эхо-сигнал. Такие спектрометры мы использовали в экспедициях на маломерных судах «Акванавт» на Черном море, «Ареал» на Рыбинском водохранилище, на экологическом патрульном судне «Россия» на Волге и Северном Каспии.

На рис.1 представлен типичный вид получаемых спектров природных вод. В этих спектрах доминируют: линия рассеяния на взвеси (рассеяние Ми), полоса комбинационного рассеяния (КР) воды, полосы флуоресценции растворенного органического вещества (РОВ), в том числе, водного гумусового вещества (ВГВ) и нефтяных загрязнений (НЗ), фитопланктона (ФП). Столь высокие интенсивности полос флуоресценции органических примесей по сравнению с интенсивностью полосы КР воды, как это имеет место на рис. 1, характерны для внутренних водоемов (рек, водохранилищ). Длины волн возбуждающего лазерного излучения подбираются в зависимости от того, какую полосу необходимо использовать для диагностики.

В наших спектрометрах и лидарах используются три гармоники ИАГ:Nd лазера с длиной волны 532, 355, 266 нм.

Из спектров эхо-сигналов извлекается информация о различных параметрах водной среды, т.е. решаются обратные задачи лазерной спектроскопии. Такого рода спектры, в принципе, содержат следующую информацию о воде: типы и концентрации растворенных органических примесей (БС - белковых соединений, НЗ, ФП, ВГВ), типы и концентрация неорганических примесей (соленость морской воды), температура воды, концентрация взвеси, молекулярные параметры флуорофоров, такие как времена жизни флуоресценции, сечения поглощения и/или воз-

буждения, квантовый выход в триплетное состояние, скорость синглет-синглетной аннигиляции и т.д. До последнего времени часть этой информации (в основном, температура, солёность, концентрации органических примесей) получалась эмпирическим путем. Становится очевидным, что этот путь не вполне соответствует особенностям объекта - его сложности и изменчивости. Поэтому требуется разрабатывать методические подходы, основанные на фундаментальных знаниях о природе и механизмах спектрального отклика водной среды при ее возбуждении лазерным излучением.

Это сложная и многоплановая проблема. Ее решение подразумевает разработку алгоритмов распознавания спектральных образов и классификации объектов на этой основе и алгоритмов решения обратных задач с количественным определением параметров среды, в том числе, молекулярных фотофизических параметров органических комплексов.

В основе разрабатываемых алгоритмов лежит влияние искомых величин на форму спектров комбинационного рассеяния и флуоресценции водной среды. Как показали многочисленные исследования, для разных представителей одного и того же класса примесей спектры мало отличаются друг от друга, и далеко не всегда можно свести наблюдаемые отличия к легко интерпретируемым количественным характеристикам спектра, таким, например, как положение максимума или полуширина.

В этой ситуации для решения обратных задач нами использовались алгоритмы, управляемые данными - искусственные нейронные сети (ИНС) [1]. Характерной особенностью таких алгоритмов является тот факт, что выделение признаков, на основе которых происходит анализ спектров, осуществляется самим алгоритмом. При решении большинства задач ИНС "обучается на примерах", т.е. для подстройки внутренних параметров нейронной сети необходимо предъявить набор спектров с известными "правильными ответами". Такой набор данных называется тренировочным набором, а процесс адаптации внутренних параметров сети называется её тренировкой или обучением.

Для оценки точности работы сети применяется специальный экзаменационный набор данных, для которого также известны "правильные ответы", и который никак не используется в процессе тренировки сети. Мы использовали искусственные нейронные сети для решения следующих физических задач лазерной спектроскопии природных вод:

Кластеризация спектров флуоресценции ВГВ.

Выделение флуоресцентного вклада НЗ на фоне флуоресценции ВГВ.

Идентификация неорганических солей по валентной полосе КР воды в однокомпонентных и двухкомпонентных растворах и определение их концентрации.

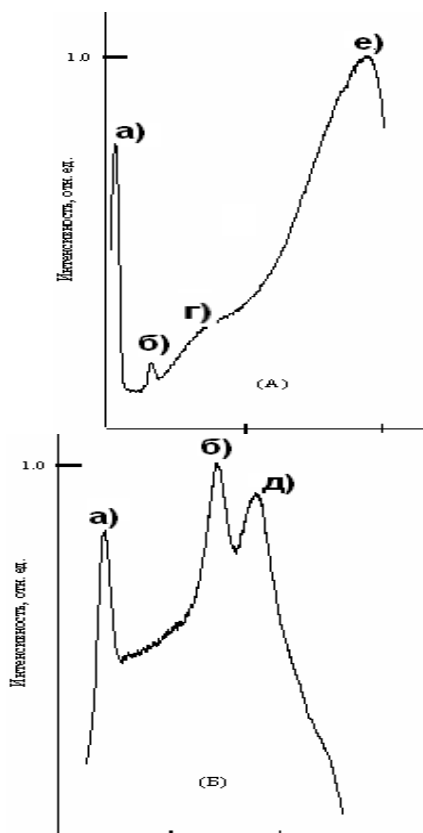


Рис.1 Типичные спектры флуоресценции природных вод при возбуждении лазерным излучением на А – 266 нм, Б – 532 нм: а) – рассеяние Ми, б) – КР воды, в) – флуоресценция РОВ, г) – флуоресценция НЗ, д) – флуоресценция фитопланктона.

Одновременное определение температуры и солёности морской воды по спектрам КР воды.

Определение фотофизических параметров органических соединений с помощью кинетической флуориметрии, нелинейной флуориметрии и "матричного метода".

Остановимся подробнее на этих задачах лазерной спектроскопии природных вод.

### **Кластеризация спектров флуоресценции ВГВ.**

Во время совместной экспедиции с немецкими партнерами из Института физики университета города Олденбурга в 2003 г. на корабле "Heinke" в районе Фризских островов (морской заповедник Wadden Sea) был получен массив спектров флуоресценции ВГВ (рис.2). Водная масса в этой акватории формируется под

влиянием вод открытого моря и выноса рек, поступление которых меняется под воздействием приливов и отливов.

Перед нами была поставлена задача кластеризации, т.е. разделения всего массива спектров на группы по схожести. В качестве инструмента кластеризации использовалась нейронная сеть Кохонена, с помощью которой все спектры, нормированные на интенсивность в максимуме, были разделены на три группы. Как известно, вид спектра флуоресценции воды зависит от типа растворенного в ней ВГВ (аллохтонное, автохтонное и т.д.). Одновременно с изменением типа ВГВ при переходе от речных вод к морским (а в последних – от вод береговой зоны к водам открытого моря) меняется и концентрация ВГВ: в речных водах она значительно выше, чем в морских. Поэтому были все основания предполагать, что именно классификация, выполненная нейросетью по признакам формы полосы флуоресценции, будет коррелировать с классификацией по величине интенсивности.

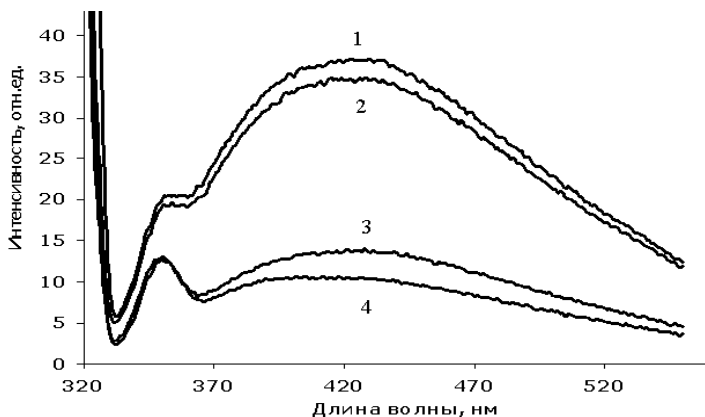


Рис.2 Спектры флуоресценции ВГВ в природных водах, полученные в районе Северного моря (Wadden Sea, Германия): 1,2 – в прибрежных водах, 3,4 – в открытом море.

Чтобы проверить справедливость этого предположения, для каждого из спектров рассчитывались количественные характеристики полосы флуоресценции, в частности, флуоресцентный параметр  $\Phi_0$ , равный отношению интенсивности в максимуме флуоресценции к интенсивности сигнала КР. Сравнение значений параметра  $\Phi_0$  для спектров каждой из трёх групп показало, что нейросеть выделила в одну группу спектры с малыми значениями параметра, в другую – спектры с большими значениями параметра; в третьей группе остались спектры с промежуточными значениями параметра  $\Phi_0$ .

Таким образом, спектры флуоресценции по форме были разделены нейронной сетью на три группы, соответствующие речным, морским и смешанным водам. Отметим сразу, что классификация по признакам формы является универсальной (в определенном смысле – абсолютной), в отличие от классификации по величине параметров  $\Phi_0$ .

Так как нейронная сеть является устойчивой к шумам, то есть основания полагать, что полученная в этом эксперименте сеть сможет различить спектры речных, морских и смешанных вод и в ситуациях, когда на форму спектра флуоресценции будут оказывать влияние и другие примеси, кроме ВГВ. Проверке этого предположения будут посвящены дальнейшие исследования этой задачи.

### Выделение флуоресцентного вклада НЗ на фоне флуоресценции ВГВ.

Выделение вкладов компонентов в спектры флуоресценции смесей органических соединений чрезвычайно важно, например, для определения концентрации нефтяных загрязнений (НЗ) в природных водах *in situ* на фоне растворенного ВГВ. Проблема осложняется тем, что полосы флуоресценции НЗ и ВГВ сильно перекрываются (рис.3), а флуоресцентный вклад НЗ, как правило, на 1-3 порядка меньше флуоресцентного вклада ВГВ. В настоящее время анализ таких проб на содержание в них НЗ осуществляется в лабораторных условиях с применением процедуры экстрагирования НЗ из воды гексаном или четыреххлористым углеродом. На рис.3 приведены примеры спектров флуоресценции природных вод с нефтяными загрязнениями и водным гумусовым веществом.

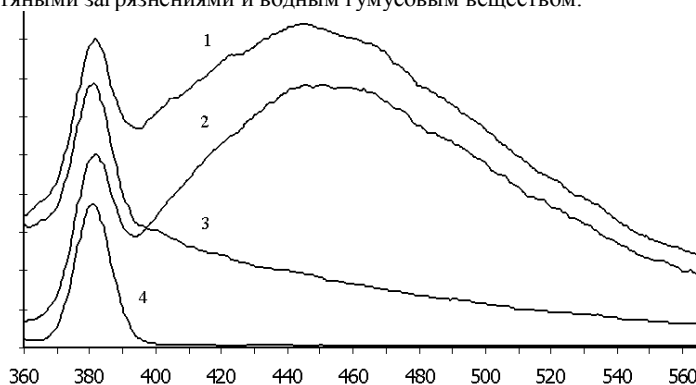


Рис.3 Спектры флуоресценции НЗ, ВГВ и их смеси: 4 – дистиллированная вода, 3 – НЗ в воде, 2 – ВГВ, 1 – смесь НЗ и ВГВ.

При решении этой задачи нужно учитывать, что из-за сложности объекта адекватная аналитическая модель спектра флуоресценции смеси сложных органических соединений с учётом взаимодействия компонент отсутствует. При применении ИНС нами использовались два подхода: "от эксперимента" и "квазимодельный" [2].

В первом случае нейронная сеть тренировалась на наборе экспериментальных спектров, для каждого из которых были известны парциальные флуоресцентные вклады НЗ и ВГВ. Преимущество этого подхода в том, что он автоматически учитывает возможное взаимодействие компонент. Однако для тренировки ИНС необходим достаточно большой объем экспериментальных спектров.

Второй - "квазимодельный" подход - состоит в том, что для обучения нейронной сети используются модельные спектры флуоресценции смеси, полученные пу-

тём линейной комбинации экспериментальных спектров флуоресценции каждой из исследуемых компонент (без учета их взаимодействия) с разными парциальными флуоресцентными вкладками.

В результате применения ИНС было показано, что: 1) оба подхода правомерны [2], 2) на фоне растворённого гумусового вещества можно определить парциальный вклад НЗ на несколько порядков меньший, чем ПДК (для природных вод России ПДК составляет 50 мкг/л).

### **Идентификация неорганических солей по валентной полосе КР воды в однокомпонентных и двухкомпонентных растворах и определение их концентрации.**

Благодаря различному влиянию солей и их концентрации на валентную полосу КР воды (рис.4,5) существуют реальные предпосылки для распознавания типа соли и определения ее концентрации в растворе по валентной полосе КР воды.

Однокомпонентные растворы.

Первая часть поставленной задачи представляла собой задачу классификации - по валентной полосе КР раствора определить, какая соль из пяти исследованных щелочно-галогидных солей растворена в воде. Использовалась ИНС, имеющая 5 выходов - по одному для каждой соли: единица на выходе соответствовала присутствующей в растворе соли, ноль означал, что соли в растворе нет.

Из полученных результатов следует отметить два факта. Первое: четыре соли (NaI, KI, NaCl и KCl) ИНС идентифицирует очень хорошо (с вероятностью 80...100%). Соль KBr сеть ошибочно причисляет к классу KCl (вероятность идентификации соли KBr составила 25%). Это объясняется тем, что влияние анионов I- на спектр КР воды гораздо сильнее, чем влияние анионов Cl- и Br- [3]. Второе, результаты распознавания солей на всех трех наборах данных (тренировочном, тестовом и экзаменационном) оказались близки, что говорит о хорошей представительности наборов и хорошем качестве результатов.

Вторая часть задачи заключалась в том, чтобы после классификации солей определить их концентрацию в воде. Для этого было обучено 5 ИНС для каждой соли. Каждая сеть имела один выход – концентрацию растворенной в воде соли. Расчеты показали, что с помощью ИНС можно определить концентрацию солей с погрешностью 0.06 – 0.09 М, что несколько меньше, чем погрешность определения концентрации растворенной в воде соли с помощью предыдущих методов [3].

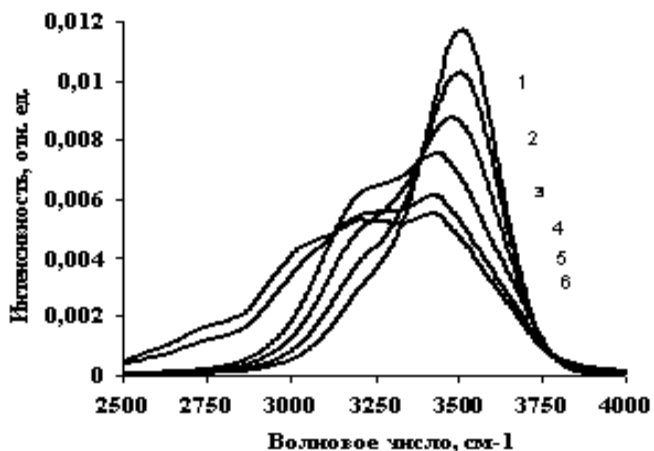


Рис.4 Валентные полосы спектра КР воды в растворах электролитов при разной концентрации солей: 1 - NaI, 6m (моляльность); 2 - NaI, 4m; 3 - NaI, 2m; 4 – дистиллированная вода; 5 – NH<sub>4</sub>F, 7m; 6 - NH<sub>4</sub>F, 12m.

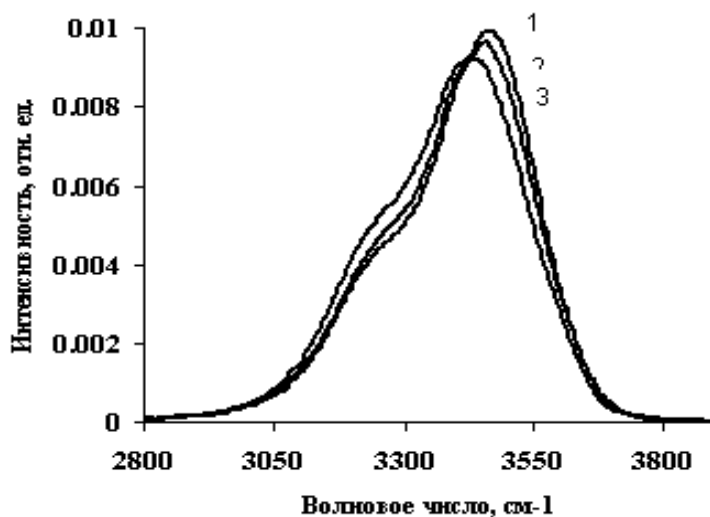


Рис.5 Валентные полосы КР воды в растворах солей калия (концентрация всех растворов - 3,2 m): 1 – KI, 2 – KBr, 3 – KCl.

### Двухкомпонентные растворы

Для идентификации одновременно двух солей (KI и KCl) в растворе по валентной полосе КР воды с помощью ИНС также использовались два подхода - «от



эксперимента» и «квазимодельный». В первом случае для обучения ИНС использовались все полученные экспериментальные спектры в двухкомпонентном и однокомпонентных растворах. Во втором случае использовались смоделированные спектры – из спектров однокомпонентных растворов солей с учетом их концентраций численно симулировались спектры двухкомпонентного раствора. Рассматривался диапазон изменения концентраций до 1.5 М. ИНС имела два выхода – концентрации одной и второй соли. В результате применения ИНС получили погрешность определения концентрации обеих солей в двухкомпонентном растворе 0.1 – 0.2 М.

### Одновременное определение температуры и солёности морской воды по спектрам КР воды.

Форма валентной полосы КР морской воды существенно зависит от температуры (Т) и солёности (S) воды (рис.6). Такая зависимость обеспечивает возможность определения указанных параметров воды из спектра КР. Для решения этой обратной двухпараметрической задачи - одновременного определения температуры и солёности морской воды - предварительно был получен массив спектров КР воды в диапазоне изменения Т от 4 до 47оС и в диапазоне изменения S от 0 до 36‰ (рис.6).

Использовалась ИНС, тренировка которой проводилась только на экспериментальных данных. В результате предъявления обученной ИНС проверочного набора было получено, что по валентной полосе КР можно одновременно определять температуру и солёность морской воды с точностью до 0.5°С и 0.5‰, соответственно. По сравнению с предыдущими результатами это несколько большая точность определения искомых параметров [3].

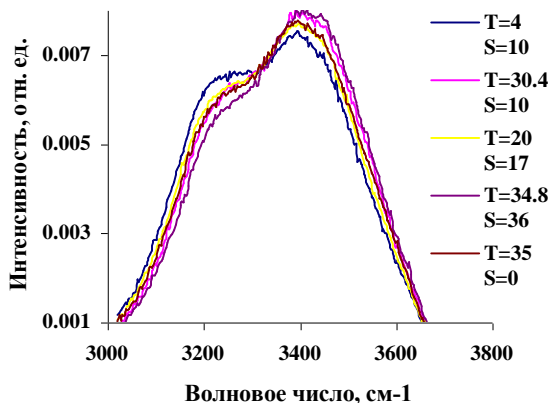


Рис.6 Экспериментальные спектры КР морской воды при разных температурах и разной солёности.

## Определение фотофизических параметров органических соединений с помощью кинетической флуориметрии, нелинейной флуориметрии и "матричного метода".

В нашей лаборатории решается большой класс обратных задач по определению молекулярных фотофизических параметров органических соединений из спектров флуоресценции с использованием кинетической и нелинейной флуориметрии [4]. Флуориметрия с переменным стробированием позволяет определить времена жизни флуорофоров в двухфлуорофорной смеси и отношение их флуоресцентных вкладов, причём применение нейросетей позволяет решать указанную задачу, используя аппаратуру с более низким временным разрешением, чем величины определяемых времен жизни. Нелинейная флуориметрия позволяет определять, помимо времени жизни флуорофора, также сечение поглощения, квантовый выход в триплетное состояние, константу скорости синглет-синглетной аннигиляции.

Нами предложен [5] так называемый матричный метод, который представляет собой синтез кинетической и нелинейной флуориметрии. Такое название связано с тем, что в эксперименте снимается матрица интенсивностей флуоресценции в зависимости от времени задержки строба и от плотности потока фотонов возбуждающего излучения.

$$M_{F.T} = \begin{bmatrix} I_{F_1 T_1} & \cdots & I_{F_1 T_t} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ I_{F_w T_1} & \cdots & I_{F_w T_t} \end{bmatrix}$$

где  $I_{FnTm}$  - интенсивность флуоресценции смеси органических веществ при плотности потока фотонов  $F_n$  возбуждающего излучения,  $T_m$  - времена задержки строба относительно к лазерному импульсу.

Таким образом, строки матрицы – это точки кинетических кривых при различных плотностях потока фотонов  $F$ ; столбцы - точки кривых насыщения при различных задержках строба приемника  $T$ . Диапазон изменения  $F$  должен выбираться таким образом, чтобы при малых значениях  $F$  насыщение флуоресценции отсутствовало, а при максимальных значениях – насыщение флуоресценции было бы значительным. Из физических соображений ясно, что благодаря различной зависимости разных элементов матрицы от внутримолекулярных параметров следует ожидать большую чувствительность сформированной матрицы к изменению параметров. Следовательно, эти фотофизические параметры могут быть определены с большей точностью в результате решения обратной задачи с использованием всей матрицы по сравнению с раздельным использованием кинетических кривых и кривых насыщения флуоресценции.

При малых значениях  $F$  затухание флуоресценции обусловлено временами жизни возбужденных состояний флуорофоров и переносом возбуждения между ними. При больших  $F$  (и при больших концентрациях флуорофоров) на затухание

флуоресценции большое влияние оказывают процессы синглет-синглетной аннигиляции. Таким образом, элементы приведенной матрицы представляют собой исходные данные для решения обратных задач кинетической и нелинейной флуориметрии для одно- и двухфлуорофорных смесей органических соединений.

В наших задачах рассматривается система двух флуорофоров с учётом взаимодействия между ними. Данная задача описывается большим количеством параметров: времена жизни флуорофоров, сечения поглощения, значения квантового выхода в триплетное состояние, константы скорости синглет-синглетной аннигиляции, коэффициент взаимодействия между флуорофорами, отношение флуоресцентных вкладов. Матрица интенсивностей для данной совокупности значений параметров может быть рассчитана аналитически. При большом числе определяемых параметров (для многопараметрической обратной задачи) более эффективным оказывается применение не нейронных сетей, а генетических алгоритмов. Генетические алгоритмы также принадлежат к классу методов, управляемых данными, и представляют собой специальный метод решения оптимизационных задач, соединяющий в себе высокую обзорность, свойственную переборным методам, и последовательное приближение к решению, свойственное градиентным методам. Наиболее отчетливо преимущества этого метода проявляются при средней размерности пространства поиска решения (5-15 параметров). Численный эксперимент показал, что для сформулированной выше задачи мы в настоящее время можем определить с удовлетворительной точностью (10-30%) 6-7 параметров.

Точность и количество искоемых параметров определяются погрешностью, с которой измеряется матрица интенсивностей флуоресценции. Поэтому нами ведутся работы по снижению экспериментальной погрешности, что, как мы ожидаем, может увеличить количество определяемых параметров, по крайней мере, до десяти.

### **Заключение**

Таким образом, наши исследования служат убедительным подтверждением эффективности применения современных технологий анализа данных (нейронных сетей, генетических алгоритмов и др.) для решения задач лазерной спектроскопии природных вод. Применение этих технологий позволило получить качественно новые результаты, которые невозможно было получить с помощью традиционных методов обработки спектров.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ №02-05-64430 и 03-02-16628.

### **Литература**

1. M.H. Hassoun. Fundamentals of Artificial Neural Networks. MIT Press, Cambridge, Massachusetts, 1995.
2. Dolenko T.A., Fadeev V.V., Gerdova I.V., Dolenko S.A., Reuter R. Fluorescence diagnostics of oil pollution in coastal marine waters using artificial neural networks. Applied Optics, 2002, v.41, №24, p.5155-5166.
3. Dolenko T.A., Churina I.V., Fadeev V.V., Glushkov S.M. Valence band of liquid water Raman scattering: some peculiarities and applications in the diagnostics of water media J. of Raman Spectroscopy, 2000, v. 31, №8-9, p.863-870.

4. Dolenko S.A., Dolenko T.A., Fadeev V.V., Gerdova I.V., Kompitsas M. Time-Resolved Fluorimetry of Two-Fluorophore Organic Systems Using Artificial Neural Networks. Optics Communications, 2002, v.213, No.4-6, p.309-324.
5. V.V. Fadeev, T.A. Dolenko, D.V. Il'in, P.N. Litvinov, A.A. Meshkantsov. Matrix method of laser fluorimetry of complex organic compounds in water. EARSeL eProceedings, 2004, v.3, №1, pp.191-196.

## СЕКЦИЯ 6

### ПРИКЛАДНЫЕ АСПЕКТЫ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ ФИЗИКИ

## ФИЗИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ИСТОЧНИКОВ УФ ИЗЛУЧЕНИЯ И ОЗОНА В СИСТЕМАХ ВОДОПОДГОТОВКИ.

Дамбраускас С.Г., Рахимов А. Т., Саенко В.Б., Юдин А.М., Яценко Б.П.

*МГУ им. М.В. Ломоносова, НИИЯФ им. Д.В. Скобельцына.*

### 1. Введение.

Хорошо известно, что чистая вода является источником жизни и здоровья. В то же время вода, не меняя внешне своих параметров, может содержать недопустимо большое количество болезнетворных микроорганизмов, вызывая вспышки заболеваний. К сожалению, эта опасность остается из-за устаревших сетей водоснабжения в большинстве городов России. К наиболее эффективным способам очистки и обеззараживания воды можно отнести бактерицидное и дезодорирующее действие ультрафиолетового (УФ) излучения и озона [1-10]. УФ и озонные технологии используются в высокоразвитых странах в течение примерно 100 лет, однако широкому внедрению этих технологий препятствует ряд обстоятельств. Прежде всего, эти технологии достаточно энергоемки и могут достаточно эффективно использоваться только на финишной стадии обработки воды, когда она достаточно прозрачна и прошла стадии предварительной очистки. Можно ожидать, что по мере разработки новых более эффективных источников УФ и озона, а также более глубокого понимания физико-химических основ взаимодействия УФ, озона

и их комбинации УФ/ОЗ с водной средой эти технологии будут внедряться более успешно. Мы обращаем внимание исследователей и технологов на возможность комбинированного использования УФ и озона [9]. Перспективностью использования комбинированной УФ/озонной технологии для очистки и обеззараживания воды обусловлена уникальными свойствами возбужденной водно-озоно-кислородной смеси как среды для протекания химических реакций. Комбинируя источники озона и УФ излучения, можно значительно интенсифицировать протекание окислительных реакций с участием возбужденных молекул и атомов кислорода, озона и образовавшихся радикалов. Кроме того, такое комбинированное воздействие может существенно снизить энергозатраты, необходимые для генерации УФ и озона.

Нами разработаны эффективные источники УФ и озона и предложены оригинальные системы водоочистки на их основе. Эффект ускоренного обеззараживания воды подтвержден при микробиологических испытаниях.

## 2. Источники УФ и озона для технологий водоподготовки.

Эффективность и безопасность технологического использования УФ-излучения и озона при подготовке питьевой воды в существенной мере зависят от знания особенностей взаимодействия УФ и озона с атмосферным воздухом и водой, которые представляют из себя многокомпонентные среды. Воздух может являться рабочей средой озонаторных установок и открытых плазменных источников УФ, поэтому целесообразно обращать внимание на состав окружающего воздуха. Состав окружающего воздуха следующий: азот (78,084 %), кислород (20,946 %), аргон (0,934 %), углекислый газ (0,03 %), плюс примеси в порядке убывания концентрации: неон, гелий, пары воды, метан, окись углерода, двуокись серы, озон, двуокись азота, радон, окись азота. Кроме того, в воздухе может находиться пыль, пыльца и другие вещества. Вода также является сложной многокомпонентной смесью, что затрудняет ее очистку и требует использования комплекса различных технологий.

Благодаря сильному фотопоглощению озона в верхних слоях атмосферы (полоса Хартли,  $\Delta\lambda = 220 - 290$  нм) на Землю проникает УФ-излучение с длиной волны  $\lambda \geq 290$  нм. Тем не менее, при грозовых разрядах и в лабораторных условиях возможна генерация более коротковолнового УФ - излучения. Порог пропускания относительно тонких слоев воздуха, воды и кварца находится вблизи  $\lambda \geq 180$  нм.

УФ-излучение. Биологический эффект УФ излучения зависит от его спектра, а время инактивации микроорганизмов - от интенсивности источника. Дезинфекция воды с помощью УФ в отличие от стерилизации химикатами действует на все микробы [5]. От вида микроорганизмов зависит только доза УФ радиации, необходимая для стерилизации. Наиболее полные микробиологические исследования проведены с использованием парортутных ламп низкого давления, излучение которых сосредоточено на 90 % в линии  $\lambda = 254$  нм. Как правило, для уничтожения 99,9 % большинства микроорганизмов доза УФ радиации составляет 5 - 10 мДж/см<sup>2</sup> и возрастает в 10 - 40 раз при воздействии на микроорганизмы, образующие споры. Исследования бактерицидной эффективности в области вакуумного ультрафиолета практически не проводились из-за отсутствия эффективных источников УФ, хотя известно [3], что первый пик фотопоглощения ДНК микроорганизмов (190 -200 нм) является более интенсивным, рис.1. При наличии открытых

плазменных источников УФ, интенсивно излучающих в широкой полосе длин волн  $\Delta\lambda = 180-300$  нм, следует ожидать более высокую бактерицидную эффективность такого источника по сравнению с известными парортутными лампами низкого давления (бактерицидными лампами,  $\lambda=254$  нм). При работе источников УФ, излучающих в спектральном диапазоне  $\lambda < 200$  нм, происходит фотосинтез озона, поэтому после грозы мы ощущаем запах озона. Отметим, что при работе бактерицидных ламп в помещениях происходит фотосинтез озона  $O_3$  и окислов азота  $NO$ . При длительной работе порядка десятков минут концентрация этих газов становится опасной для здоровья человека.

Отметим, что в высокоразвитых странах ведутся интенсивные исследования по созданию экологически безопасных установок. В частности, ведутся работы по замене источников УФ на основе парортутных ламп низкого давления. Эти бактерицидные лампы имеют высокий коэффициент полезного действия, однако их спектр испускания, сосредоточен в линии  $\lambda=254$  нм и достаточно хорошо согласован лишь со вторым более слабым пиком фотопоглощения ДНК микроорганизмов, первый более интенсивный пик фотопоглощения ДНК находится вблизи 180-200 нм [3]. Интенсивность УФ излучения бактерицидных ламп ограничена из-за самопоглощения в парах ртути на уровне порядка  $I = 10-3$  Вт/см<sup>2</sup> вблизи поверхности лампы и быстро падает с расстоянием как  $1/r^2$ , наличие ртути делает их экологически опасными устройствами. Тем не менее, бактерицидные установки на основе ртутных ламп широко используется в системах водоподготовки (фирма «ЛИТ»-Россия, фирма «Sanitron»-Япония).

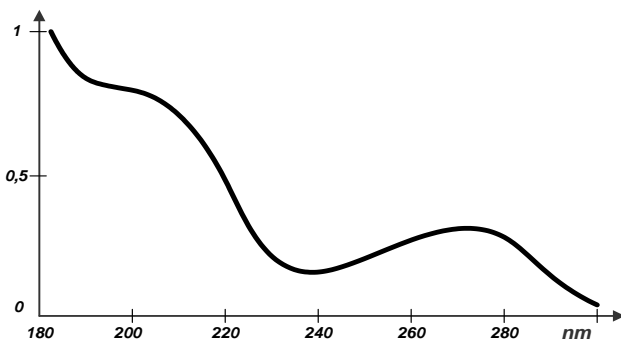


Рис.1. Характерный спектр фотопоглощения ДНК микроорганизма E-coli, [3].

Фирме АББ ( Швейцария, ФРГ ) [4] удалось сильно продвинуться в создании УФ-излучателей лампового типа на основе барьерного разряда в инертных газах. Фирма считает, что произвела революцию в технологии благодаря новым эксимерным УФ-излучателям и намерена существенно расширить свою деятельность в УФ-сфере. Эти лампы экологически безопасны, однако имеют ограниченную интенсивность УФ излучения из-за использования слаботоочного барьерного разряда. При создании этих источников излучения были использованы схемы организации разряда, применяемые при электросинтезе озона.

Нами [7-9] использован опыт при создании фотоионизационных лазеров и исследованы новые физические возможности по ускорению бактерицидного эф-

фекта УФ излучения за счет использования интенсивных и лучше согласованных по спектральным характеристикам плазменных источников УФ на основе линейки или матрицы микрошнуров плазмы, созданных в сильноточных разрядах короткой длительности.

Для проведения экспериментальных исследований использовались стандартные бактерицидные лампы, а также газоразрядные и лазерные источники УФ. Проведено сравнение бактерицидного воздействия УФ, создаваемого стандартной бактерицидной лампой БУВ-30 ( $\lambda=254$  нм), эксимерным ArF - лазером ( $\lambda=193$  нм) фирмы «Lambda Physics» и открытыми газоразрядными источниками УФ ( $\Delta\lambda=180-300$  нм), разработанными в отделе микроэлектроники НИИЯФ МГУ [7].

Исходя из анализа спектров фотопоглощения ДНК микроорганизмов, рис.1, были разработаны открытые плазменные источники УФ, рис.5, с соответствующим спектром испускания, рис.2.

Газоразрядный источник УФ выполнялся в виде линейки, кольца (рис.5) или матрицы микрошнуров плазмы с параметрами, близкими к Z-пинчу [8]. Разрядные промежутки имели зазор  $d \leq 1$  мм, энерговклад в излучающий микрошнур плазмы мог регулироваться в пределах от 1мДж до 1Дж. Использовался низкоиндуктивный RCL-разрядный контур, в котором запасенная электрическая энергия  $CU^2/2$  преобразовывалась в излучающую плазму микрошнуров.

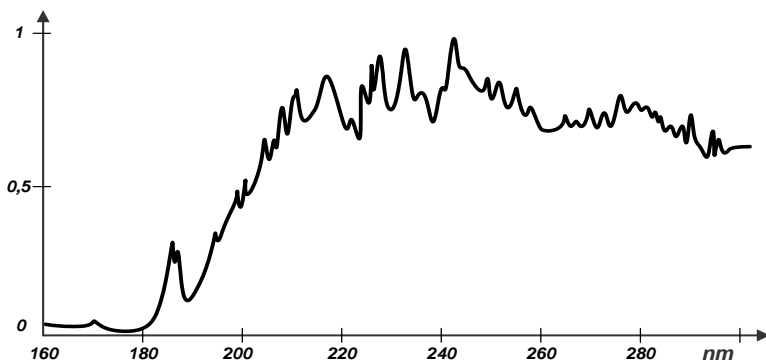


Рис.2. Спектр испускания микрошнуров воздушной плазмы, (источник УФ, рис.5).

Для качественной оценки бактерицидных свойств УФ излучения, создаваемого различными источниками, были проведены микробиологические исследования. Использовался тест-объект (микроорганизм E-coli). ArF-лазер работал в импульсно-периодическом режиме и создавал облученность в одиночном импульсе, равную 0,1 мДж/см<sup>2</sup>, на площади, перекрывающей поверхность чашки Петри с исследуемым тест-объектом. Чашка Петри устанавливалась на расстоянии 10 см. Аналогичный тест-объект облучался бактерицидной лампой БУВ-30 в непрерывном режиме с интенсивностью 0,1 мВт/см<sup>2</sup>. Исследовалась динамика гибели E-coli в зависимости от дозы облучения.

Для одинакового подавления жизнеспособности культуры (по удельной скорости роста) доза лазерного УФ излучения (193 нм) составила примерно 20% дозы УФ излучения от бактерицидной лампы БУВ-30 (254 нм). Аналогичные экспери-

менты были проведены при использовании плазменного источника Уф и ртутной лампы БУВ-30. Плазменный источник работал в импульсно-периодическом режиме. Мощность энергопотребления обоих источников Уф выбиралась одинаковой и составляла 30 Вт. Условия облучения тест-объекта также выбирались одинаковыми, чашки Петри устанавливались на расстоянии 10 см от излучателей Уф. Для одинакового подавления жизнеспособности культуры доза Уф, создаваемая плазменным источником, составила примерно 5% от дозы, создаваемой стандартной бактерицидной лампой БУВ-30. Такой достаточно сильный бактерицидный эффект можно объяснить хорошим согласованием спектров излучения предлагаемого источника Уф со спектром поглощения ДНК микроорганизмов и более однородной облученностью тест-объекта.

Исследована возможность инактивации микроорганизмов за 1 вспышку плазменного Уф излучателя. Такая необходимость может возникнуть в условиях чрезвычайных ситуаций в полевых условиях, когда необходимо произвести быстрое обеззараживание воды. Пропускная способность воды видна из рис. 3. Отметим, что в отличие от стандартных бактерицидных ламп, плазменный Уф излучатель мгновенно готов к работе, его параметры не меняются в зависимости от окружающей температуры в диапазоне  $\pm 50$  0С. В качестве обеззараживаемого объекта использовалась суточная суспензия тест - микроба (штамм 209-P *Staphylococcus aureus*) с густотой порядка 100 микробных клеток в 1 мл жидкости. Отмечалось отсутствие роста микроорганизмов при моноимпульсном разряде с энергозапасом более 5 Дж.

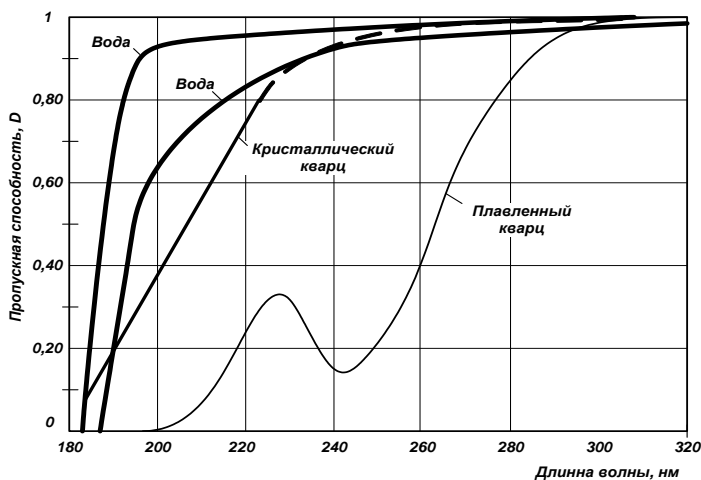


Рис.3. Пропускная способность воды и кварцевого стекла, [1].

Предлагаемый Уф-излучатель допускает линейное масштабирование, что позволяет создавать достаточно крупногабаритные технологические установки. Излучающая поверхность может принимать любую форму (линейную, кольцевую, плоскую, цилиндрическую и т.д.) с любой заданной апертурой. В отличие от других Уф-источников могут быть реализованы чрезвычайно высокие дозы Уф-



радиации в диапазоне 180 - 300 нм на поверхности или в поглощающем объеме воды. Снимается ряд проблем, связанных с компоновкой источника УФ для фотолитографии, что особенно важно при переходе к коротковолновому излучению.

В настоящее время в НИИЭФА им. Д.В. Ефремова подготовлен выпуск коротковолновых УФ-излучателей безлампового типа, рис. 5, и технологических установок на их основе.

Озон. Данные о биологическом действии озона на организм были накоплены с целью обоснования предельно допустимых норм его содержания в производственных помещениях и в салонах самолетов в связи с увеличением потолка полетов. Концентрация озона 1-10 мг/м<sup>3</sup> вызывает изменения в живом организме. В микроорганизмах процессы обмена идут гораздо интенсивнее, поэтому доза озонного воздействия для них ( бактерицидный эффект ) может быть такого же порядка, когда концентрация озона составляет 10 мг/м<sup>3</sup>, а время воздействия - десятки минут. Минимально ощутимая по запаху концентрация озона для человека равна 0,015 мг/м<sup>3</sup>. Предельно допустимой концентрацией озона (ПДК) в производственных помещениях считается 0,1 мг/м<sup>3</sup>, что примерно в 2-3 раза превышает естественное содержание озона в окружающей атмосфере. На активированном угле при комнатной температуре происходит быстрый распад озона до кислорода. Таким образом, после определенных работ по деструкции озона в производственных помещениях достаточно легко восстанавливается безопасная и чистая атмосфера. Отметим, что при содержании озона на уровне 0,5 ПДК наблюдается эффект «горного воздуха», что благоприятно сказывается на здоровье обслуживающего персонала.

Озон имеет многочисленные полосы поглощения во всем спектральном диапазоне от ИК до УФ. Сильное поглощение озона наблюдается в спектральном диапазоне  $\Delta\lambda = 100 - 300$  нм, полоса  $\Delta\lambda = 220 - 290$  нм известна как полоса Хартли и используется для диагностики концентрации  $O_3$  в озонсодержащих газовых средах. Максимум поглощения в полосе Хартли приходится на длину волны  $\lambda = 255$  нм, коэффициент поглощения  $K = 135 \text{ см}^{-1} \times \text{атм}$ . Озон диссоциирует при поглощении света с длиной волны  $\lambda < 900$  нм. При фотолитографии озона в полосах Хартли идет процесс образования возбужденного кислорода  $O_2(1D)$  и атомарного кислорода  $O(1D)$ . Квантовые выходы фоторазложения озона в присутствии воды гораздо выше, чем для чистого озона.

### 3. Эффект комбинированного воздействия УФ и озона.

Метастабильные состояния атомов и молекул благодаря энергии их возбуждения являются эффективным резервуаром химической энергии. Они химически очень активны по отношению ко многим молекулам, которые они возбуждают, диссоциируют или ионизируют.

Известно, что импульсный УФ фотолит озона в полосе поглощения Хартли ( $\Delta\lambda=220 - 290$  нм) является эффективным источником получения высоких концентраций химически активных частиц. В процессе облучения озono-воздушной или озono-кислородной среды УФ в полосе длин волн  $\Delta\lambda= 220 - 290$  нм происходит частичное разложение озона на метастабильные электронно-возбужденные частицы:  $O_2(1D)$  и  $O(1D)$  с большим радиационным временем жизни. Энергия возбуждения равна соответственно 1,97 эВ и 0,98 эВ. Реакционная способность (окисление) у атомов кислорода во много раз выше, чем у озона, а столь сильное внутреннее

возбуждение частиц усиливает ее еще больше. Таким образом, фотолиз смеси озон-вода приводит к появлению в среде достаточно высоких концентраций химически активных радикалов, молекул и возбужденных частиц. Возможность использования УФ/озонной - технологии в этом направлении обусловлена уникальными свойствами возбужденной озono-кислородной смеси как среды для протекания химических реакций. Поэтому, комбинируя источники озона и УФ излучения, можно значительно интенсифицировать протекание окислительных реакций с участием возбужденных молекул и атомов кислорода, а также молекул озона. Это приводит к тому, что в такой среде следует ожидать резкого ускорения процесса очистки и стерилизации воды. В настоящее время для озонирования разработаны компактные генераторы озono-кислородной смеси с концентрацией озона до 2 -5 % при проточке кислорода порядка 10 л/час [7,10].

#### 4. Система водоподготовки.

На основе совместных научно-исследовательских и опытно-конструкторских разработок, проводимых в отделе микроэлектроники (ОМЭ) НИИЯФ МГУ и в НТЦ «МИТ» ФГУП НИИЭФА им.Д.В.Ефремова разработаны источники УФ и озона, а также соответствующие УФ/озонные технологические установки. Принцип действия системы водоподготовки основан на хорошо изученных нами механизмах инактивации микроорганизмов при комбинированном воздействии УФ и озона. Принципиальная схема модуля водоподготовки представлена на рис.4, на рис. 5 представлен УФ-излучатель, производство которого освоено НИИЭФА.

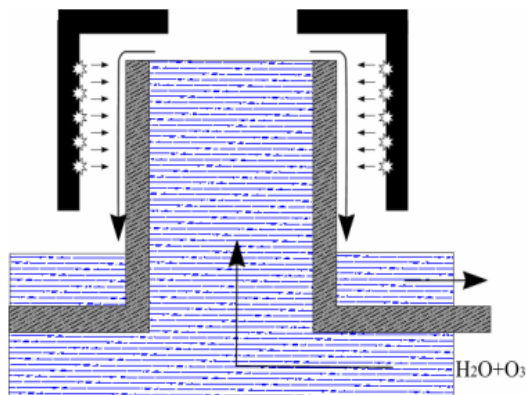


Рис.4. Принципиальная схема водоподготовки.



Рис.5. УФ-излучатель.

На рис.6. представлена функциональная схема блока водоподготовки.

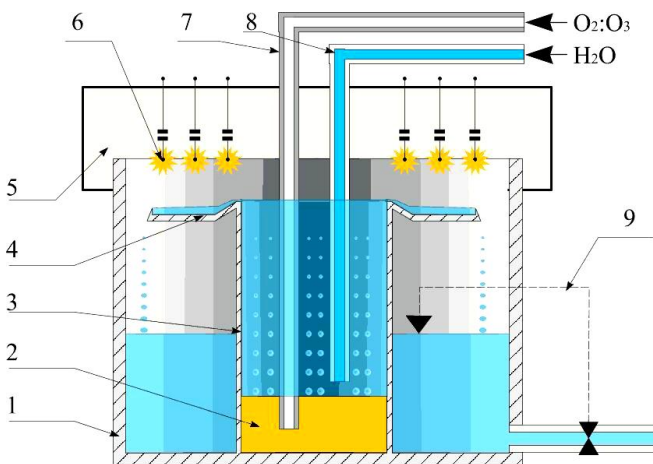


Рис.6. Функциональная схема блока водоподготовки: 1- камера, 2- пористая вставка для борбатажа озона, 3- камера для озонирования воды, 4- тарелка для организации тонкого слоя озонированной воды и оптической накачки УФ излучением, 5- открытый источник излучения, 6-матрица излучающих микрошнуров плазмы, 7- подача озонкислородной смеси, 8- подача воды, 9- система автоматического регулирования для набора чистой воды и последующего использования.

Данная система водоподготовки может размещаться непосредственно на территории потребителя и обеспечивает экологическую безопасность. В устройстве используется источник УФ с согласованным спектром излучения, который максимально приближен к спектру фотопоглощения ДНК микроорганизмов.

## 5. Заключение.

УФ/озонная технология максимально проявляет свои возможности только на финишной стадии водоподготовки, когда вода достаточно прозрачна и чиста. Основная функция на финишном этапе обработки предлагаемой установки - обеззараживание воды от микроорганизмов и дезодорация.

Учитывая реальные экономические трудности по замене устаревших городских сетей водоснабжения можно считать целесообразным использование дополнительных установок водоподготовки малой и средней мощности на основе УФ/озонной технологии, установленных в больницах, школах, детских садах и т.д. для финишной подготовки чистой питьевой воды. Работа такой установки автоматически начнется при открытии крана в сети подачи городской воды и способна выполнить все функции по фильтрации воды, обеззараживанию, дезодорации и разложению остатков хлора. При производительности по воде 60 л/мин, потребляемой мощности 100 - 200 Вт и повторно-кратковременном включении такая установка может обеспечить чистой водой достаточно большой коллектив людей, учитывая потребность в чистой питьевой воде 3-5 л/чел. Отметим, что все большее число потребителей воды рассматривает «питьевую воду» в городских сетях как техническую и для питья использует покупную воду в бутылках.

В отличие от известных бактерицидных ламп ( $\lambda=254$  нм) предлагаемый источник УФ может работать в более широком диапазоне температур окружающей среды от -50 до +50 оС, его спектр излучения лучше согласован со спектром фотопоглощения ДНК микроорганизмов в полосе длин волн  $\Delta\lambda=180 - 300$  нм, оптическая накачка рабочего объема любой формы и размеров осуществляется более однородно. Нами найдены технические решения, при которых УФ излучатель легко комплектуется с объектом обработки, имеет длительный ресурс работы, прост в эксплуатации, экологически безопасен.

*Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (РФФИ), грант № 02-02-08069-инно.*

## Литература.

1. А.Мейер, Э.Зейтц. Ультрафиолетовое излучение. Москва, ИЛ, 1952.
2. Я. Рабек. " Экспериментальные методы в фотохимии и фотофизике". М., Мир, 1985.
3. Бенсансон. Импульсный флеш-фотолиз и радиолиз: применение в биологии и медицине. Москва, Мир, 1987.
4. Б.Элиассон, Г.Эсром, У.Когельшатц. Новые УФ-излучатели для промышленных применений. Обзор АББ, АВВ Corp. Switzerland, № 3, 1991.
5. В.И.Вашков. Средства и методы стерилизации, применяемые в медицине. М., Медицина, 1973.

6. В.В.Лунин, М.П.Попович, С.Н.Ткаченко. Физическая химия озона. - Москва, МГУ, 1998.
7. В.Ю.Гусев, А.Т.Рахимов, В.Б.Саенко, А.А.Ястребов. Бактерицидные установки для медицины на основе плазменных источников ультрафиолетового излучения и озона. - М: Конверсия. № 6, 1993, с.41 - 43.
8. В.Иванов, Г.Б.Рулев, В.Б.Саенко. "Применение излучающих микрошнуров плазмы для создания открытых широкоапертурных источников УФ". Письма в ЖТФ, т.21, вып.7, с. 65-68, 1995.
9. V.Yu.Gusev, K.S.Klopovsky, D.V.Lopaev, A.T.Rakhimov, T.V.Rakhimova, G.B.Rulev, V.B.Saenko. "Physical and technical principles of express clean water preparation by using the sources of a ozone and ultraviolet ". Second International Congress " WATER: ECOLOGY AND TECHNOLOGY " (ECWATECH-96), Abstracts, p.151-152, MOSCOW, 17-21 September 1996.
10. П.С.Новиков, В.Б.Саенко. Способы и устройства ускоренной водоочистки с использованием источников озона и ультрафиолета. Труды МГУИЭ, Москва, 1998, с. 259-264.
11. Х. Окабе. Фотохимия малых молекул. Москва, Мир, 1981.

## ОЧИСТКА ВОДЫ В ОТКРЫТЫХ ВОДОЕМАХ ЗА СЧЕТ ЦЕПНЫХ РЕАКЦИЙ, ИНИЦИИРОВАННЫХ ГИДРОКСИЛЬНЫМИ РАДИКАЛАМИ

Пискарев И.М., Сопова Л.Ф., Ушканов В.А. (1), Аристова Н.А. (2)

*Научно-исследовательский институт ядерной физики им. Д.В.  
Скобельцына.*

*E-mail: piskarev@depni.sinp.msu.ru*

*Нижнетагильский технологический институт Уральского  
государственного технического университета (УПИ) E-mail:  
mormol@mail.ru*

Рассмотрена возможность инициирования цепных радикальных реакций окисления органических примесей воды в больших объемах жидкости. Предложено использовать для этих целей генератор озono-гидроксильной смеси, разработанный в НИИЯФ МГУ.

Известно, что одним из механизмов самоочищения воды в открытых водоемах являются реакции окисления перекисью водорода. Перекись водорода образуется в открытых системах под действием различных природных процессов, например: при грозе, под действием космического излучения, в различных химических реакциях. Установлено, что концентрация перекиси водорода в природных водах  $10^{-6}$  –  $10^{-8}$  моль/л. До 30% перекиси водорода распадается с образованием радикалов. Концентрация радикалов  $\text{OH}\bullet$  находится в пределах  $10^{-16}$  –  $10^{-19}$  моль/л, концентрация пероксидных радикалов  $\text{ROO}\bullet$  в морской воде порядка  $10^{-10}$  –  $10^{-11}$  моль/л [1]. Кинетика и механизм окисления органических веществ, в том числе фенольных соединений, рассмотрены в работе [2]. Были проекты, в которых предлагалось для очистки воды искусственно вырабатывать перекись водорода и сливать ее в водоем.

В данной работе рассмотрена возможность очищения воды путем инициирования цепных реакций с помощью гидроксильных радикалов. Для этого на берегу водоема нужно установить генератор озono-гидроксильной смеси. Загрязненная вода забирается с помощью насоса из водоема, обрабатывается озono-гидроксильной смесью и сбрасывается обратно в водоем. В воде инициируются цепные реакции, которые могут продолжаться длительное время во всем водоеме. Такая обработка за время порядка нескольких месяцев позволяет окислить от 20 до 40% органических примесей, содержащихся в водоеме. Оставшиеся примеси могут легче окисляться в естественных условиях.

Экспериментальная часть. Установка для инициирования цепной реакции окисления органических примесей в воде представлена на рис. 1.

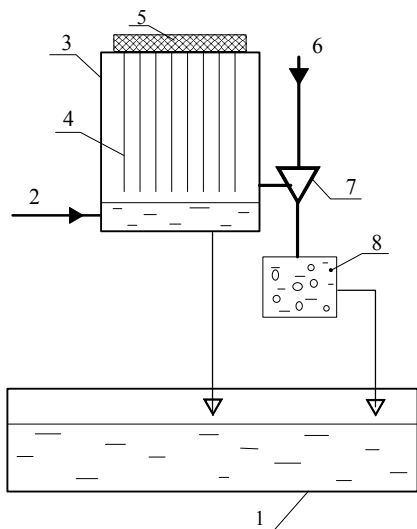


Рис. 1. Блок-схема экспериментальной установки. 1 – бассейн с обрабатываемой загрязненной водой; 2 – поток дренажной воды, охлаждающей реактор; 3 – корпус реактора; 4 – разрядные электроды; 5 – резисторная матрица; 6 – вход обрабатываемой загрязненной воды; 7 – эжектор; 8 – смеситель.

Радикалы вырабатывались в генераторе озono-гидроксильной смеси [3]. В генераторе между электродами и поверхностью воды зажигается вспышечный коронный электрический разряд. Под действием разряда образуются радикалы и озон, притом концентрация озона существенно больше. Радикалы, взаимодействуя

с озоном, превращаются из одного вида в другой:  $\text{OH}^\bullet \leftrightarrow \text{HO}_2^\bullet$ , сами радикалы не гибнут, на поддержание их «жизни» расходуется озон. Поэтому озono-гидроксильная смесь может транспортироваться за пределы реактора. Радикалы, образующиеся в области электрического разряда, уносились из реактора потоком воздуха, всасываемого эжектором. Поток жидкости через эжектор составлял от 0,6

до 5 м<sup>3</sup>/ч, жидкость смешивается с газом в соотношении 1:1. Эксперименты выполнены для бассейнов объемом от 11,5 до 8 10<sup>3</sup> л.

Использовались генераторы разного размера с разным числом электродов. На электроды подавалось высокое напряжение – 10 кВ, расстояние от электродов до поверхности воды 6 мм, число электродов в разных генераторах от 110 до 510, суммарный ток электрического разряда зависел от числа электродов и составлял от 6 до 35 мА, размеры самого большого генератора 700 x 500 x 300 мм.

Производительность генератора радикалов определяется суммарным током электрического разряда. Выход радикалов ОН• равен 32 моль/(моль электронов) или 32 радикала на один прошедший в цепи электрон [4]. Для генератора с током разряда 15 мА (мощностью 150 Вт) выход радикалов составляет  $N_0 \sim 5 \cdot 10^{-6}$  моль/с. Эффективность вывода радикалов  $\sim 1/3$ . Полный выход активных частиц (радикалы + озон) при разряде на воздухе составляет 150 моль/(моль электронов), однако озон не инициирует цепных реакций и в данном случае не играет решающей роли. Озон нужен в первую очередь для того, чтобы вывести радикалы из реактора. Практически все выведенные из генератора радикалы ОН•, взаимодействуя с органическим веществом, образуют новые радикалы R•, поэтому  $[R•] = [ОН•]$ .

В эжекторе жидкость смешивается с воздухом в соотношении 1:1. Максимальная концентрация кислорода в воде при комнатной температуре составляет 3 10<sup>-4</sup> моль/л ( $\sim 10$  мг/л). Сильно загрязненная вода, поступающая на вход эжектора, полностью лишена кислорода. За короткое время контакта пузырьков воздуха с водой часть кислорода может диффундировать в воду. Для дальнейших оценок величину средней концентрации кислорода в воде примем  $[O_2] \sim 3 \cdot 10^{-6}$  моль/л.

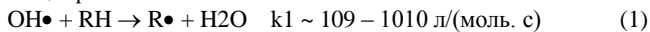
Результаты и обсуждение. Для экспериментов использовалась фенольная сточная вода коксохимического производства, основными органическими компонентами которой являются фенолы и минеральные масла. Начальное значение химического поглощения кислорода ХПК = 2000 мг О/л. ХПК измеряли стандартным методом путем кипячения пробы в кислой среде с бихроматом калия и последующим титрованием солью Мора.

Первая проба воды обрабатывалась на установке с объемом бассейна 11,5 литра. Использовался генератор, работающий при токе разряда 6 мА. Скорость циркуляции жидкости в эжекторном контуре составляла 6 л/мин. Уменьшение ХПК раствора за 1 час обработки составило 120 мг О/л.

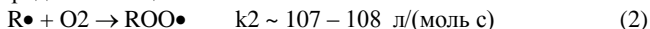
Вторая проба воды обрабатывалась на установке с объемом бассейна 8 10<sup>3</sup> л. Использовался генератор с рабочим током разряда 35 мА. Скорость циркуляции воды через эжектор 20 л/мин. Уменьшение ХПК раствора за 24 часа обработки составило 200 мг О/л. Значение рН уменьшилось от 7,5 до 5.

Схема окисления. Окисление органических примесей в воде происходит по цепному механизму [5]. Для случая, когда окисление инициируется гидроксильными радикалами, схема процесса выглядит следующим образом (здесь R• - органический радикал).

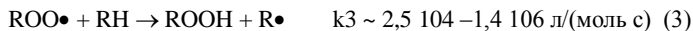
Инициирование



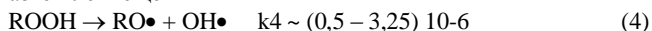
Продолжение цепи



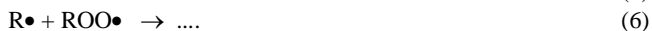




Разветвление цепи

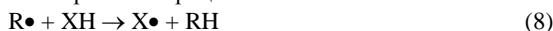


Обрыв цепи



В реакциях 5 – 7 образуются неактивные продукты,  $k_5 - k_7 \sim 10^6 \text{ л/(моль с)}$ .

Ингибирование процесса



Процесс сильно замедляется, если радикал  $X\bullet$  окажется малоактивным. В малом объеме (~ 100 мл) и при постоянном воздействии окислителей вторично образовавшиеся радикалы будут взаимодействовать между собой (реакции 5 – 7), либо с радикалами-окислителями ( $OH\bullet$ ), и цепной процесс не наблюдается [6]. Однако с увеличением объема системы концентрация вторично образовавшихся радикалов становится мала и вероятность гибели радикалов сильно уменьшается.

Скорость процесса цепного окисления определяется скоростью реакций (2 – 3) и зависит от концентрации радикалов. Лимитирующей стадией цепного процесса является реакция (2), так как скорость поступления кислорода в воду ограничена, а концентрация исходного органического вещества в сильно загрязненной воде всегда велика. В процессе окисления радикалы не гибнут, их число сохраняется. Радикалы гибнут в реакциях рекомбинации (5 – 7) и становятся малоактивными, переставая давать заметный вклад, после реакции (8).

Рассмотрим условия протекания цепной реакции в трех случаях:

1. Замкнутый водоем (пруд). 2. Проточный водоем (бассейн очистного сооружения). 3. Открытая система (море, прибрежная зона). Оценим концентрацию радикалов в обрабатываемом объеме при установлении стационарного состояния.

1. Замкнутый водоем.

Как упоминалось выше, эффективность вывода радикалов из генератора составляет ~ 1/3 [3]. Производительность генератора радикалов  $N_0$ . Расходятся радикалы в реакциях обрыва цепи (5 – 7) и реакциях (8), продуктами которых являются малоактивные радикалы. Скорость реакции (8) может намного превышать скорость реакции обрыва цепи (5 – 7). Для численных оценок предположим, что  $w_5 = w_6 = w_7$ , а  $w_8 = 10w_5$ . Тогда уравнение баланса радикалов при стационарном состоянии в бассейне объемом  $V$  примет вид:

$$\frac{1}{3} N_0 = (w_5 + w_6 + w_7 + w_8) \cdot V \sim 13w_5 V = 13k_5 [R\bullet]^2 V$$

$$[R\bullet] = \sqrt{\frac{N_0}{39k_5 \cdot V}} \quad (9)$$

Откуда

2. Проточный водоем. Радикалы поступают со скоростью  $1/3 N_0$ , расходуются в реакциях ингибирования и обрыва цепи со скоростью  $13w_5$  и уносятся из объема

потоком жидкости со скоростью  $V_L$ . Тогда в стационарном состоянии

$$\frac{1}{3}N_0 - 13k_5V[R^\bullet]^2 - [R^\bullet] \cdot V_L = 0$$

отсюда стационарная концентрация радикалов

$$[R^\bullet] = \frac{-V_L \pm \sqrt{V_L^2 + \frac{52}{3}k_5 \cdot V \cdot N_0}}{26V \cdot k_5} \quad (10)$$

При малом потоке воды  $V_L \ll V$  выражение (10) переходит в выражение (9).

3. Открытая система. Радикалы сбрасываются в море в одной точке. Вокруг этой точки образуется пятно, в пределах которого разбавлением морской водой можно пренебречь. В пределах пятна ситуация аналогична проточному водоему. Радикалы поступают в область пятна со скоростью  $1/3N_0$ , расходуются в реакции обрыва цепи со скоростью  $13w_5$  и уносятся со скоростью, равной скорости течения воды из эжектора  $V_f$ . Объем пятна

положим равным  $V_0$ . В стационарном состоянии

$$\frac{1}{3}N_0 - 13k_5V[R^\bullet]^2 - V_f[R^\bullet] = 0$$

$$[R^\bullet] = \frac{-V_f \pm \sqrt{V_f^2 + \frac{52}{3}k_5V_0N_0}}{26V_0k_5} \quad (11)$$

Откуда

Здесь  $V_0$  и  $[R^\bullet]_0$  - объем пятна и концентрация радикалов внутри пятна. За пределами пятна при  $V > V_0$  имеет место разбавление морской водой, концентрация уменьшается обратно пропорционально объему:

$$[R^\bullet] = \frac{V_0}{V} [R^\bullet]_0 \quad (12)$$

Если унос радикалов на значительные расстояния, где их концентрация сильно убывает, происходит быстро, то гибелью радикалов при взаимодействиях между собой можно пренебречь.

Оценим теперь скорость окисления:  $w_2 = k_2[R^\bullet][O_2]$ . Примем для численных оценок минимальное значение константы скорости реакции  $k_2 = 107$  л/(моль·с). Примем также концентрацию кислорода в воде

$$[O_2] = 3 \cdot 10^{-6} \text{ моль/л.}$$

Концентрация радикалов, рассчитанная по формулам (9) и (10), и скорость окисления органических примесей для замкнутых бассейнов разного объема и генераторов озono-гидроксильной смеси с токами разряда от 6 до 35 мА представлены в таблице 1.

Таблица 1. Скорость окисления органических примесей в воде при разных объемах замкнутого бассейна. Средняя концентрация кислорода в воде принята равной  $3 \cdot 10^{-6}$  моль/л.

|  | Объем бассейна, л |                |                |        |
|--|-------------------|----------------|----------------|--------|
|  | 11,5              | $8 \cdot 10^3$ | $5 \cdot 10^6$ | $10^9$ |

|   |                     |                      |                     |                      |
|---|---------------------|----------------------|---------------------|----------------------|
| Ток разряда в реакторе, (мА)                  | 6                   | 35                   | 25                  | 15                   |
| Производительность радикалов, NO, (моль/с)    | $2 \cdot 10^{-6}$   | $1,16 \cdot 10^{-5}$ | $8,3 \cdot 10^{-6}$ | $5 \cdot 10^{-6}$    |
| Концентрация радикалов, [R•], (моль/л)        | $6,7 \cdot 10^{-8}$ | 6,09                 | $2 \cdot 10^{-10}$  | $1,1 \cdot 10^{-11}$ |
| Скорость окисления, моль/(л.сек)              | $2 \cdot 10^{-6}$   | 1,82                 | $6 \cdot 10^{-9}$   | $3,3 \cdot 10^{-10}$ |
| Уменьшение ХПК за 1 час, (мг О/л)             | 115                 | 10,5                 | 0,34                | 0,019                |
| Уменьшение ХПК во всем бассейне за 1 час, (г) | 1,32                | 83,8                 | $1,7 \cdot 10^3$    | $1,9 \cdot 10^4$     |
| Эксперимент. Уменьшение ХПК за 1 час, мг О/л  | $100 \pm 20$        | $9 \pm 2$            | -                   | -                    |

Из таблицы видно, что с увеличением объема бассейна концентрация радикалов и скорость окисления уменьшаются в соответствии с формулами (9) – (10) как

$$w_2 \sim \frac{1}{\sqrt{V}}$$

, в то время как полная скорость окисления (уменьшения ХПК) во всем объеме увеличивается:

$$w_2 V \sim \sqrt{V}$$

Сравним результаты оценок с экспериментальными данными [7]. Для бассейна объемом 11,5 л экспериментально наблюдаемое уменьшение ХПК составило  $100 \pm 20$  мг О/л за 1 час, что совпадает с результатом расчета (115 мг О/л). Для бассейна  $8 \text{ м}^3$  экспериментально наблюдаемое уменьшение ХПК за 24 часа составило  $\sim 200$  мг О/л, за 1 час уменьшение составляло  $9 \pm 2$  мг О/л. Расчетное значение 10,5 мг О/л за 1 час и 252 мг О/л за 24 часа. Таким образом, проделанные выше выкладки подтверждаются экспериментальными данными для объемов жидкости 11,5 л и  $8 \text{ м}^3$ .

В больших объемах ( $10^6$  л и более) концентрация радикалов мала (см. таблицу 1), однако во всем бассейне уменьшение ХПК может достигать заметных значений. Так в объеме 109 л (пруд размерами 1000 x 1000 м глубиной 1 м) расчетное суммарное уменьшение ХПК за час составляет 19 кг. Глубина пруда была принята равной 1 м, так как насыщение грязной воды кислородом за счет естественных процессов происходит на глубину порядка 1 м [8]. Концентрация кислорода в воде была взята на уровне 1% от максимально возможной. Если концентрацию кислорода сделать больше – скорость окисления возрастет.

В открытой системе скорость окисления в объеме  $dV$  будет определяться со-

$$w_2 dV = k_2 [O_2]_0 [R^\bullet]_0 \frac{V_0}{V} dV$$

отношением:

Интегрируя от  $V_0$  до объема  $V_P$ , получим расходящуюся величину, если  $V_P \rightarrow \infty$ :

$$w_2 = k_2[O_2]_0[R^\bullet]_0 V_0 \ln \frac{V_P}{V_0} \rightarrow \infty$$

Это означает, что установка небольшой мощности, генерирующая радикалы, может дать значительный эффект.

Анализируя данные таблицы 1 можно видеть, что в пределах 100 м от точки сброса обработанной жидкости можно получить концентрацию радикалов  $10^{-9}$  –  $10^{-10}$  моль/л. При концентрации радикалов  $10^{-9}$  моль/л и хорошем насыщении воды кислородом (концентрация  $3 \cdot 10^{-4}$  моль/л) можно получить скорость окисления  $w_2 = 3 \cdot 10^{-6}$  моль/(л сек). Тогда в  $1 \text{ м}^3$  в час убыль ХПК составит 172 г/ч или  $\sim 4$  кг в сутки. При концентрации радикалов в десять раз меньшей эта скорость будет порядка 0,4 кг/сутки.

Степень окисления сложных органических соединений изучалась на примере фенола [6]. При непродолжительной обработке (часы) степень окисления фенола в объеме обрабатываемой жидкости порядка десятков литров и концентрации фенола около 1 г/л невелика (5 – 10%). Спектрофотометрически идентифицировано образование гидрохинона. При более длительной обработке образуются карбоновые кислоты, рН фенольной сточной воды за сутки уменьшается от 7,5 до 5. При этом наблюдалось уменьшение ХПК до 20%. При окислении до карбоновых кислот ХПК может уменьшится на  $\sim 40\%$ .

В случае хорошего насыщения воды кислородом фенол окисляется до углекислого газа и воды [6, 9]. При этом через воду в бассейне продували чистый кислород и реакция протекала в среде кислорода. Эксперимент, выполненный в бассейне объемом 50 л на воздухе показал, что при недостатке кислорода (без дополнительного продува воздуха через жидкость в бассейне) фенол и ему подобные органические соединения полимеризуются, образуя каменноугольные смолы большой молекулярной массы, обладающие малой токсичностью и плохо растворимые в воде (выпадающие в осадок).

Проводились опытно-промышленные испытания предлагаемого метода обработки сточной воды на коксохимическом производстве Нижнетагильского металлургического комбината. Два генератора озono-гидроксильной смеси с потребляемой мощностью 150 Вт каждый применяли для предварительной обработки сточных вод перед их поступлением на биохимическую очистку. Поток обрабатываемой воды через каждый генератор составлял 4,5 м<sup>3</sup>/ч, полный сброс сточной воды - 240 м<sup>3</sup>/ч, ХПК обрабатываемой воды равнялось 1800 мг О/л. Схема размещения генераторов 1 и 2 на БХУ представлена на рисунке 2. Сточная забиралась с выхода фенольного отстойника и усреднителя, направлялась на генераторы 1 и 2, и после обработки озono-гидроксильной смесью сбрасывалась обратно в тот же бассейн. Объемы каждого бассейна указаны на рисунке. Среднее время пребывания воды в бассейнах биохимической установки составляло порядка двух суток.

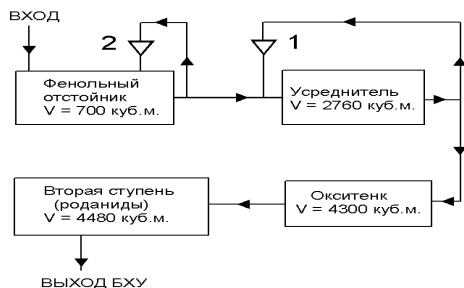


Рисунок 2. Размещение генераторов озono-гидроксильной смеси 1 и 2 на биохимической установке коксохимического производства НТМК.

Результаты эксперимента представлены на рисунке 3, где нанесены значения ХПК на выходе биохимической установки до включения генераторов (с 1 по 26 ноября 2003 г), во время их работы (с 27 ноября 2003 г по 4 января 2004 г) и после до конца января 2004 г. Средние значения ХПК для каждого из трех названных периодов обработки нанесены на рисунке жирными прямыми линиями. Видно, что за время эксплуатации генераторов (с 27.11.03 по 4.01.04) наблюдалась стабилизация ХПК на выходе биохимической установки, и уменьшение ХПК на 22 %.

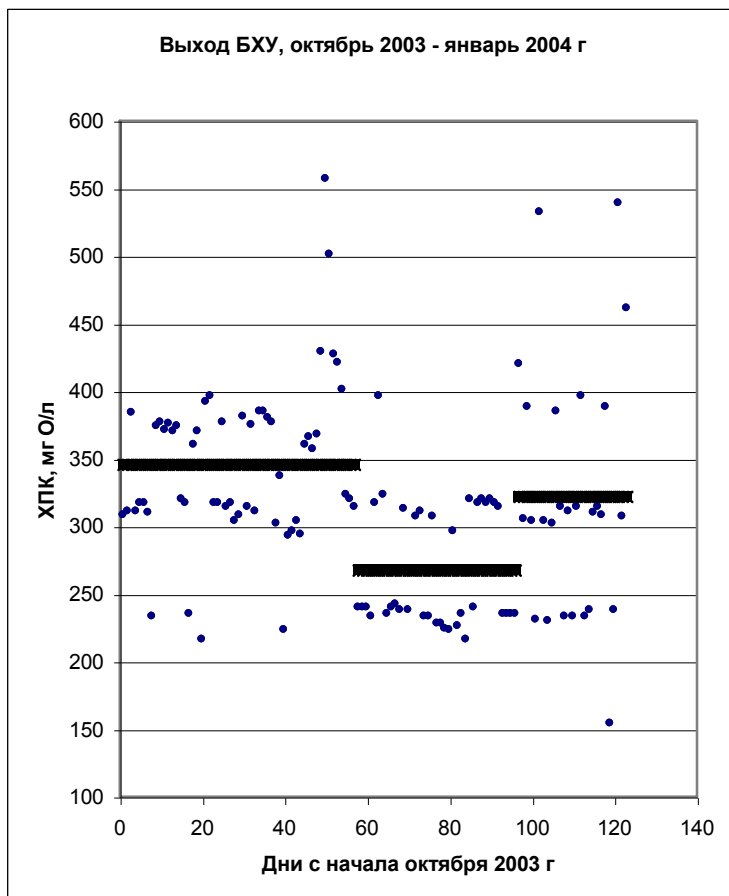


Рисунок 3. Значения ХПК на выходе БХУ до включения генераторов, во время их работы и после их выключения.

## Выводы

1. Рассмотрена возможность использования цепных радикальных реакций для очистки воды в больших объемах жидкости. Генератор озono-гидроксильной смеси, смонтированный на берегу водоема (пруда, озера или моря) и работающий непрерывно, может при малом расходе энергии существенно улучшить степень очистки воды.

2. Показано, что генератор озono-гидроксильной смеси мощностью 150 Вт может создать в радиусе  $\sim 100$  м от точки сброса обработанной воды концентрацию радикалов  $10^{-9} - 10^{-10}$  моль/л, что позволит при хорошем насыщении воды

кислородом поглощать в 1 м<sup>3</sup> воды на окисление (уменьшение ХПК) за сутки 0,4 – 1 кг кислорода.

3. Выполненные опытно-промышленные испытания методики показали, что при малой потребляемой мощности (300 Вт) и большом потоке сильно загрязненной воды (240 м<sup>3</sup>/ч) наблюдается заметное улучшение качества воды на выходе очистных сооружений и стабилизация работы биохимической установки.

*Работа выполнена при частичной поддержке гранта Президента Российской Федерации НШ-1619.2003.2.*

### Литература.

1. Штамм Е.В., Пурмаль А.П., Скурлатов Ю.И. Роль пероксида водорода в природной водной среде. // Успехи химии. 1991. Т. 60. Вып. 11. С. 2373 – 2411.
2. Кисленко В.Н., Берлин Ад. А. Кинетика и механизм окисления органических веществ пероксидом водорода. // Успехи химии. 1991. Т. 60. Вып. 5. С. 949 – 981.
3. Аристова Н.А., Пискарев И.М. Генерирование озono-гидроксильной смеси в коронном электрическом разряде. // Журнал физической химии. 2003. Т. 77. №5. с. 813 – 816.
4. Пискарев И.М. Модель реакций при коронном разряде в системе O<sub>2</sub>(г) – H<sub>2</sub>O. // Журнал физической химии. 2000. Т. 74. №3. с. 546 – 551.
5. Эмануэль Н.М., Денисов Е.Т., Майзус З.К. Цепные реакции окисления углеводородов в жидкой фазе. М.: Наука. 1965.
6. Пискарев И.М. Окисление фенола частицами OH•, H и O<sub>3</sub>, образующимися в электрическом разряде. // Кинетика и катализ. 1999. Т. 40. № 4. с. 505 – 511.
7. Аристова Н.А., Смелянский А.З., Ходырев А.А., Ермаков Д.И., Пискарев И.М., Ушканов В.А. Окисление примесей воды в больших объемах жидкости, инициированное электрическим разрядом. // Перспективные материалы. 2003. №2. с. 37 – 41.
8. K. Cameron, C. Madramootoo, A. Crolla, C. Kinsley. Pollutant removal from municipal sewage lagoon effluents with a free-surface wetland. // Water Research. 2003. V. 37. № 12. P. 2803 – 2812.
9. Аристова Н.А., Пискарев И.М. Окисление фенола под действием электрического разряда. // Химия и технология воды. 2001. Т. 23. № 5. С. 510 – 519.

## РЕЗОНАНС И ЭКРАНИРОВКА СПИРАЛЬНЫХ ВОЛНОВЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ

А.А.Соловьев, К.П.Павловский, С.И. Зайцев, М.В. Захарова

*Лаборатория возобновляемых источников энергии, географический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, 119992, Ленинские горы МГУ 1, строение 19, e-mail: geosolmgu@mtu-net.ru*

На космических снимках интенсивных атмосферных вихрей [1] и лабораторных экспериментах в сосудах с мелкой водой над неоднородно вращающимся параболическим дном наблюдались спиральные волны [2]. Возможность управления амплитудой спиральных рукавов волн поверхностной плотности обоснована теоретически в работе [3]. При взаимодействии вихревого потока с цепочкой придонных препятствий во вращающейся жидкости возникает дисперсия спиральных волн [4]. В настоящей работе ставится цель экспериментально и теоретически рассмотреть явление резонанса и экранировки волн поверхностной плотности в дифференциально вращающейся мелкой жидкости.

Эксперименты проводились на установке с дифференциально вращающимся плоским дном над мелкой водой (Рис. 1).

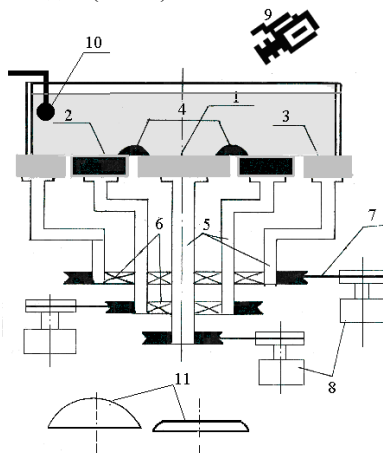




Рис. 1. Схема эксперимента с дифференциально вращающейся мелкой жидкостью и цепочкой донных препятствий:

1-центральный диск, 2- среднее кольцо, 3-внешнее кольцо, 4-цепочка препятствий, 5-концентрические валы, 6-подшипники, 7-ременная передача, 8-электродвигатели, 9-кинокамера, 10-тензодатчик, 11-элементы цепочки препятствий.

На границе сдвига, там, где центральный диск соприкасался со средним кольцом, на расстоянии  $R_k = 0,1$  м от оси вращения, была установлена, укрепленная на диске, цепочка препятствий. Каждое препятствие представляло собой полусферу диаметром 0,004 м или пластинку толщиной 0,002 м. Препятствия располагались на равноудаленном расстоянии друг от друга. Количество препятствий  $N$  варьировалось от одного до четырех. Опыты проводились при различных соотношениях скоростей вращения диска  $\omega_0$  и спаренных периферийных колец  $\omega_\Phi$ . Направление вращения диска и колец было одинаковым. Для характеристики резонансных эффектов использовалось вихревое число Маха [3]:

$$M = \frac{(\omega_0 - \Omega)R_k}{\sqrt{gh}}. \quad (1)$$

Здесь  $\Omega = 0,5(\omega_0 + \omega_\Phi)$  - скорость вращения жидкости в сосуде,  $h$  - глубина вращающейся жидкости,  $R_k$  - расстояние по радиусу от центра вращения до препятствия. Для визуализации картины движения на поверхности вращающейся жидкости использовались плавучие частицы диаметром 0,001÷0,003 мм, которые отслеживали картину распределения поверхностной плотности спиральных волн. Частицы отбрасывались от центра, собираясь в местах нагона воды и на гребнях волн. Площадь, свободная от частиц изменялась пропорционально амплитуде спиральных волн.

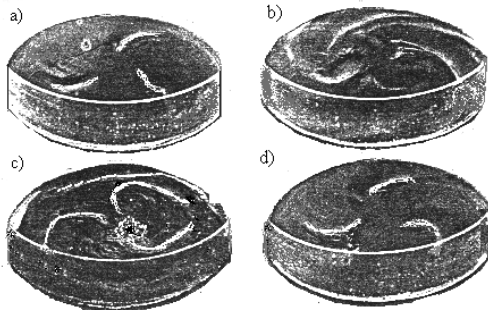


Рис. 2. Последовательная картина развития системы спиральных волн на поверхности дифференциально вращающейся мелкой жидкости с цепочкой из трех придонных препятствий полусферической формы при изменении числа Маха: а)— $M=0,20$ ; б)— $1,00$ ; в)— $1,13$ ; д)— $1,25$ .

На Рис 2 для иллюстрации эффекта резонанса спиральных волн приведен пример наблюдений спиральных волн поверхностной плотности в случае взаимодействия потока с вращающейся цепочкой из трех препятствий. До и после резо-

нансного значения числа  $M$  амплитуда спиральных волн и длина спиральных рукавов заметно уменьшалась. По результатам многочисленных экспериментов получена кривая устойчивости, отделяющая режимы вращения с волнам поверхностной плотности, имеющими волновое число от  $m=1$  до  $m=6$ . Кривая устойчивости обладала определенной шириной и состояла из двух подобластей устойчивого и неустойчивого резонанса (Рис. 3).

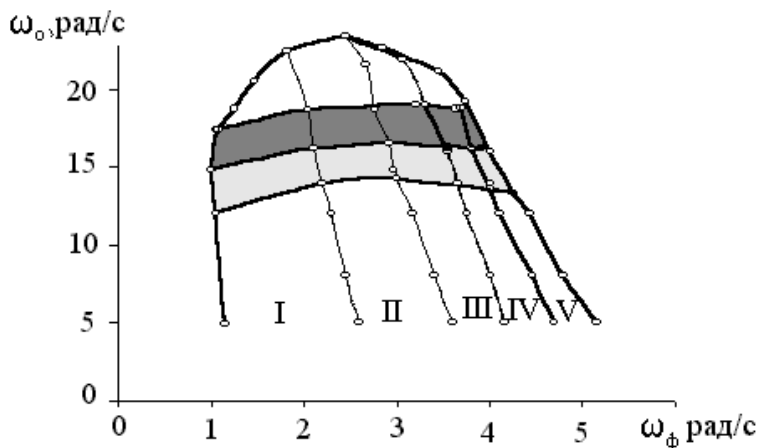


Рис. 3. Кривая, разделяющая режимы устойчивого и неустойчивого возбуждения спиральных волн плотности на свободной поверхности дифференциально вращающейся мелкой жидкости с цепочкой придонных препятствий. Светлая штриховка — область устойчивого резонанса, темная — неустойчивого. Тонкие линии — границы кривой устойчивости: 1—область существования спиральных волн с индексом  $m=2$ ; 2—  $m=3$ ; 3—  $m=4$ ; 4—  $m=5$ ; 5—  $m=6$ .

Неустойчивый резонанс характеризовался тем, что при фиксированных внешних условиях существовали квазипериодические качания амплитуды волн. Средний период качаний был равен 20 с. Это время между усилением и ослаблением амплитуды возмущений с одновременным увеличением или уменьшением длины спиральных рукавов. Экспериментальная линия кривой устойчивости, которая характеризовала условие резонанса, совпадала с границей зоны, разделяющей область неустойчивого резонанса (темная штриховка на Рис. 3) от области неустойчивого резонанса (светлая штриховка). Колебательный режим резонанса спиральных волн наблюдался в зоне квазиустойчивых волновых движений. Экспериментально установленная зависимость нормированной амплитуды волн  $A^*$  от вихревого числа  $M$  имела характерный максимум (Рис.4). Форма резонансной кривой  $A^* = f(M)$  соответствовала выражению вида:

$$A^* = \left[ (M_{kr}^2 - M^2)^2 - 4M^2 M_\delta^2 \right]^{1/2} \quad (2).$$

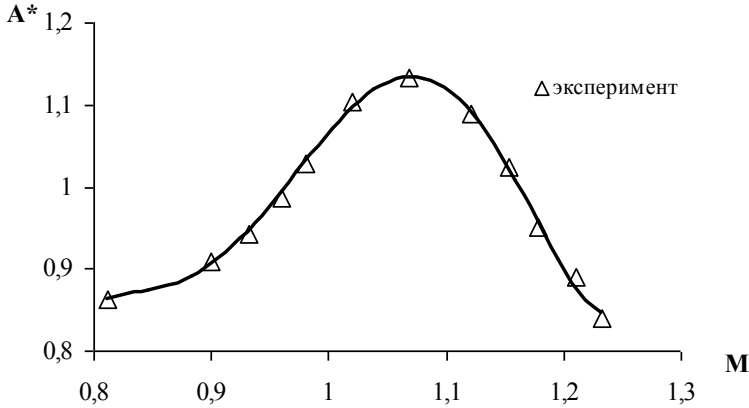


Рис. 4. Зависимость нормированной амплитуды спиральных волн  $A^*$  от вихревого числа Маха  $M$  при взаимодействии вращающейся мелкой жидкости с цепочкой из трех препятствий. Сплошная линия - расчет по формуле (2).

$$\text{В формуле (2)} \quad M_\delta = \frac{\delta - \Omega}{\sqrt{gH}} R_k, \quad M = \frac{\omega_0 - \Omega}{\sqrt{gH}} R_k,$$

$\delta$  - релаксационная частота,  $M_{kr}$  - критическое значение вихревого числа Ма-

ха, при котором наблюдается резонанс,  $R_k$  - радиус области сдвига,  $\omega_0$  - частота вращения препятствий,  $\Omega$  - угловая скорость вращения жидкости. Эффект ослабления (экранировки) волн достигался при режимах вращения с угловой скоростью вращения жидкости достигала по величине большей, чем скорость кругового движения цепочки препятствий. Опыты показали, что форма, размер препятствий и их количество не оказывала заметного влияния на изменение амплитуды волн. При этом должно соблюдаться условие малости вертикальных размеров препятствий по сравнению со статической глубиной жидкости.

Теоретически задача о движении цепочки препятствий в дифференциально вращающейся мелкой жидкости сводится к решению уравнений вида [3]:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + (\vec{v} \nabla) \vec{v} + g(h + d) &= 0 \\ \frac{\partial h}{\partial t} + \nabla(h \vec{v}) &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

Здесь  $\vec{v}$  - вектор скорости жидкости с тангенциальной  $v_t$  и радиальной  $v_r$  компонентами,  $h$  - толщина слоя вращающейся жидкости,  $d$  - функция, задающая форму дна и препятствий. Все величины представляются в полярной системе координат  $(r, \varphi)$ . Здесь  $\varphi = \theta - \omega_0 t$ , а  $\theta$  - полярный угол, отсчитываемый в лабораторной, не вращающейся системе координат. Профиль дна вращающейся жидкости предполагается плоским с возмущениями  $d'$ , которые зависят от радиуса и азимута

$$d = \bar{d} + d'(r, \varphi), \quad \bar{d} = 0$$

Профиль свободной поверхности вращающейся жидкости, как целого, определяется следующим условием:

$$\frac{\partial \bar{h}}{\partial r} = \frac{\Omega^2 r}{g} \quad (4)$$

Переменные, входящие в систему уравнений движения вращающейся мелкой жидкости, можно записать в следующем виде:

$$v_t = \Omega r + v'_t(r, \varphi), \quad v_r = v'_r(r, \varphi), \quad h = \bar{h}(r) + h'(r, \varphi).$$

Индекс «штрих» обозначает возмущения соответствующих величин, чертой сверху характеризуются их средние, невозмущенные значения,  $v'_t$  - возмущения тангенциальной составляющей скорости,  $v'_r$  - возмущения радиальной составляющей скорости,  $h'$  - возмущенная глубина слоя жидкости.

Для характеристики скалярной нелинейности [5], которая связана с зависимостью скорости волн Россби от толщины  $\bar{h}$  вращающейся жидкости, использовался

$\beta$  - параметр:  $\beta = \frac{\Omega}{\bar{h}} \frac{\partial \bar{h}}{\partial r}$ . Если ввести выражение для  $\beta$  - параметра в формулу (4), можно получить:

$$\frac{r}{\bar{h}} \frac{\partial \bar{h}}{\partial r} = \frac{4\beta^2 r_0^2}{\Omega^2} \quad (5),$$

Безразмерное число, входящее в формулу (5), обозначим так:

$$So = \frac{4\beta^2 r_0^2}{\Omega^2} \quad (*)$$

где  $r_0$  - радиус Россби-Обухова. После подстановки в уравнения мелкой жидкости значений составляющих скорости  $v_t, v_r$ , профилей свободной поверхности  $h(r, \varphi)$  и дна  $d(r, \varphi)$ , выраженных через средние и пульсационные значения, последующего дифференцирования и линеаризации уравнений (3), получим систему уравнений для возмущенных величин:

$$\begin{aligned}
 (\Omega - \omega_0) \frac{\partial v'_r}{\partial \varphi} - 2\Omega v'_t + g \frac{\partial h'}{\partial r} &= -g \frac{\partial d'}{\partial r} \\
 (\Omega - \omega_0) \frac{\partial v'_t}{\partial \varphi} + 2\Omega v'_r + \frac{g}{r} \frac{\partial h'}{\partial \varphi} &= -\frac{g}{r} \frac{\partial d'}{\partial \varphi} \\
 (\Omega - \omega_0) \frac{\partial h'}{\partial \varphi} + \frac{\bar{h}}{r} \left[ \frac{\partial}{\partial r} (r v'_r) + \frac{\partial v'_t}{\partial \varphi} \right] + \frac{v'_r \bar{h}}{r} \cdot So &= 0
 \end{aligned}$$

Если представить  $v'_t, v'_r, h', d'$  в виде рядов по гармоникам  $e^{im\varphi}$  с соответствующими амплитудами  $v_{im}, v_{rm}, h_m, d_m$ , где  $m$  - номер гармоники, то из системы уравнений для возмущенных величин имеем следующие уравнения для амплитуд:

$$\begin{aligned}
 im(\Omega - \omega_0)v_{im} - 2\Omega v_{im} + g \left( \frac{\partial h_m}{\partial r} + \frac{\partial d_m}{\partial r} \right) &= 0 \\
 im(\Omega - \omega_0)v_{rm} - 2\Omega v_{rm} + im \frac{g}{r} (h_m + d_m) &= 0 \\
 im(\Omega - \omega_0)h_m + \frac{\bar{h}}{r} \left[ v_{rm} + r \frac{\partial v_{rm}}{\partial r} + imv_{im} \right] + \frac{v_{rm} \bar{h}}{r} \cdot So &= 0
 \end{aligned}$$

После исключения из этой системы  $v_{im}, v_{rm}$ , с помощью

$$z_m = \frac{r}{R_k} \sqrt{(m^2 M^2 - \frac{R_k^2}{r_0^2})}$$

, преобразуем последнюю систему уравнений к дифференциальному уравнению, связывающему амплитуду возмущений поверхности жидкости  $h_m$  и амплитуду возмущений от цепочки препятствий  $d_m$ .

$$\begin{aligned}
 z_m^2 \left( \frac{\partial^2 h_m}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 d_m}{\partial z^2} \right) + z_m (1 + So) \left( \frac{\partial h_m}{\partial z} + \frac{\partial d_m}{\partial z} \right) + \left( \frac{2\Omega}{\Omega - \omega_0} So - m^2 \right) (h_m + d_m) + z_m^2 h_m &= 0
 \end{aligned} \tag{6}$$

Будем характеризовать амплитудное возмущение препятствий следующим общим выражением:

$$d_m = \left[ \frac{\cos(m\Delta\varphi)}{[\pi/2\Delta\varphi]^2 - m^2} \right] \cdot \frac{1}{2\Delta\varphi} \left( \sum_{k=1}^N e^{-im\varphi_k} \right) \begin{cases} R_k/r & |r - R_k| < \Delta r \\ 0 & |r - R_k| > \Delta r \end{cases} \tag{7}$$

Здесь  $\Delta\varphi = \Delta r/R_k$ ,  $\Delta r$  - линейный размер препятствий,  $N$  - число препятствий,

$\varphi_k = \frac{2\pi}{N}(k-1)$  - угловое положение препятствий. Тогда для амплитуды возмущений глубины из уравнения (6) при  $r \geq R_k + \Delta r$  с учетом (7) находим:

$$h_m = \frac{Z_m}{X} \frac{\cos(m\Delta\varphi)}{[\pi/2\Delta\varphi]^2 - m^2} \cdot \frac{\sum_{k=1}^N e^{-im\varphi_k}}{2\Delta\varphi} \times$$

$$\times \begin{cases} K_\nu(XZ_m) \int_{(1-\Delta\varphi)Z_m}^{(1+\Delta\varphi)Z_m} I_m(y) dy & m < \left(\frac{R_k}{r_0}\right) \cdot \frac{1}{M} \\ \frac{\pi}{2} [N_\nu(XZ_m) - iJ_\nu(XZ_m)] \int_{(1-\Delta\varphi)Z_m}^{(1+\Delta\varphi)Z_m} J_m(y) dy & m > \left(\frac{R_k}{r_0}\right) \cdot \frac{1}{M} \end{cases} \quad (8)$$

Здесь  $\nu = \sqrt{0,25 \cdot So^2 + m^2 - 2\Omega So / (\Omega - \omega_0)}$  – порядок специальных функций:  $J_\nu, N_\nu, I_\nu, K_\nu$ ,  $X = r_i / R_k$ . Из формулы (8) следует, что учет скалярной нелинейности при формировании спиральных волн поверхностной плотности в результате взаимодействия вращающейся жидкости с цепочкой придонных препятствий сказывается на зависимости порядка  $\nu$  функций Бесселя от  $\omega$  введенного нами

$$So = \frac{4\beta^2 r_0^2}{\Omega^2}$$

безразмерного комплекса. Порядок специальных функций, как видно из решения (8), не совпадает с номером гармоник волны. На местоположение ре-

$$Z_m = \frac{r}{R_k} \sqrt{\left(m^2 M^2 - \frac{R_k^2}{r_0^2}\right)} \rightarrow 0$$

зонанса, который согласно (8) наступает при  $So \rightarrow 0$ , число  $So$  влияния не оказывает. Отличные от нуля значения параметра  $So \neq 0$  приводят лишь к сглаживанию специальных функций, что должно придавать резонансной кривой уширение и более выпуклую форму, облегчающую поиск резонанса. Эффект экранировки спиральных волн достигается в тех случаях, когда

$$Z_m = \frac{r}{R_k} \sqrt{\left(m^2 M^2 - \frac{R_k^2}{r_0^2}\right)} \rightarrow \infty$$

Результаты численного интегрирования, выполненные для цепочки из трех препятствий с относительными размерами  $\Delta\varphi = 0,4$  и вихревыми числами Маха в диапазоне  $1,2 < M < 1,5$ , представлены на Рис 5.

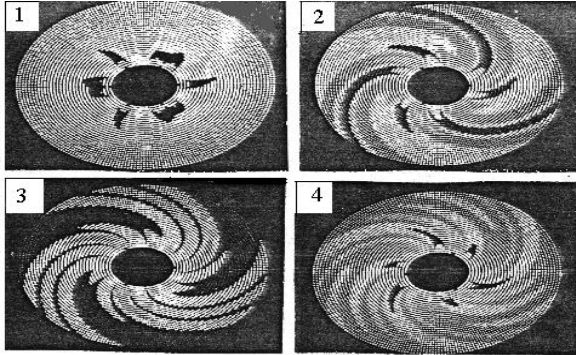


Рис. 5. Контуры возмущений поверхности жидкости  $h'_m = \text{const}$ , возникающих в дифференциально вращающейся мелкой жидкости с цепочкой из трех препятствий при различных значениях числа Маха  $M$ : 1 —  $M=1,23$ ; 2— $M=1,27$ ; 3— $M=1,30$ ; 4— $M=1,45$ . Величина отношения радиуса Россби-Обухова к радиусу  $R_k$  на которых находились препятствия в расчетах равнялась  $r_0/R_k = 0,1$ . Темные участки соответствуют впадинам волн.

Ослабление амплитуды спиральных волн плотности достигалось при фиксированном значении  $r_i/R_k$  путем подбора скорости вращения центрального диска по отношению к скорости вращения периферийных колец. При достижении определенных значений чисел Маха близких к  $M=1,3$  за счет самоорганизации течений происходила подстройка скорости дрейфа спиральных волн к скорости вращения препятствий. Когда скорость вращения препятствий и скорость дрейфа достигают полного совпадения, амплитуда спиральных волн резко возрастала. Сравнение расчетных значений резонансной кривой и экспериментальной показывает, что экспериментально наблюдаемые значения резонансного числа Маха не совпадают с теоретическими (Рис. 6).

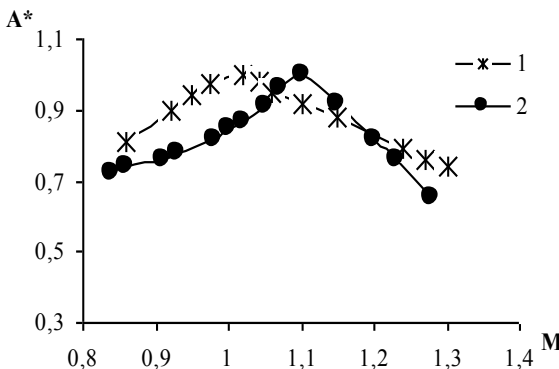


Рис. 6. Экспериментальные зависимости нормированной амплитуды спиральной волны поверхностной плотности от вихревого числа Маха. Число препятствий  $N=3$ . Угловая скорость вращения спаренных колец дна цилиндрического сосуда с мелкой жидкостью в опытах: 1 -  $\omega_{\Phi} = 3,0$  рад/с; 2 -  $3,6$  рад/с. Уширение кривой характеризуется значениями:  $So_1=0,0129$ ;  $So_2=0,0104$ .

Это связано с тем, что при расчетах не принимались во внимание диссипативные процессы. По этой же причине амплитуда теоретической кривой неограниченно росла при достижении резонанса. Анализируя картину последовательного развития спиральных волн с изменением вихревого числа Маха (Рис. 6 и 7), можно сделать вывод, что расхождение резонансного значения теоретического и экспериментального числа Маха нарастало по мере усиления нелинейного взаимодействия гидродинамических движений, которое определялось ростом отношения

$$\frac{\omega_0 - \Omega}{\Omega}$$

. Были выполнены оценки времени релаксации  $\tau = 1/\delta$  спиральных волн поверхностной плотности различных гармоник. Оно рассчитывалось по величине отклонения экспериментального значения вихревого числа Маха от теоретического  $M_{kr}$ , которое связано с релаксационным значением числа Маха  $M_\delta$  соотношением:

$M_{exp} = \sqrt{M_\delta^2 - M_{kr}^2}$ . С увеличением номера моды период релаксации уменьшался и для волн с  $m=5$  он становился практически равным периоду вращения цепочки препятствий, а величина экспериментального значения резонансного числа Маха при этом совпадала с теоретическим значением. Несоответствие расчетов и опытов имело место и при оценке числа резонансных областей. Из теоретических расчетов следует, что при числах Маха кратных основному значению существует серия дополнительных максимумов.

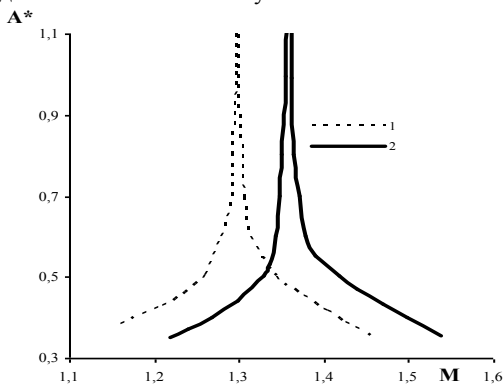


Рис. 7. Расчетные зависимости нормированной амплитуды спиральной волны поверхностной плотности от вихревого числа Маха с числом препятствий  $N=3$ , и угловой скоростью периферийного вращения жидкостью: 1-  $\omega_\Phi = 3,0$  рад/с; 2-  $\omega_\Phi = 3,6$  рад /с при числах  $So_1=0,0129$ ;  $So_2=0,0104$ .

Экспериментально зафиксировать резонанс на кратных гармониках не удалось из-за ограниченных возможностей установки по диапазону изменений числа Маха. Как расчет, так и экспериментальные исследования показали, что амплитуда волн не зависит от количества препятствий в цепочке и их формы. На изменение величины возмущений для каждой гармоники существенно влияет лишь соотно-



шение между скоростями придонного вращения цепочки препятствий и жидкости в целом.

Полученные результаты могут быть использованы при разработке способов управления процессами энергообмена, возникающих при взаимодействии гидродинамических движений различного масштаба, возникающих во вращающихся течениях со сдвигом скорости конечной амплитуды. Резонанс спиральных волн поверхностной плотности определяет эффективное преобразование поступающей в вихрь энергии и потому представляет практический интерес для задач, в которых возникает необходимость интенсификации энергообмена в различных технологических процессах. Эффект резонанса и экранировки может представлять также практический интерес при прогнозе эволюции атмосферных вихрей со спиральной структурой облачности.

### Литература

1. Голицын Г.С., Васильев А.А. Гидрометеорологические опасности. -М.: Изд-во Крук, 2001.-296 с.
2. Незлин М.В., Снежкин Е.Н. Вихри Россби и спиральные структуры. - М.: Наука, 1990.- 240 с.
3. Базденков С. В., Морозов Н. Н., Погуце О. П. Резонансное возбуждение и экранировка волн во вращающихся жидкостях //Докл. АН СССР.- 1987.-Т. 294.- № 6.- С. 1323—1327.
4. Бачинский В.С., Соловьев А.А., Тарасов Д.Е. Резонансное возбуждение спирально-вихревых структур// Инж физ. журнал. - 1999.-Т.58.- №6.-С.929-932.
5. Незлин М. В. Солитоны Россби //УФН.-1986.- Т. 150.- вып. 1.- С. 4—60.

## СОДЕРЖАНИЕ

|  |   |
|--|---|
| РЕШЕНИЕ ЧЕТВЕРТОЙ ВСЕРОССИЙСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ «ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ ЭКОЛОГИИ (ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ ФИЗИКА)»..... | 3 |
|--|---|

### СЕКЦИЯ 1

#### **ЭКОЛОГИЯ ОКОЛОЗЕМНОГО КОСМИЧЕСКОГО ПРОСТРАНСТВА И АТМОСФЕРЫ**

|  |   |
|--|---|
| СВЯЗЬ КОЛЕБАНИЙ ОЗОНОВОГО СЛОЯ ЗЕМЛИ С ИЗМЕНЧИВОСТЬЮ МИРОВОГО ОКЕАНА.....    | 5 |
| <i>Борисов Ю.А., Гальченко А.А., Галкина И.Л., Перов С.П., Показеев К.В.</i> |   |

|  |    |
|--|----|
| РЕКОНСТРУКЦИЯ СДВИГОВЫХ ПОЛЕЙ ПО ЦИРКУЛЯЦИЯМ АТМОСФЕРЫ И ОКЕАНА..... | 17 |
| <i>Бычков В.Л., Низовцев В.В.</i>                                    |    |

|  |    |
|--|----|
| МОНИТОРИНГ РАДИАЦИОННОЙ ОБСТАНОВКИ НА ВЫСОКОАПОГЕЙНЫХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТАХ В 22-М И 23-М ЦИКЛАХ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ.....   | 23 |
| <i>Сосновец Э.Н., Веденькин Н.Н., Власова Н.А., Иванова Т.А., Марьин Б.В., Павлов Н.Н., Рейзман С.Я., Рубинштейн И.А., Тверская Л.В., Тельцов М.В., Балаилов С.В., Иванов В.В., Максимов И.А., Хартов В.В.</i> |    |

### СЕКЦИЯ 2

#### **ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ ЭКОЛОГИИ ГИДРОСФЕРЫ**

|   |    |
|---|----|
| ЗАКОНОМЕРНОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ЯВЛЕНИЯ ЭЛЬ-НИНЬО / ЛА-НИНЬЯ..... | 35 |
| <i>Бондаренко А.Л., Жмур В.В.</i>                             |    |

|  |    |
|--|----|
| ГЕОМЕТРИЯ ВОЗМУЩЕНИЙ СВОБОДНОЙ ПОВЕРХНОСТИ ВРАЩАЮЩЕЙСЯ ЖИДКОСТИ В ЦИЛИНДРИЧЕСКОМ КОНТЕЙНЕРЕ..... | 44 |
| <i>Будников А.А., Степанова Е.С., Зырянов Ф.Б.</i>   |    |

|  |    |
|--|----|
| ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ДИССИПАТИВНЫХ И НЕЛИНЕЙНЫХ ФАКТОРОВ В СТРАТИФИЦИРОВАННОМ ПОГРАНИЧНОМ СЛОЕ ОКОЛО ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ ПЛАСТИНКИ..... | 55 |
| <i>Васильев М.П.</i>   |    |

|  |    |
|--|----|
| НЕКОТОРЫЕ ЗАДАЧИ ТЕОРИИ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОЙ<br>НЕУСТОЙЧИВОСТИ, ХАОСА И ТУРБУЛЕНТНОСТИ..... | 69 |
| <i>Герцеништейн С.Я., Никитин Н.В., Показеев К.В. Сибгатулин И.Н.</i>                    |    |

|  |    |
|--|----|
| О ХАРАКТЕРИСТИКАХ СТАЦИОНАРНЫХ ВОЛН НА СДВИГОВОМ<br>ТЕЧЕНИИ..... | 77 |
| <i>Зайцев А.А., Руденко А.И.</i>                                 |    |

|                                      |    |
|--------------------------------------|----|
| УСИЛЕНИЯ ВОЛН В ВЕТРОВОМ ПОТОКЕ..... | 85 |
| <i>Иванова И.Н., Мельникова О.Н.</i> |    |

|   |    |
|---|----|
| ВЛИЯНИЕ ПОВЕРХНОСТНО-АКТИВНЫХ ВЕЩЕСТВ И ФЛОТАЦИИ НА<br>ЗАРОЖДЕНИЕ ВЕТРОВЫХ СОЛИТОНОВ..... | 96 |
| <i>Мочулин П.В., Шелковников Н.К.</i>   |    |

|  |     |
|--|-----|
| ФРОНТАЛЬНЫЙ МЕХАНИЗМ САМОСОХРАНЕНИЯ И САМООЧИЩЕНИЯ<br>ОЗЕРА БАЙКАЛ И ЕГО ЭКОЛОГИЧЕСКОЕ ЗНАЧЕНИЕ..... | 100 |
| <i>Шерстянкин П.П., Куимова Л.Н.</i>   |     |

### СЕКЦИЯ 3

#### **ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ ФИЗИКИ ЗЕМЛИ**

|  |     |
|--|-----|
| ИЗМЕНЕНИЕ ГЕОФИЗИЧЕСКОЙ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ ФУНКЦИИ<br>ЛИТОСФЕРЫ В УСЛОВИЯХ ТЕХНОГЕНЕЗА..... | 111 |
| <i>Жигалин А.Д., Зилинг Д.Г., Трофимов В.Т.</i>  |     |

|  |     |
|--|-----|
| ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ ПОСЛЕДСТВИЯ ИСКУССТВЕННОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА<br>НЕКОТОРЫЕ ПРИРОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ..... | 118 |
| <i>Жигалин А.Д., Николаев А.В., Васютинская С.Д.</i>   |     |

### СЕКЦИЯ 4

#### **БИОФИЗИЧЕСКАЯ ЭКОЛОГИЯ**

|   |     |
|---|-----|
| ПРЕДВЕСТНИКИ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ И ВЕКТОРНЫЕ ЗВУКОПРИЕМНИКИ У<br>БИООБЪЕКТОВ.....     | 125 |
| <i>Гордиенко Е.Л., Гордиенко В.А., Гордиенко Т.В., Купцов А.В., Шевцов Б.М.</i> |     |

|   |     |
|---|-----|
| ПРОБЛЕМЫ САМООРГАНИЗАЦИИ И СИММЕТРИИ В ПРИРОДНЫХ<br>СИСТЕМАХ..... | 139 |
| <i>Твердислов В.А., Сидорова В.В., Яковенко Л.В.</i>              |     |

## СЕКЦИЯ 5

**ФИЗИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ МОНИТОРИНГА ПРИРОДНЫХ СРЕД**

УЛЬТРАФИОЛЕТОВАЯ ЛАЗЕРНАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ ВОДНЫХ СРЕД.....147  
*Горелик В.С., Козлова Г.В.*

ЛАЗЕРНАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ ПРИРОДНЫХ ВОД: ЗАДАЧИ  
КЛАССИФИКАЦИИ, ОБРАТНЫЕ ЗАДАЧИ.....156  
*Доленко Т.А., Фадеев В.В.*

## СЕКЦИЯ 6

**ПРИКЛАДНЫЕ АСПЕКТЫ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ ФИЗИКИ**

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ИСТОЧНИКОВ УФ  
ИЗЛУЧЕНИЯ И ОЗОНА В СИСТЕМАХ ВОДОПОДГОТОВКИ.....167  
*Дамбраускас С.Г., Рахимов А. Т., Саенко В.Б., Юдин А.М., Яценко Б.П.*

ОЧИСТКА ВОДЫ В ОТКРЫТЫХ ВОДОЕМАХ ЗА СЧЕТ ЦЕПНЫХ РЕАКЦИЙ,  
ИНИЦИИРОВАННЫХ ГИДРОКСИЛЬНЫМИ РАДИКАЛАМИ.....176  
*Пискарёв И.М., Сопова Л.Ф., Ушканов В.А., Аристова Н.А.*

РЕЗОНАНС И ЭКРАНИРОВКА СПИРАЛЬНЫХ ВОЛНОВЫХ  
ВОЗМУЩЕНИЙ.....185  
*Соловьев А.А., Павловский К.П., Зайцев С.И., Захарова М.В.*

СОДЕРЖАНИЕ.....195

*Научное издание*

**ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ ЭКОЛОГИИ**  
**(ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ ФИЗИКА)**  
№ 13

*Сборник трудов под редакцией*

*В.И. Трухина, Ю.А. Пирогова, К.В. Показеева*

*Научные труды публикуются в виде, представленном авторами.*

*Названия организаций приведены в авторской форме.*

*Подписано в печать*

*Объем п.л. Тираж 50 экз.*

*Физический факультет МГУ*

*119899, Москва, Воробьевы горы, МГУ им. М.В. Ломоносова*