

## ГИДРОАКУСТИКА И ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ ЭКОЛОГИИ

В.И. Бабий

*Морской гидрофизический институт НАН Украины, г. Севастополь*

Современное естествознание как система наук о природе, рассматривает любые природные явления с позиций различных наук, находит наиболее общие закономерности и тенденции и дает обобщенную оценку предметам и явлениям [1]. Сейчас в мире насчитывается более пятнадцати тысяч самостоятельных наук (пример тому «Академия наук»). К фундаментальным естественным наукам, в частности, относятся математика, физика, химия, биология. На стыке фундаментальных наук возникают новые самостоятельные научные дисциплины: математическая физика, геофизика, биофизика, биохимия, физическая химия и др. Один из путей развития науки лежит на стыке разных научных дисциплин. В рамках каждой науки обязательно вырабатывается собственная терминология, а также свои специфические методы исследования. При этом не существует резких границ между разными научными дисциплинами. Обсуждая проблему взаимосвязи научных дисциплин, необходимо принимать во внимание условность терминологии. Рассмотрим некоторые определения.

**Биология** – учение о жизни, как особой формы движения материи (ведет начало от древних греков). Современная биология включает такие разделы как физиология, цитология, генетика, экология, биохимия, биофизика и множество других.

**Экология** – раздел биологии, изучающий взаимоотношения организмов друг с другом и с окружающей средой (термин введен Геккелем в 1866 г.). Принципиальной основой взаимодействия человека (биологических форм) и внешнего мира является *первичность* объекта (окружающей среды) и *вторичность* субъекта. Отсюда ясна важность и актуальность проблемы знания локальных и глобальных характеристик окружающей среды – среды обитания биологических форм, и в первую очередь ее физических и химических характеристик, что можно отнести к физическим проблемам экологии.

Биологическая жизнь сосредоточена на Земле в относительно тонком поверхностном слое – **биосфере**, частью которой является **ноосфера** (сфера разумной жизни) – область человеческой цивилизации. Это своего рода «пленка» толщиной менее 0.1 % радиуса Земли. Две трети поверхности биосферы составляет **гидросфера** – Мировой океан. Считается, что жизнь зародилась и вышла на сушу из океана. Тому свидетельствует, в частности, факт химического состава живых организмов, состоящих преимущественно из воды: «Вода – источник жизни и великая тайна есть» (лозунг *Музея Воды*, г. Санкт-Петербург).

В системе наук о Земле важное место занимает **геофизика**, составной частью которой является **океанология** – наука о Мировом океане. Схематически иерархия и взаимосвязь этих дисциплин условно изображена на рис.1. По определению: **гидрофизика** – это раздел океанологии, изучающий физические свойства воды и процессы, протекающие в водной оболочке (гидросфере) Земли (БСЭ, 1977). Составной частью гидрофизики есть **физика моря**, один из разделов которой – **гидроакустика** – изучает распространение звуковых волн в реальной водной среде

(морях, океанах, озерах и т.п.). *Гидрофизика* это более общее понятие, охватывающее в частности и *гидроакустику*. С другой стороны гидроакустика это один из разделов *физической акустики*, которая в свою очередь является разделом общей **физики**, см. рис.2. При этом надо иметь в виду принципиальное отличие гидроакустики от чисто гидродинамических задач, которое связано с проблемами получения и передачи информации в водной среде путем распространения механической энергии со скоростью звука без существенного переноса массы [2]. К смежным областям гидроакустики и гидрофизики можно отнести еще много других научных направлений: биоакустику, геоакустику, атмосферную акустику, молекулярную акустику, гидромеханику, термодинамику и т.п.

Большим достоинством гидроакустики при экологическом мониторинге гидросферы является широкий диапазон частот акустических сигналов, позволяющих контролировать характеристики водной среды от внутреннего масштаба турбулентности ( *мм* ) до масштабов всего океана. Примером могут быть проекты АТОС (Acoustic Thermometry of Ocean Climate) и АСОУС (Arctic Climate Observations using Underwater Sound), официальной целью которых объявлено исследование глобальных климатических изменений температуры глубинных вод Мирового океана путем измерения времени распространения низкочастотных акустических сигналов на трансокеанских трассах. Акустическая термометрия и томография океана основаны на решении обратных задач гидроакустики. В них фактически определяют усредненные по пространству скорости распространения звука, по которым затем на основе уравнений состояния находят изменения температуры, скорости течений и потоки тепла. Это важнейшие характеристики среды обитания, влияющие на функционирование экосистем в гидросфере.

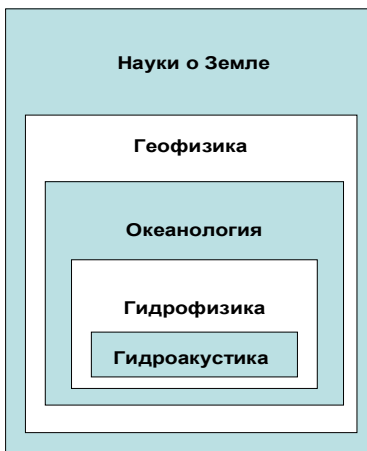


Рис. 1.

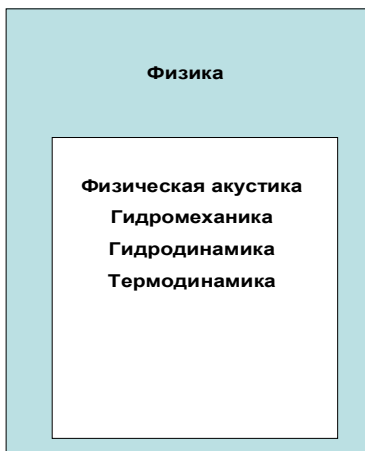


Рис. 2.

Для эффективного решения в интересах экологии многих прикладных прямых и обратных задач гидроакустики, необходимо максимально использовать всю ин-

формацию, как о самой водной среде, так и о звуковых полях в ней. Этого можно достичь с помощью средств измерения, использующих кватернионное описание акустических и гидрофизических полей, которое является обобщением понятия скорости распространения звука в движущейся неоднородной упругой среде и позволяет с единой точки зрения рассматривать самые различные явления [2]. Таким образом, наряду с традиционной «скалярной» и «векторной» гидроакустикой [3 – 6] можно говорить о кватернионной акустике океана, в которой кватернионная скорость звука является связующим звеном, объединяющим воедино раздел гидрофизики, рассматривающий динамические, термодинамические и акустические свойства морской среды [7], и гидроакустику, описывающую в этой среде звуковые поля давления, колебательной скорости и интенсивности (плотности потоков звуковой энергии) [5].

Будем рассматривать в совокупности физические свойства водной среды и звуковые поля в ней. При этом условимся считать гидрофизические поля «безмолвного океана» первичными, а звуковые поля в водной среде – вторичными. Фундаментальная взаимосвязь гидрофизики и гидроакустики с тем или иным приближением описывается системой уравнений механики сплошной среды, в частности, волновыми уравнениями, или уравнениями переноса акустического излучения и лучистого равновесия, позволяющих решать прямые и обратные задачи [2 – 6]. Примером может служить классическое волновое уравнение для скалярного поля звукового давления  $P_a$  в сжимаемой жидкости:

$$(\partial^2 P_a / \partial t^2) = C^2 \Delta P_a,$$

где  $C$  – скорость распространения звука в морской среде,  $\Delta$  – оператор Лапласа. Здесь скорость звука  $C$  относится к первичным гидрофизическим полям, а поле звукового давления  $P_a$  к вторичным – акустическим полям, возбуждаемым различными источниками искусственного и естественного происхождения. Скорость звука это коэффициент пропорциональности между пространственными и временными характеристиками звукового поля. Поэтому рассмотрение взаимосвязи гидрофизических и акустических полей проведем для важнейшей первичной акустической характеристики морской среды – скорости распространения звука, как связующего звена гидрофизики и гидроакустики [2].

Развитие представлений о скорости распространения звука в океане, описано в работах [6 – 10], где на основе алгебры кватернионов предложена более полная математическая модель поля скорости звука, учитывающая и поле скорости течений. Обобщением понятия скорости звука является кватернионное описание скорости распространения звука в движущейся неоднородной упругой среде, которое позволяет рассматривать с единой точки зрения такие различные явления, как объемное рассеяние акустических волн на неоднородностях поля скорости звука и пульсациях скорости потока (в частности кильватерными струями), эффект Доплера, вопросы акустической взаимности и суперпозиции, дисперсионные соотношения, пространственную анизотропию и незамороженность и др. Оно дает возможность проанализировать так называемые нелинейные параметрические приемники звука и векторно-фазовые приемники, гидроакустические измерители скорости звука и скорости потока, а также их взаимодействие со средой, акустические томографические системы, системы акустической голографии и подводного звуковиде-

ния, системы подводной навигации, связи и т.п. Формирование единой точки зрения на эти явления и процессы может послужить платформой для исследования более сложных проблем.

В неподвижной морской воде как бинарной термодинамической системе (чистая вода + квазиоднородная соль) скалярная скорость звука

$$C = C(T, S, P) \quad (1)$$

есть функция трех независимых переменных – первичных гидрологических параметров: температуры  $T$ , солёности  $S$  и гидростатического давления  $P$ . Эта функциональная зависимость с тем или иным приближением определена эмпирически и связывает первичную акустическую характеристику – скалярную скорость распространения звука  $C$  с первичными гидрологическими характеристиками морской среды:  $T, S, P$ , которые являются функциями пространственных координат и времени, т.е. гидрофизическими полями. Аналитические аппроксимации зависимости (1) содержат до пятидесяти членов разложения (см., например, ГСССД 202 – 02). Эта зависимость связана с уравнением состояния морской воды и подчиняется законам молекулярной акустики, термодинамики и физической химии.

Если сплошная среда движется в некоторой системе координат, например эйлеровой, то скорость распространения звука в этой среде, которую обозначим  $q$ , помимо зависимости от  $T, S, P$ , будет еще и функцией скорости потока  $\vec{U}$ , т.е.

$q = q(T, S, P, \vec{U})$ . Вообще говоря, величины  $T, S, P$  и  $\vec{U}$  не являются независимыми переменными, поскольку поле скорости потока  $\vec{U}$  связано с полями давления и плотности среды уравнениями гидродинамики. Полагая функцию  $q$  непрерывной и дифференцируемой, разложим ее в ряд Тейлора в окрестности  $T_0, S_0, P_0, \vec{U}_0$ . Принимая  $\vec{U}_0 = 0$  и  $d\vec{U} = \vec{U}$  при  $|\vec{U}| \ll C$ , группируя члены разложения, не содержащие  $\vec{U}$ , и ограничиваясь первой степенью разложения по переменной  $\vec{U}$ , получим в первом приближении

$$q(T, S, P, \vec{U}) = C(T, S, P) + (\partial q / \partial \vec{U}) \cdot \vec{U} \quad (2)$$

Здесь первое слагаемое – локальная скорость звука, второе слагаемое характеризует эффект переносной скорости потока. Частная производная  $\partial q / \partial U$  имеет физический смысл коэффициента увлечения (безразмерная величина). В оптике это известный коэффициент увлечения Френеля. В отличие от электромагнитных волн, для механических (звуковых) колебаний  $(\partial q / \partial U) \equiv 1$  и в данном приближении получим известное выражение  $q = C + \vec{U}$ , где  $C$  – локальная скорость звука (скаляр),  $\vec{U}$  – скорость движения среды (вектор), имеющие одинаковые размерности. Заметим, что отношение  $(|\vec{U}| / C) = M_r$  является гидродинамическим числом Маха. Выражение  $q$ , представляющее собой линейную комбинацию вектора и числа, есть кватернион, который является частным случаем гиперкомплексных чисел. Кватернион – это простейшее обобщение понятия вектор. Кватернионы образуют алгебру (линейную). Каждый кватернион представляет собой формальную сумму

действительного числа с вектором:  $q = C \cdot 1 + u \cdot \vec{i} + v \cdot \vec{j} + w \cdot \vec{k}$ , где  $\vec{i}, \vec{j}, \vec{k}$  – орты;  $u, v, w$  – компоненты вектора скорости движения среды. Если в каждой точке  $\vec{r}$  некоторой области пространства в каждый момент времени  $t$  определена величина  $q$ , то это значит, что задано кватернионное поле  $q(\vec{r}, t) = C(\vec{r}, t) + \vec{U}(\vec{r}, t)$ , что равносильно заданию четырех скалярных полей.

Если в движущейся упругой среде распространяются звуковые колебания, характеризующиеся скалярным полем звукового давления  $P_a(\vec{r}, t)$  и векторным полем колебательной скорости  $\vec{V}_k(\vec{r}, t)$ , то, полагая аддитивность как полей давления так и полей скорости жидких частиц среды, полное кватернионное поле скорости звука можно представить в виде суммы двух кватернионных полей – гидродинамического  $q_\Gamma$  и акустического  $q_a$ :

$$\begin{aligned} q(\vec{r}, t) &= q \left[ T(\vec{r}, t); S(\vec{r}, t); P(\vec{r}, t) + P_a(\vec{r}, t); \vec{U}(\vec{r}, t) + \vec{V}_k(\vec{r}, t) \right] = \\ &= q_\Gamma \left[ \langle C(\vec{r}, t) \rangle + \langle \vec{U}(\vec{r}, t) \rangle + (C'(\vec{r}, t) + \vec{U}'(\vec{r}, t)) \right] + \\ &+ q_a \left[ (\partial C / \partial P)_{\eta, s} \cdot P_a(\vec{r}, t) + \vec{V}_k(\vec{r}, t) \right] = q_\Gamma(\vec{r}, t) + q_a(\vec{r}, t), \end{aligned} \quad (3)$$

где  $\langle \rangle$  – означает операцию усреднения,  $(\partial C / \partial P)_{\eta, s}$  – адиабатический градиент  $C$ , а «штрихи» – пульсационные составляющие:  $C' = C - \langle C \rangle$ ,  $\vec{U}' = \vec{U} - \langle \vec{U} \rangle$ .

Отсюда следует, что звуковое поле в морской среде можно рассматривать как акустическое возмущение равновесного кватернионного поля скорости звука и записать соответствующие волновые уравнения для  $q$ . Поэтому прямая задача акустики движущейся среды при заданных источниках и граничных условиях формулируется как нахождение акустического кватернионного поля с помощью известного (заданного) гидродинамического кватернионного поля. Обратная задача гидроакустики формулируется соответственно как нахождение гидродинамического кватернионного поля по известному акустическому кватернионному полю. Кроме того, возможно нахождение самих источников звука по двум полям:  $q_a$  и  $q_\Gamma$ .

Полное кватернионное поле скорости звука  $q(\vec{r}, t)$  содержит информацию, как о самой среде, так и о звуковых полях в ней. При этом гидродинамическое кватернионное поле  $q_\Gamma$  является исходным, характеризующим свойства собственно среды. Гидродинамические и акустические кватернионные поля разделяют посредством пространственно-временной фильтрации. Им соответствуют разные ветви дисперсионных зависимостей.

Поле скорости звука в океане по своей природе случайно, так как формируется множеством случайных факторов. Полное статистическое описание случайного поля, как известно, требует задания всех многомерных распределений вероятностей значений поля в различных совокупностях его аргументов [4, 9]. На практике используют не сами распределения, а лишь некоторые их числовые характеристики. Такими простыми и одновременно самыми важными числовыми характеристиками являются моменты распределения. Первый момент распределения есть мате-

матическое ожидание или среднее значение кватернионного поля  $\langle q(\vec{r}, t) \rangle$  в рассматриваемой области пространства – времени. Наиболее важным вторым моментом является взаимная пространственно-временная корреляционная функция

$B_q(\Delta\vec{r}, \tau)$ . Выделяя флуктуационную часть гидродинамического кватернионного поля  $q'_r(\vec{r}, t) = C'(\vec{r}, t) + \vec{U}'(\vec{r}, t)$  и учитывая центрированность функции  $q_a(\vec{r}, t)$ , можно в предположении локальной однородности и стационарности полей в некоторой области пространства описать статистические свойства полного кватернионного поля  $q(\vec{r}, t)$  корреляционной функцией

$$B_q(\Delta\vec{r}, \tau) = \langle [q'_r(\vec{r}, t) + q_a(\vec{r}, t)] \cdot [q'_r(\vec{r} + \Delta\vec{r}, t + \tau) + q_a(\vec{r} + \Delta\vec{r}, t + \tau)] \rangle. \quad (4)$$

Другой формой представления этой функции является корреляционная матрица, которая содержит 64 элемента и имеет вид:

1				2			
$B_{uu}$	$B_{uv}$	$B_{uw}$	$B_{uc}$	$B_{up}$	$B_{ux}$	$B_{uy}$	$B_{uz}$
$B_{vu}$	$B_{vv}$	$B_{vw}$	$B_{vc}$	$B_{vp}$	$B_{vx}$	$B_{vy}$	$B_{vz}$
$B_{wu}$	$B_{wv}$	$B_{ww}$	$B_{wc}$	$B_{wp}$	$B_{wx}$	$B_{wy}$	$B_{wz}$
$B_{cu}$	$B_{cv}$	$B_{cw}$	$B_{cc}$	$B_{cp}$	$B_{cx}$	$B_{cy}$	$B_{cz}$
$B_{pu}$	$B_{pv}$	$B_{pw}$	$B_{pc}$	$B_{pp}$	$B_{px}$	$B_{py}$	$B_{pz}$
$B_{xu}$	$B_{xv}$	$B_{xw}$	$B_{xc}$	$B_{xp}$	$B_{xx}$	$B_{xy}$	$B_{xz}$
$B_{yu}$	$B_{yv}$	$B_{yw}$	$B_{yc}$	$B_{yp}$	$B_{yx}$	$B_{yy}$	$B_{yz}$
$B_{zu}$	$B_{zv}$	$B_{zw}$	$B_{zc}$	$B_{zp}$	$B_{zx}$	$B_{zy}$	$B_{zz}$
3				4			

(5)

В указанных предположениях матрица (5) является исчерпывающей характеристикой статистических свойств полного кватернионного поля скорости распространения звука и акустического поля в движущейся неоднородной упругой среде.

Здесь индексы  $u, v, w$  соответствуют компонентам вектора скорости потока  $\vec{U}$ , а индексы  $x, y, z$  отвечают соответствующим компонентам вектора колебательной скорости  $V_k$ . Индекс  $c$  относится к скалярной скорости звука  $C$  из (1), а индекс  $p$  к элементам матрицы, содержащим звуковое давление  $P_a$ , умноженное на адиабатический градиент  $(\partial C/\partial P)_{\eta, s}$ , см. выражение (3). Заметим, что отношение  $(|V_k|/C) = M_a$  является акустическим числом Маха.

В локально однородной среде матрица (5) симметрична. Каждый элемент матрицы (5), в частности, может быть представлен корреляционной функцией, аргумент которой, как было рассмотрено в [9], аппроксимирован квадратичной формой пространственно-временных сдвигов, описывающей анизотропию и незамороженность. Поскольку каждому элементу матрицы (5) свойственны свои анизотропия и незамороженность, то и результирующая функция  $B_q(\Delta\vec{r}, \tau)$  также будет характеризоваться своими результирующими параметрами анизотропии и незамороженности. Адекватное описание случайного поля  $q(\vec{r}, t)$  возможно также аналогичными матрицами спектральных или структурных функций, а также ковариационных функций. Элементы матрицы (5) могут быть записаны и для показателя преломления звука.

Все элементы корреляционной матрицы (5) имеют определенный физический смысл и одинаковую размерность  $(м/с)^2$ , они могут быть измерены в морской среде синхронно прямым методом [8]. Квадрант 1 описывает статистическую структуру гидродинамического кватернионного поля скорости звука  $q_r(\vec{r}, t)$  в движущейся жидкости. Квадрант 4 описывает статистическую структуру акустического кватернионного поля  $q_a(\vec{r}, t)$  в этой же движущейся сжимаемой жидкости. Квадранты 2 и 3 характеризуют эффекты взаимодействия акустического  $q_a$  и гидродинамического  $q_r$  кватернионных полей, включая рассеяние звука на неоднородностях поля скалярной скорости звука и скорости потока.

Квадрант 1 корреляционной матрицы (5) гидродинамического кватернионного поля скорости звука характеризует статистические свойства собственно самой среды. Элементы квадранта 1, содержащие только компоненты скорости потока, представляют собой с точностью до постоянного множителя тензор напряжений Рейнольдса. Элемент  $B_{cc}$  есть четырехмерная автокорреляционная функция скалярного поля скорости звука [9], а оставшиеся взаимно корреляционные функции – турбулентные потоки скорости звука вдоль соответствующих координатных осей, формируемые турбулентным переносом тепла и соли, как это следует далее из корреляционной матрицы (6). Вклад в матрицу  $B_q(\Delta\vec{r}, \tau)$  каждого элемента квадранта 1 в зависимости от определяющих условий может быть различным. Относительный вклад флуктуаций  $\vec{U}$  и  $C$  в  $B_q(\Delta\vec{r}, \tau)$  характеризуют элементы нормированной корреляционной матрицы  $B_{ij}^*(\Delta\vec{r}, \tau) = B_{ij}(\Delta\vec{r}, \tau) / B_q(0, 0)$ . В отличие от числа Маха  $M$ , введем безразмерный параметр  $B_a$ , определяемый отношением дисперсии динамической (векторной) части кватерниона к дисперсии его термодинамической (скалярной) части:  $B_a^2 = (\sigma_u^2 / \sigma_c^2)$ . Для более подробного описания соотношения интенсивностей динамических и термодинамических флуктуаций в морской среде в зависимости от пространственно-временных масштабов неоднородностей, введем спектральную функцию  $B_a^2(\vec{k}, \omega) = S_u(\vec{k}, \omega) / S_c(\vec{k}, \omega)$ , где  $\vec{k} = 2\pi / \Delta\vec{r}$  – волновой вектор,  $\omega = 2\pi / \tau$  – круговая частота. Эта функция может быть определена как для спектров флуктуаций модуля скорости течения, так и для спектров проекций флуктуаций скорости течения на некоторое произвольно выделенное направление, например

направление распространения звуковой волны. Все элементы матрицы (5) могут быть измерены в морской среде синхронно прямым методом. Экспериментальные оценки некоторых статистических характеристик гидродинамического кватернионного поля скорости звука  $q_T$ , показавшие сущность вклада скорости течений во флуктуации скорости распространения звука, были выполнены в работах [7, 9, 10]. Так в некоторых случаях преобладающим становится вклад динамических флуктуаций скорости течения, которые превышают термические флуктуации скорости звука. Полученные натурные данные подтверждают, что основным фактором, вызывающим мезо- и мелкомасштабные флуктуации скорости распространения звука в Черном море в ВКС и на глубинах более 100 м, являются флуктуации скорости течения. Это обусловлено тем, что основная толща вод Черного моря в контексте гидроакустических задач, связанных с распространением звука на большие расстояния, является относительно термостабильной средой (т.е. средой, в которой флуктуации локальной скорости относительно малы). И только в интервале глубин от нижней границы ВКС до  $\sim 200$  м, охватывающем термо- и галоклины, преобладающий вклад в  $q_T$  вносят флуктуации локальной скорости звука, вызванные внутренними волнами и сейшмами [10], приводящими к колебаниям (флуктуациям) оси и границ волновода. Отмеченные особенности гидродинамического кватернионного поля скорости распространения звука необходимо учитывать при построении обобщенных акустических моделей Черного моря и оценке возможностей его мониторинга, например методами акустической томографии. Прямые измерения показывают, что в Черном море на глубинах более 200 м в области мелких масштабов имеем  $B_a^2 > 10$ , т.е. флуктуации скорости распространения звука определяются преимущественно флуктуациями скорости течения. Заметим, что в слое 500 – 750 м наблюдались минимальные дисперсии флуктуаций температуры и скалярной скорости звука [9]. Это может быть использовано для сличения (интеркалибровки) прецизионных гидрофизических измерителей параметров состояния морской среды.

Аналогичным образом возможно сопоставление с динамическими флуктуациями также флуктуаций температуры, солёности, сжимаемости, плотности, давления и других термодинамических параметров морской среды путем пересчета их корреляционных функций и спектров в эквивалентные спектры (и дисперсии) скорости звука через частные производные от соответствующих уравнений состояния [9, 10].

Для описания статистической структуры гидрофизических полей и их взаимосвязи в рамках бинарной модели морской воды исходной является корреляционная матрица (6) скалярных полей первичных гидрологических параметров  $T, S, P$  и  $U, V, W$  – компонент поля скорости потока  $\vec{U}$  :

Элементы этой матрицы есть четырехмерные корреляции, которые могут быть приближенно описаны упомянутой выше квадратичной формой. Элементы, очерченные штриховой линией (квадрант 1), соответствуют тензору напряжений Рейнольдса, а элементы, очерченные пунктиром (квадрант 4), характеризуют термодинамическое состояние среды. Элементы главной диагонали суть автокорреляционные функции полей первичных гидрологических параметров и компонент скорости течения, а элементы вне очерченных областей (квадранты 2, 3) характеризуют турбулентные потоки субстанций (тепла и соли) вдоль соответствующих



координатных осей. Таким образом, элементы квадранта 1 матрицы (5) однозначно связаны с элементами корреляционной матрицы (6).

$$\begin{array}{ccc|ccc}
 B_{UU} & B_{UV} & B_{UW} & B_{UT} & B_{US} & B_{UP} \\
 B_{VU} & B_{VV} & B_{VW} & B_{VT} & B_{VS} & B_{VP} \\
 B_{WU} & B_{WV} & B_{WW} & B_{WT} & B_{WS} & B_{WP} \\
 - & - & - & \cdot & \cdot & \cdot \\
 B_{TU} & B_{TV} & B_{TW} & B_{TT} & B_{TS} & B_{TP} \\
 B_{SU} & B_{SV} & B_{SW} & B_{ST} & B_{SS} & B_{SP} \\
 B_{PU} & B_{PV} & B_{PW} & B_{PT} & B_{PS} & B_{PP}
 \end{array} \quad (6)$$

Матрица (6) легко трансформируется в квадрант 1 корреляционной матрицы (5) гидродинамического кватернионного поля скорости звука путем ее пересчета через частные производные от эмпирического уравнения  $C = C(T, S, P)$ , представленного в дифференциальной форме :

$$C'(\vec{r}, t) = (\partial C / \partial T) \cdot T'(\vec{r}, t) + (\partial C / \partial S) \cdot S'(\vec{r}, t) + (\partial C / \partial P) \cdot P'(\vec{r}, t),$$

где частные производные отвечают некоторым фоновым средним значениям полей  $T, S, P$ .

Все элементы матрицы (6) могут быть вычислены на основе прямых измерений первичных гидрологических параметров, кроме солености  $S$ , которая непосредственно *in situ* не измеряется, а рассчитывается косвенно, в частности, по электропроводности  $\alpha$ , температуре  $T$  и давлению  $P$ , согласно уравнению

$$S = S(T, \alpha, P) \text{ при } CTD - \text{зондировании или по уравнению } S = S(C, T, P)$$

при  $CTP$  – зондировании [9, 10].

Экспериментальные оценки отдельных корреляционных и спектральных элементов квадранта 4 матрицы (5) для низкочастотных акустических кватернионных полей посредством векторно-фазовых измерений выполнены в работе [5]. В матрице (5) элемент  $B_{pp}$  соответствует традиционной (скалярной) гидроакустике, оперирующей скалярными полями звукового давления или потенциала колебательной скорости, а весь квадрант 4 описывает кватернионный характер акустического поля (именуемого в [5] векторной гидроакустикой). Элементы квадранта 4, содержащие взаимные корреляции звукового давления и компонент колебательной скорости  $B_{px}, B_{py}, B_{pz}$ , с точностью до постоянного множителя являются функциями проекций вектора интенсивности или вектора плотности потока акустической энергии (вектора Умова) на координатные оси. Остальные элементы квадранта 4 характеризуют векторное поле колебательной скорости. Отметим, что в традиционной акустике только два элемента матрицы (5) –  $B_{cc}$  и  $B_{pp}$  описывают скалярные поля скорости звука и звукового давления.

Таким образом, комплексный подход на основе обобщенного кватернионного описания гидрофизических и акустических полей открывает новые возможности

эффективного дистанционного мониторинга водной среды и звуковых полей в ней и позволяет наиболее полно использовать всю полезную информацию, заключенную в звуковых и гидрологических полях морской среды, в целях физической экологии. Заметим, что кватернионное описание геофизических полей полностью применимо и к атмосферной акустике [3], где по сравнению с гидроакустикой относительное влияние скорости ветра особенно велико.

### Литература

1. *Азуреева О.В.* Краткий курс по концепции современного естествознания: учеб. пособие. – М.: Изд-во «Окей-книга», 2008. – 154 с.
2. *Бабий В.И.* Скорость звука как связующее звено гидрофизики и гидроакустики // Проблемы, методы и средства исследований Мирового океана: Сб. докладов второй международной научно-практической конференции / НАН Украины, Научно-технический центр панорамных акустических систем. – 2008. – Запорожье. – С. 113 – 121.
3. *Блохинцев Д.И.* Акустика неоднородной движущейся среды. – 2-е изд. – М.: Наука, 1981. – 208 с.
4. *Монин А.С., Яглом А.М.* Статистическая гидромеханика. – М.: Наука. Ч.1., 1965. – 640 с. Ч.2., 1967. – 720 с.
5. *Щуров В.А.* Векторная акустика океана. – Владивосток: Дальнаука, 2003. – 308 с.
6. *Бабий В.И.* Перенос акустической энергии в поглощающей и излучающей среде // Морские гидрофизические исследования, вып. 2(65), 1974. – Севастополь. – С. 189 – 192.
7. *Бабий В.И.* Кватернионное описание поля скорости звука в океане. Экспериментальная оценка статистических характеристик кватернионного поля скорости звука // Тезисы. пятого семинара «Акустические статистические модели океана». – М.: АКИН, 1985. – С. 27 – 33.
8. *Бабий В.И.* Акустический векторно-фазовый метод измерения звуковых полей // Акустические методы и средства исследования океана. Междугосударственный сборник. – Владивосток, ДВПИ, 1986. – С. 63 – 66.
9. *Бабий В.И.* Мелкомасштабная структура поля скорости звука в океане. – Л.: Гидрометеиздат, 1983. – 200 с.
10. *Бабий В.И., Булгаков Н.П., Ломакин П.Д.* Акустические исследования морей и океанов // Развитие морских наук и технологий в Морском гидрофизическом институте за 75 лет. – Севастополь: МГИ НАН Украины, 2004. – С. 299 – 330.

## ТЕОРИЯ ФОРМИРОВАНИЯ ТЕЧЕНИЙ В НЕСЖИМАЕМОЙ ЛИНЕЙНО СТРАТИФИЦИРОВАННОЙ ЖИДКОСТИ

В.Г. Байдулов

*Учреждение Российской академии наук Институт проблем механики РАН*

Предложена теория формирования одно- и двумерных течений в стратифицированной жидкости. Поскольку на начальной фазе развития течения нелинейные (инерционные) члены и эффекты плавучести малы, метод разделения переменных может быть использован для построения точных решений нелинейных задач неоднородной жидкости в форме временных рядов. В рамках такого подхода единообразно решаются задачи идеальной жидкости и среды с диссипацией. В качестве примеров использования метода приведены решения задач формирования течения, индуцированного диффузией на наклонной границе и двумерной задачи обтекания горизонтального цилиндра потоком стратифицированной жидкости.

Для теоретического и лабораторного моделирования течений жидкости в окружающей среде (океанах, морях и атмосфере), плотность которой неоднородна по вертикали широко используется приближение Буссинеска, когда предполагается, что возмущениями плотности пренебрегается во всех членах уравнений движения за исключением члена содержащего ускорение свободного падения (см., например [1]). При этом модель течений в глубине жидкости строится на базе выбора в качестве основного (равновесного) распределения плотности – линейного распределения, а саму жидкость полагают неограниченной в вертикальном направлении. Если к принятым приближениям добавить условие несжимаемости жидкости, которое часто записывается в виде условия бездивергентности, то результате получается общепринятая модель описания течений стратифицированной жидкости без учета эффектов, связанных распространения звука [2].

Однако, несмотря на сделанные упрощения, модель остается достаточно сложной для аналитического и даже численного моделирования. Нелинейный характер уравнений гидродинамики и большое число влияющих факторов, к которым, прежде всего, следует отнести эффекты плавучести и диссипации, привели к появлению целого ряда приближенных подходов к решению задач обтекания тел потоком стратифицированной жидкости и генерации внутренних волн [3 – 5]. Задача о движении цилиндра в стратифицированной жидкости неоднократно являлась предметом изучения посвящено большое количество работ, однако точного решения представлено не было. Так, например, в работе [3] область формирующегося течения была разбита на шесть частей, для каждой из которых с использованием преобразований Лапласа получены асимптотические выражения для функции тока. С середины 70-х годов прошлого века вплоть до настоящего времени [5] развивается подход, основанный на моделировании границы тела (нулевая линия тока) силовыми или массовыми источниками. Однако, задача определения распределения источников в случае стратифицированной жидкости не решена, и форма границы задается на основе решения задачи однородной жидкости.

Другой тип задач – конвективные течения неоднородной жидкости на топографии моделируют процессы переноса энергии и вещества в океане и атмосфере

ре. К одной из первых работ в этой области следует отнести работу Л. Прандтля [6], который связал возникновение долинных горных ветров с конвективными течениями, порождаемыми нагретой поверхностью в стратифицированной по температуре атмосфере. Аналогом такого рода течений в стратифицированной жидкости являются течения, индуцированные диффузией на непроницаемой для соли поверхности. Впервые вид решения установившейся задачи был найден в работе [7], что позволило в дальнейшем использовать его для оценки процессов переноса вещества в придонной области, совмещающей механизмы молекулярного и турбулентного перемешивания [8]. Точное решение задачи установления течения получено в [9], однако детальный динамики формирования течения проведен не был. В задаче об импульсном старте наклонной плоскости в стратифицированной среде с диффузией [10] с использованием преобразований Лапласа показано, что пограничное течение разбивается на два подслоя: вязкий и диффузионный.

В данной работе предложена общая теория построения решений уравнений стратифицированной жидкости, которая основывается на известном факте, что на малых временах эволюции течения конвективные (инерционные) члены уравнений малы по сравнению с ускорением жидкости [11]. Кроме того малой оказывается также и сила плавучести, существенный вклад которой в общий баланс сил достигается при больших отклонениях жидкой частицы из положения равновесия, что требует времени. Таким образом, естественным представляется разложение начальной задачи во временные ряды. Ниже приводится общая теория решений задач обтекания тел потоком стратифицированной жидкости и формирования течений, индуцируемых диффузией на топографии. Предложенный подход иллюстрируется на примерах течений, вызванных движением цилиндра в идеальной стратифицированной жидкости и прерыванием диффузионного потока соли на наклонной плоскости.

**Теория формирования течений при движении тел в стратифицированной жидкости.** Рассматриваются течения неоднородной по плотности изотермической несжимаемой жидкости, когда изменения плотности определяются только концентрацией стратифицирующей примеси ( $\rho = \rho(S)$ ). В поле силы тяжести при отсутствии других возмущений распределение концентрации примеси зависит только от вертикальной координаты, причем масштаб ее пространственного изменения называется масштабом стратификации  $\Lambda = -(d \ln \rho / dz)^{-1}$ . Моделирование течений при этом часто выполняется в рамках однородной стратификации, когда плотность жидкости линейно связана с вертикальной координатой. В этом случае коэффициенты уравнений движения остаются постоянными, а уравнение состояния имеет вид

$$\rho = \rho_0 \left( 1 - \frac{1}{\Lambda} z + S \right) \quad (1)$$

где ось  $z$  направлена против действия силы тяжести, а  $S$  – возмущение концентрации примеси (солености), в определение которой включен коэффициент солевого сжатия.

Поскольку в природных системах масштаб стратификации много больше других размеров задачи, а плотность меняется слабо, используют приближение Буссинеска. В рамках приближения Буссинеска вклад концентрации примеси в плотность считается пренебрежимо малым везде за исключением слагаемого пропорционального ускорению свободного падения – большой величины в рамках рассматриваемых задач. С учетом сделанных замечаний система уравнений движения несжимаемой стратифицированной жидкости в переменных возмущение солёности  $S$ , скорость  $\mathbf{V}$ , завихренность  $\boldsymbol{\omega}$ , имеет вид

$$\begin{aligned}\boldsymbol{\omega}_t + (\mathbf{V}\nabla)\boldsymbol{\omega} - (\boldsymbol{\omega}\nabla)\mathbf{V} &= \nu\Delta\boldsymbol{\omega} + \nabla S \times \mathbf{g} \\ \operatorname{div} \mathbf{V} &= 0, \operatorname{rot} \mathbf{V} = \boldsymbol{\omega} \\ S_t + (\mathbf{V}\nabla)S &= \kappa\Delta S + \frac{1}{\Lambda} \mathbf{V} \cdot \mathbf{e}_z\end{aligned}\quad (2)$$

где  $V_z$  – вертикальная компонента скорости,  $\mathbf{g}$  – ускорение свободного падения,  $\nu$  и  $\kappa$  – коэффициенты кинематической вязкости и диффузии соли, соответственно,  $t$  – время,  $\nabla$  – оператор Гамильтона,  $\Delta$  – оператор Лапласа.

Для трех типов задач (обтекания тел потоками идеальной и диссипативной жидкости и течений, индуцированных диффузией на топографии) алгоритм построения решения имеет свои особенности, поэтому каждый из них будет рассматриваться отдельно.

Во всех случаях в начальный момент времени жидкость покоится, и возмущения солёности отсутствуют, решается задача Коши с тривиальными начальными условиями

$$\mathbf{V}, S|_{t=0} = 0 \quad (3)$$

**Модель стратифицированной идеальной жидкости.** В рамках модели идеальной жидкости диссипативные эффекты отсутствуют, и течение описывается системой (2) с нулевыми кинетическими коэффициентами  $\nu = \kappa = 0$ . На границе твердого тела задается условие непротекания, и нормальные компоненты скоростей течения жидкости и движения тела  $\mathbf{U}_0(t)$  на поверхности тела  $\Sigma(t)$  совпадают

$$(\mathbf{V} \cdot \mathbf{n})|_{\Sigma(t)} = (\mathbf{U}_0(t) \cdot \mathbf{n})|_{\Sigma(t)} \quad (4)$$

где  $\mathbf{n}$  – внешняя нормаль к поверхности тела  $\Sigma$ , а  $\mathbf{U}_0(t)$  – заданная скорость движения тела.

На бесконечности возмущения солёности и скорость затухают

$$S, \mathbf{V}|_{\infty} \rightarrow 0 \quad (5)$$

Поскольку уравнения несжимаемой стратифицированной жидкости допускают симметрию перехода в систему координат, движущуюся относительно покоящейся с произвольной линейной скоростью без вращения, то переход в систему

координат связанную с телом не повлечет за собой изменения вида уравнений движения, записанных относительно новых переменных вида

$$\mathbf{r}_* = \mathbf{r} - \mathbf{r}_0(t), \mathbf{V}_* = \mathbf{V} - \mathbf{U}_0(t), P_* = P + \dot{\mathbf{U}}_0(t) \left( \mathbf{r} - \frac{1}{2} \mathbf{r}_0(t) \right) \quad (6)$$

здесь  $\mathbf{r}_0(t)$  и  $\mathbf{U}_0(t)$  – закон и скорость движения новой системы координат относительно старой,  $P$  – полное давление.

Преобразование (6) для давления показывает, что в приближении Буссинеска силы инерции приводят лишь к перенормировке давления, а система уравнений относительно переменных динамическая составляющая давления – скорость – возмущение солёности не меняется. В новой системе координат уравнение границы тела уже не зависит от времени, на бесконечности задается набегающий поток, а задача о движении тела переходит в задачу обтекания неподвижного препятствия. Тогда, опуская индекс "\*" в обозначении новых переменных, имеем

$$(\mathbf{V} \cdot \mathbf{n})|_{\Sigma} = 0 \quad (7)$$

$$S, \mathbf{V}|_{\infty} \rightarrow -\mathbf{U}_0(t) \quad (8)$$

Для оценки вкладов каждого члена уравнения проводится обезразмеривание уравнений движения. В качестве параметров обезразмеривания выбираются: для длины – характерный размер тела (радиус цилиндра  $R$ ), скорости – масштаб скорости натекающего потока  $U_0$ , для завихренности – отношение характерной скорости к размеру тела  $U_0/R$ , для времени – отношение размера тела к характерной скорости его движения  $R/U_0$ . В качестве обезразмеривающего параметра для возмущения солёности удобно выбрать отношение размера тела к масштабу стратификации  $R/\Lambda$ . Тогда система (2), начальные (3) и граничные (7, 8) условия переписутся в виде

$$\begin{aligned} \frac{\partial \boldsymbol{\omega}}{\partial t} + (\mathbf{V} \nabla) \boldsymbol{\omega} - (\boldsymbol{\omega} \nabla) \mathbf{V} &= -\frac{1}{Fr} \nabla S \times \mathbf{e}_z \\ \operatorname{div} \mathbf{V} &= 0, \operatorname{rot} \mathbf{V} = \boldsymbol{\omega} \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial S}{\partial t} + (\mathbf{V} \nabla) S &= \mathbf{V} \cdot \mathbf{e}_z \\ \mathbf{V}, S|_{t=0} &= 0 \end{aligned} \quad (10)$$

$$(\mathbf{V} \mathbf{n})|_{\Sigma} = 0 \quad (11)$$

$$S|_{r \rightarrow \infty} \rightarrow 0, \mathbf{V}|_{r \rightarrow \infty} \rightarrow -\frac{\mathbf{U}_0(t)}{U_0} \quad (12)$$

Здесь и далее  $r$  – модуль радиус вектора,  $Fr = (U_0 / NR)^2$  – число Фруда,  $N = \sqrt{g / \Lambda}$  – частота плавучести.

Поскольку далее исследуется фаза формирования течений, то вводится малый временной параметр  $\tau$ , отражающий малое время, прошедшее с начала движения тела. В приближении идеальной жидкости это можно сделать, нормируя только временную переменную  $t = \tau t'$ , после чего уравнения движения преобразуются к виду

$$\begin{aligned} \frac{\partial \boldsymbol{\omega}}{\partial t} + \tau [(\mathbf{V} \nabla) \boldsymbol{\omega} - (\boldsymbol{\omega} \nabla) \mathbf{V}] &= -\frac{1}{Fr} \tau \nabla S \times \mathbf{e}_z \\ \operatorname{div} \mathbf{V} &= 0, \operatorname{rot} \mathbf{V} = \boldsymbol{\omega} \\ \frac{\partial S}{\partial t} + \tau (\mathbf{V} \nabla) S &= \tau \mathbf{V} \cdot \mathbf{e}_z \end{aligned} \quad (13)$$

Тогда решение задачи (9 – 12) можно искать в форме временных рядов

$$\mathbf{V} = \sum_{n=0} \tau^{n+n_1} \mathbf{V}_n, \quad \boldsymbol{\omega} = \sum_{n=0} \tau^{n+n_2} \boldsymbol{\omega}_n, \quad S = \sum_{n=0} \tau^{n+n_3} S_n \quad (14)$$

Обозначая для скорости набегающего потока порядок малости по переменной  $\tau$  через  $k$

$$\mathbf{U}_0 = \tau^k \sum \mathbf{U}_{0,n} \tau^n t^{n+k} = \tau^k \tilde{\mathbf{U}}_0(t) \quad (15)$$

получаем, что порядки малости для скорости оказываются также равным  $n_1 = k$ ,

а для возмущения солёности –  $n_3 = k + 1$  (четвертое уравнение в системе (13)).

В нулевом приближении решается линейная задача потенциального обтекания тела потоком однородной жидкости. Действие сил плавучести в первом уравнении системы (13) приводит в первом приближении к возникновению завихренности,

порядок малости которой оказывается равным  $n_2 = k + 2$ . Вклад нелинейных членов уравнения для завихренности и переноса примеси оказывается пропорциональным

$\tau^{2k+3}$  и  $\tau^{2k+2}$ , соответственно, и сказывается при расчете тем более удаленных членов ряда (14), чем более гладким оказывается закон разгона тела из состояния покоя (15). Подставляя разложения (14) в систему (13), получаем

$$\begin{aligned} \frac{\partial \boldsymbol{\omega}}{\partial t} + \tau^{k+1} [(\mathbf{V} \nabla) \boldsymbol{\omega} - (\boldsymbol{\omega} \nabla) \mathbf{V}] &= -\frac{1}{Fr} \tau \nabla S \times \mathbf{e}_z \\ \operatorname{div} \mathbf{V} &= 0, \operatorname{rot} \mathbf{V} = \tau^2 \boldsymbol{\omega} \end{aligned} \quad (16)$$

$$\frac{\partial S}{\partial t} + \tau^{k+1} (\mathbf{V}\nabla)S = \mathbf{V} \cdot \mathbf{e}_z$$

Общую динамику движения можно описать следующим образом. Появление вертикальной компоненты скорости в течении приводит в действие силы плавуности в уравнении переноса солености, которая, в свою очередь, вносит вклад в поле скорости. При этом система (16) с активным поведением скорости и солености переходит систему рекуррентных линейных дифференциальных уравнений относительно коэффицициентных функций  $\mathbf{V}_n$ ,  $\omega_n$  и  $S_n$ , причем старшие коэффициентные функции удовлетворяют уравнениям идеальной однородной жидкости с нетривиальной правой частью, которая определяется коэффициентными функциями солености с меньшим значением  $n$ . Коэффицициентные функции солености (последнее уравнение системы (16)) определяются простым интегрированием по времени. Кроме того, из разделения переменных в задаче обтекания тела потоком однородной жидкости, следует разделение переменных в задаче, когда жидкость стратифицирована.

**Модель стратифицированной вязкой жидкости.** Учет вязкости повышает порядок системы (13), и уравнения движения имеют вид системы (2) с обращенным в нуль коэффициентом диффузии ( $\kappa = 0$ ), параметры обезразмеривания при этом не меняются. В результате повышения порядка уравнений движения условие непротекания заменяется на условие прилипания

$$\mathbf{V}|_{\Sigma} = 0 \tag{17}$$

Последнее требование на малых временах приводит к формированию интенсивного поля завихренности в тонком слое вблизи тела. Развитие течения при этом происходит по законам уравнения теплопроводности, когда между первыми по времени и вторыми по пространству производными завихренности достигается баланс, а толщина слоя подстройки поля течения вблизи тела растет со временем, а скорость роста определяется числом Рейнольдса

$$\mathbf{r} = \sqrt{t / \text{Re}} \tag{18}$$

Таким образом, в начальные моменты времени в малой окрестности тела пространственные производные оказываются связанными с временными. Чтобы учесть этот факт, учитывая соотношение (18), перенормируем пространственные и временную координату ( $t = \mu^2 t'$ ,  $r = \mu r'$ ), тогда уравнения движения запишутся в виде

$$\begin{aligned} \frac{\partial \omega}{\partial t} + \mu [(\mathbf{V}\nabla)\omega - (\omega\nabla)\mathbf{V}] &= \frac{1}{\text{Re}} \Delta \omega - \frac{1}{\text{Fr}} \mu \nabla S \times \mathbf{e}_z \\ \text{div } \mathbf{V} &= 0, \quad \text{rot } \mathbf{V} = \mu \omega \\ \frac{\partial S}{\partial t} + \mu (\mathbf{V}\nabla)S &= \mu^2 \mathbf{V} \cdot \mathbf{e}_z \end{aligned} \tag{19}$$

единственным нетривиальным условием будет условие натекающего потока на бесконечности

$$\mathbf{V}|_{r \rightarrow \infty} \rightarrow -\mu^{2k} \tilde{\mathbf{U}}_0(t) \tag{20}$$



После перенормировки решение ищется в виде рядов по параметру  $\mu$

$$\mathbf{v} = \sum_{n=0} \mu^{n+n_1} \mathbf{v}_n, \quad \boldsymbol{\omega} = \sum_{n=0} \mu^{n+n_2} \boldsymbol{\omega}_n, \quad S = \sum_{n=0} \mu^{n+n_3} S_n \quad (21)$$

Из граничных условий следует, что порядок малости скорости  $n_1 = 2k$ , а завихренности  $n_2 = 2k - 1$ . Тогда из четвертого уравнения системы (19) следует, что порядок малости возмущения солёности равен  $n_3 = 2(k + 1)$ . Перепишем систему (21) через переменные, разложение которых начинается с нулевой степени  $\mu$  ( $\mathbf{V} = \mu^{2k} \mathbf{v}$ ,  $\boldsymbol{\omega} = \mu^{2k-1} \tilde{\boldsymbol{\omega}}$ ,  $S = \mu^{2k+2} s$ )

$$\frac{\partial \tilde{\boldsymbol{\omega}}}{\partial t} + \mu^{2k+1} [(\mathbf{v} \nabla) \tilde{\boldsymbol{\omega}} - (\tilde{\boldsymbol{\omega}} \nabla) \mathbf{v}] = \frac{1}{\text{Re}} \Delta \tilde{\boldsymbol{\omega}} - \frac{1}{\text{Fr}} \mu^4 \nabla s \times \mathbf{e}_z$$

$$\text{div } \mathbf{v} = 0, \quad \text{rot } \mathbf{v} = \tilde{\boldsymbol{\omega}} \quad (22)$$

$$\frac{\partial s}{\partial t} + \mu^{2k+1} (\mathbf{v} \nabla) s = \mathbf{v} \cdot \mathbf{e}_z$$

Как и в случае идеальной жидкости, источником возмущения в задаче (10, 17, 20, 22) является заданный поток на бесконечности. В результате дифференциальным уравнением, определяющим вид старших коэффициентных функций завихренности, является уравнение теплопроводности с коэффициентом переноса, определяемым кинематической вязкостью жидкости. Для нулевых коэффициентов ряда решается линейная задача формирования течения вязкой однородной жидкости. Влияние стратификации сказывается на поле скорости через появление нетривиальной правой части в рекуррентных уравнениях, определяемых коэффициентными функциями солёности, рассчитанными на предыдущих шагах рекуррентной процедуры. Поскольку в отсутствии диффузии солёность не имеет собственного коэффициента переноса, ее коэффициентные функции, как и в случае идеальной жидкости, определяются интегралом от поля скорости.

**Течения, индуцированные диффузией.** Простейшим видом конвективных задач стратифицированной жидкости являются задачи формирования течений, индуцированных диффузией. Условие непроницаемости границы тела для соли (условие равенства нулю нормальной производной полной солёности) для возмущения солёности приводит к возникновению возмущений при любом отклонении границы тела от вертикали

$$\left. \frac{\partial S}{\partial \mathbf{n}} \right|_{\Sigma} = \left. \frac{\partial z}{\partial \mathbf{n}} \right|_{\Sigma} \quad (23)$$

В этом случае линии равной солёности искажаются в окрестности границы тела, что приводит к нарушению гидростатического равновесия и возникновению течения.

Поскольку в такой задаче набегающий поток отсутствует обезразмеривание системы уравнений движения необходимо провести заново, используя в качестве характерных комбинации внутренних масштабов среды. Так масштаб длины в

течениях, индуцированных диффузией, определяется комбинацией частоты плавучести и коэффициента диффузии  $\tau_0 = \sqrt{\kappa/N}$ , величина характерного времени обратно пропорционально частоте плавучести  $t_0 = 1/N$ , а в качестве характерной скорости и завихренности естественным представляется выбрать величины  $V_0 = \sqrt{\kappa N}$  и  $\omega_0 = N$ . В результате уравнения движения примут вид

$$\begin{aligned} \frac{\partial \boldsymbol{\omega}}{\partial t} + (\mathbf{V}\nabla)\boldsymbol{\omega} - (\boldsymbol{\omega}\nabla)\mathbf{V} &= \text{Sc} \Delta \boldsymbol{\omega} - \nabla S \times \mathbf{e}_z \\ \text{div } \mathbf{V} &= 0, \quad \text{rot } \mathbf{V} = \boldsymbol{\omega} \end{aligned} \quad (24)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial S}{\partial t} + (\mathbf{V}\nabla)S &= \Delta S + \mathbf{V} \cdot \mathbf{e}_z \\ \left. \frac{\partial S}{\partial \mathbf{n}} \right|_{\Sigma} &= \left. \frac{\partial z}{\partial \mathbf{n}} \right|_{\Sigma}, \quad \mathbf{V}|_{\Sigma} = 0 \end{aligned} \quad (25)$$

В отличие от задач с набегающим потоком, главным безразмерным комплексом, определяющим начальную стадию развития течений, индуцированных диффузией, является число Шмидта. Другой безразмерный комплекс – отношение размера тела к характерному диффузионному размеру длины ( $R_0 = R/\sqrt{\kappa/N}$ ), возникающий в граничных условиях определяет динамику течения на более поздних стадиях, определяя вертикальный масштаб области распространения возмущений.

Поскольку эффекты диффузии описываются аналогично эффектам вязкости, для анализа формирования течений, как и выше, перенормируем пространственные и временную координату ( $t = \mu^2 t'$ ,  $r = \mu r'$ ). Тогда из граничных условий следует, что возмущения солёности пропорциональны  $\mu$ , а из уравнений движения, что  $\boldsymbol{\omega} \sim \mu^2$  и  $\mathbf{V} \sim \mu^3$ . Выделяя опять явным образом порядки малости для зависимых переменных ( $S = \mu s$ ,  $\boldsymbol{\omega} = \mu^2 \tilde{\boldsymbol{\omega}}$ ,  $\mathbf{V} = \mu^3 \mathbf{v}$ ) приходим к следующей системе уравнений

$$\begin{aligned} \frac{\partial \tilde{\boldsymbol{\omega}}}{\partial t} + \mu^4 [(\mathbf{v}\nabla)\tilde{\boldsymbol{\omega}} - (\tilde{\boldsymbol{\omega}}\nabla)\mathbf{v}] &= \text{Sc} \Delta \tilde{\boldsymbol{\omega}} - \nabla s \times \mathbf{e}_z \\ \text{div } \mathbf{v} &= 0, \quad \text{rot } \mathbf{v} = \tilde{\boldsymbol{\omega}} \\ \frac{\partial s}{\partial t} + \mu^4 (\mathbf{v}\nabla)s &= \Delta s + \mu^4 v_z \end{aligned} \quad (26)$$

Далее решение опять представляется в виде временных рядов

$$\mathbf{v} = \sum_{n=0} \mu^n \mathbf{v}_n, \quad \tilde{\boldsymbol{\omega}} = \sum_{n=0} \mu^n \tilde{\boldsymbol{\omega}}_n, \quad s = \sum_{n=0} \mu^n s_n \quad (27)$$

Динамика уравнений движения при этом выглядит следующим образом: на нулевом шаге рекуррентной процедуры решается линейное уравнение диффузии,

происходит коррекция поля солёности на величину необходимую для выполнения условия непротекания. В свою очередь возникшие возмущения поля солёности служат источником завихренности в первом уравнении (26). На следующем шаге рекуррентной процедуры скорость, свою очередь, выступает в качестве источника в уравнении переноса примеси. В результате решение системы уравнений движения (26) сводится на каждом шаге теории возмущений к решению уравнения теплопроводности с источниками.

В качестве примера решения предложенной техникой задач первого типа рассмотрим задачу обтекания горизонтального цилиндра потоком стратифицированной жидкости.

**Формирование течения при обтекании горизонтального цилиндра потоком идеальной стратифицированной жидкости.** Горизонтальный цилиндр, помещен в безграничную идеальную линейно стратифицированную жидкость с уравнением состояния вида (1). В начальный момент времени возмущения отсутствуют, жидкость покоится (3). При  $t > 0$  на бесконечности задается набегающий поток  $\mathbf{U}_0(t)$  в вертикальном или горизонтальном направлении (Рис. 1).

Течение в этом случае является плоским и линеаризованные уравнения движения идеальной стратифицированной жидкости (2), записанные в переменных функция тока  $\Psi$  – возмущение солёности принимают вид

$$U = \Psi_y, V = -\Psi_x \quad (\mathbf{V} = U\mathbf{e}_x + V\mathbf{e}_y)$$

$$\Delta\Psi_{tt} + \varepsilon^2\Psi_{xx} = 0, S_t = -\Psi_x \quad (28)$$

где  $\Delta = \frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2}{\partial \varphi^2}$  – оператор Лапласа,  $\varepsilon = 1/\sqrt{Gr}$ , для безразмеривания функции тока использовано произведение радиуса цилиндра на характерную скорость  $RU_0$ .

Краевые и начальные условия относительно функции тока запишутся в виде

$$\Psi|_{t=0} = 0, \Psi|_{r=1} = 0, (a) \Psi|_{r=\infty} = y\tilde{U}_0(t); (б) \Psi|_{r=\infty} = -x\tilde{U}_0(t), \tilde{U}_0(t) = \frac{U_0(t)}{U_0} \quad (29)$$

Условию (а) соответствует горизонтальному натекающему потоку, а (б) – вертикальному.

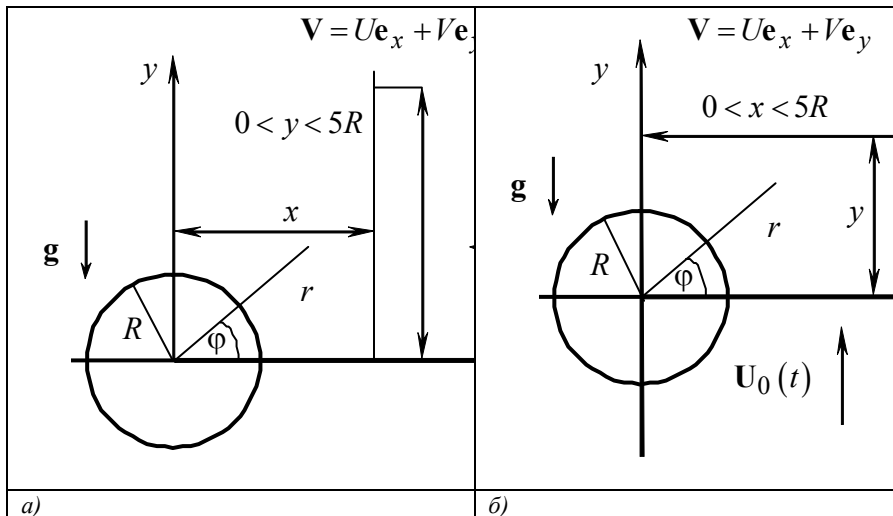


Рис. 1. Геометрия течения. Цилиндрическая и декартовы системы координат.

а) Горизонтальный набегающий поток, б) Вертикальный набегающий поток.

С использованием комплексной формы записи граничные условия задач с горизонтальным (а) и вертикальным (б) набегающим потоком могут быть объединены в одно условие

$$\psi|_{r=\infty} = -r\tilde{U}_0(t) \exp(i\varphi), \quad L_x = e^{i\varphi} \left( \partial_r - \frac{1}{ir} \partial_\varphi \right) + e^{-i\varphi} \left( \partial_r + \frac{1}{ir} \partial_\varphi \right) \quad (30)$$

Решение задачи (28, 29) строится с использованием преобразования Лапласа  $\psi \square \Psi$

$$\Delta\Psi + \left(\frac{\varepsilon}{p}\right)^2 \Psi_{xx} = 0 \quad (31)$$

Здесь  $P$  – параметр преобразования Лапласа. В цилиндрической системе координат  $(x = r \cos \varphi, y = r \sin \varphi)$  оператор дифференцирования по переменной  $x$  имеет вид

$$L_x = \partial_x = \cos \varphi \partial_r - \frac{1}{r} \sin \varphi \partial_\varphi = e^{i\varphi} \left( \partial_r - \frac{1}{ir} \partial_\varphi \right) + e^{-i\varphi} \left( \partial_r + \frac{1}{ir} \partial_\varphi \right) \quad (32)$$

В образах Лапласа граничные условия преобразуются к виду

$$\psi|_{r=\infty} = -r w_0(p) \exp(i\varphi) \quad (33)$$

где  $w_0(p)$  образ Лапласа для обезразмеренной скорости набегающего потока  $\tilde{U}_0(t)$ .

Используя замены  $\Psi = w_0(p)F$ , вначале находим решение для скорости набегающего потока простейшего вида (в виде дельта функции), тогда функция тока, отвечающая закону движения заданной формы  $U_0(t)$ , находится с помощью интеграла свертки. Для переменной  $F$  задача (31, 33) принимает форму

$$\Delta F + \left(\frac{\varepsilon}{p}\right)^2 L_x^2 F = 0 \quad (34)$$

$$F|_{r=1} = 0, \quad \frac{1}{r} F|_{r \rightarrow \infty} = \exp(i\varphi) \quad (35)$$

Решение задачи (34, 35) строится в виде ряда

$$F = \sum_{n=0}^{\infty} \left(\frac{\varepsilon}{2}\right)^{2n} f_n \quad (36)$$

Подстановка разложения (36) в уравнение (34) и краевые условия (35) приводит к системе рекуррентных ОДУ

$$\Delta f_n + L_x^2 f_{n-1} = 0 \quad (37)$$

Граничные условия для коэффициентов ряда переписуются в виде

$$f_n|_{r=1} = 0, \quad n = 0, 1, 2, \dots, \quad \frac{1}{r} f_0|_{r=\infty} = \exp(i\varphi), \quad \frac{1}{r} f_n|_{r=\infty} = 0, \quad n = 1, 2, \dots \quad (38)$$

На каждом шаге рекуррентной процедуры переменные разделяются, при этом радиальная часть решения представляет собой степенные функции так, что оказывается возможным выписать общую формулу решения

$$F = (r^{-1} - r) \exp(i\varphi) + \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{\varepsilon}{2p}\right)^{2n} \sum_{k=1}^n \exp(i(2k+1)\varphi) \sum_{m=0}^k f_{n,k,m} r^{-(2m+1)} \quad (39)$$

где числовые коэффициенты  $f_{n,k,m}$  удовлетворяют следующей системе рекуррентных соотношений.

Подставляя разложение (39) в уравнение (37) и граничные условия (38) и собирая коэффициенты сначала при одинаковых угловых гармониках, а затем при одинаковых степенях  $r$ , приходим к рекуррентным уравнениям для коэффициентов ряда

*Начальные значения для коэффициентов ряда*

$$\begin{aligned} f_{1,1,0} &= 1, & f_{1,1,1} &= -1, & f_{2,1,0} &= -2, & f_{2,1,1} &= 2, & f_{3,1,0} &= 5, \\ f_{3,1,1} &= -5, & f_{3,2,0} &= -4, \\ f_{3,2,1} &= 12, & f_{3,2,2} &= -8, & f_{3,3,0} &= 1, & f_{3,3,1} &= -6, & f_{3,3,2} &= 10, \end{aligned}$$

$$f_{3,3,3} = -5$$

Рекуррентные соотношения, следующие из уравнения (37)

$$1. f_{n,n,m} = \frac{n+m}{n-m} f_{n-1,n-1,m}, \quad n = 3, 4, \dots, \quad m = \overline{0, n-1}$$

$$2. f_{n,1,0} = -2f_{n-1,1,0} + f_{n-1,2,0}, \quad n = 4, 5, \dots$$

$$3. f_{n,n-1,m} = \frac{n-1+m}{n-1-m} f_{n-1,n-2,m} - 2f_{n-1,n-1,m}, \quad n = 3, 4, \dots, \\ m = \overline{0, n-2}$$

$$4. f_{n,k,m} = \frac{k+m}{k-m} f_{n-1,k-1,m} - 2f_{n-1,k,m} + \frac{k-m+1}{k+m+1} f_{n-1,k+1,m}, \\ n = 3, 4, \dots, \quad k = \overline{2, n-2}, \quad m = \overline{0, k-1}$$

Рекуррентные соотношения, следующие из краевых условий

$$5. f_{n,k,k} = - \sum_{m=0}^{k-1} f_{n,k,m}, \quad n = 1, 2, \dots, \quad k = \overline{1, n}.$$

Заметив, что решение уравнения 1 для  $m = 0$  всегда дает  $f_{n,0}^n = 1$ , выпишем порядок решения рекуррентных уравнений

0. Задаем значение  $n$ ;

А. Рассчитываем значения  $f_{n,n,0} = 1$ ;

Б. По формуле 2. рассчитываем значения  $f_{n,1,0}$ ;

В. По формуле 5. рассчитываем значения  $f_{n,1,1}$ ;

Г. По формуле 3. рассчитываем значения  $f_{n,n-1,m}, \quad m = \overline{0, n-2}$ ;

Д. По формуле 5. рассчитываем значения  $f_{n,n-1,n-1}$ ;

Е. По формуле 1. рассчитываем значения  $f_{n,n,m}, \quad m = \overline{1, n-1}$ ;

Ж. По формуле 5. рассчитываем значения  $f_{n,n,n}$ ;

И. По формуле 4. рассчитываем значения  $f_{n,k,m}, \quad k = \overline{2, n-2}, \quad m = \overline{0, k-1}$ ;

К. По формуле 5. рассчитываем значения  $f_{n,k,k}, \quad k = \overline{2, n-2}$ .

В результате все коэффициенты ряда определены, и выражение (39) можно использовать для расчета гидродинамических переменных.

*Решение задачи импульсного старта цилиндра с постоянной скоростью в идеальной стратифицированной жидкости. При постоянстве набегающего потока*

граничные условия на бесконечности, записанные в безразмерном форме для образов Лапласа, имеют вид

$$\Psi \Big|_{r=\infty} = -\frac{r}{p} \exp(i\varphi) \quad (40)$$

Тогда в конфигурационном пространстве выражение для функции тока имеет вид степенного ряда по времени

$$\Psi = \left\{ \left( \frac{1}{r} - r \right) \exp(i\varphi) + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{(2n)!} \left( \frac{\varepsilon t}{2} \right)^{2n} \sum_{k=1}^n \exp(i(2k+1)\varphi) \sum_{m=0}^k f_{n,k,m} r^{-(2m+1)} \right\} \quad (41)$$

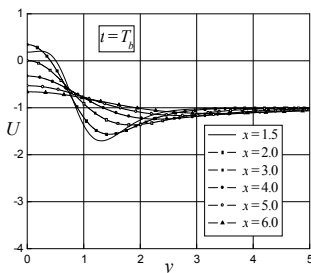
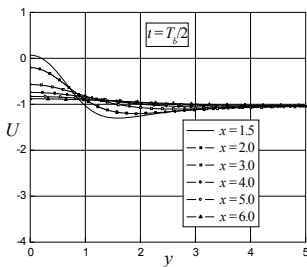
Вычисляя производные от функции тока и интегрируя ее по времени (28), находим выражения скорости течения и возмущения солёности соответственно.

Учитывая свойства симметрии двух задач оттекания цилиндра

<i>Вертикальный набегающий поток</i>	<i>Горизонтальный набегающий поток</i>
$S(-x) = S(x), \quad S(-y) = S(y),$	$S(-x) = -S(x),$
$U(-x) = -U(x),$	$S(-y) = -S(y),$
$U(-y) = -U(y),$	$U(-x) = U(x),$
$V(-x) = V(x), \quad V(-y) = V(y)$	$U(-y) = U(y),$
	$V(-x) = -V(x),$
	$V(-y) = -V(y)$

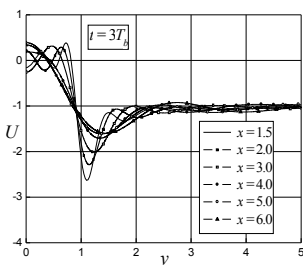
при построении профилей скорости достаточно ограничится построением графиков профилей скорости в первой координатной четверти (см. Рис. 1).

Для горизонтального набегающего потока пространственное распределение профиля горизонтальной компоненты скорости представлено на Рис. 2 для трех характерных моментов времени. При малых временах развития течения влияние сил плавучести мало и представленные на Рис. 2.а. зависимости слабо отличаются от профилей скорости однородной жидкости в центральной области течения, а поле присоединенных внутренних волн на периферии (возникновение противотечений) только начинает формироваться. На временах порядка периода плавучести силу, развившиеся возмущения солёности приводят к преобладанию сил Архимеда над инерцией течения. В результате интенсивность вертикальных движений жидкости снижается, а в областях непосредственно прилегающих к телу (Рис. 2.б, профиль на расстоянии  $x = 1.5, y < 1$ ) скорость течения снижается и становится меньше скорости течения взятой с более удаленного профиля (Рис. 2.б, профиль на расстоянии  $x = 2.0$ ). На больших временах развития течения процесс повторяется для более удаленных профилей (Рис. 2.в), и формируется зона блокировки, т.е. область пространства, где скорость течения совпадает со скоростью движения тела (равна нулю в задачах оттекания).



а

б



в

Рис. 2. Горизонтальный набегающий поток. Пространственная динамика вертикальных профилей горизонтальной компоненты скорости.

Детальный анализ процесса формирования показывает, что внутри заблокированной области течение также носит периодический характер, однако с течением времени увеличивается число пространственных гармоник (угловая часть ряда (41)), вносящих существенный вклад в поле скорости, и скорость в области  $y < 1$  затухает, вследствие их "интерференции". При этом на границе тела  $y \sim 1$  формируется интенсивный сдвиг скорости, величина которого со временем растет. На периферии ( $y > 1$ ) течения образуется область присоединенных внутренних волн, амплитуда которых затухает с расстоянием.

Наглядное представление картины формирования, как области заблокированного течения перед телом, так и высокоградиентных слоев плотности в спутном течении, дают карты полной солёности, приведенные на Рис. 3. В начале движения линии равной солёности, располагавшиеся горизонтально, искажаются в результате взаимодействия потока с препятствием. В то время как перед телом формируется растущая со временем область с пониженным градиентом плотности (область блокировки), позади него изохалины сгущаются, а в областях непосредственно примыкающих к верхней и нижней точкам цилиндра образуются тонкие высокоградиентные прослойки, которые со временем переносятся течением вниз по потоку. Как следует из приведенных выше профилей горизонтальной компоненты скорости формирование высокоградиентных слоев плотности происходит на фоне образования высоких сдвигов скорости. Во внешних областях к зоне бло-



кировки и спутному течению формируется поле внутренних волн двух типов – колончатые моды вверх по потоку и присоединенные внутренние волны вниз по потоку.

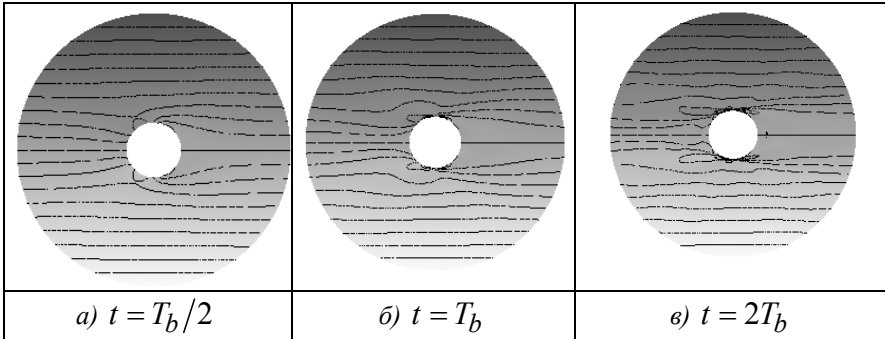


Рис. 3. Горизонтальный набегающий поток. Карты полной солёности

$$\frac{\Delta}{R} S_{\text{полная}} = -y + \frac{U_0}{RN} S, \quad R = 1 \text{ см}, \quad N = 0.785 \text{ рад/с},$$

$$U_0 = 0.3 \text{ см/с}$$

Динамика течения задачи обтекания цилиндра вертикальным набегающим потоком (схема течения приведена на Рис. 1.б) существенно отличается от рассмотренного выше случая горизонтального потока. Возникшие в начальный момент времени значительные возмущения вертикальной компоненты скорости в ближней окрестности тела (Рис. 4.а) с течением времени уменьшаются, и движение жидкости приобретает осциллирующий характер, медленно затухающий по степенному закону. Значительных сдвигов скорости при этом не образуется. Карты полной солёности, приведенные на Рис. 5, показывают, что осциллирующее поведение скорости в окрестности верхней границы цилиндра приводит к периодическому переносу, возникающих на теле возмущений преимущественно в горизонтальном направлении. Отличной динамикой обладает течение в нижней окрестности цилиндра. Поскольку заданный на бесконечности поток набегаёт на цилиндр снизу, а вертикальные движения в стратифицированной жидкости вследствие действия сил плавучести ограничены, то на начальной фазе формирования течения в окрестности нижней части цилиндра происходит концентрация солёности (Рис. 5.а). В последующие моменты времени в соответствии с периодическим характером распространения возмущений в стратифицированной жидкости накопление солёности происходит также периодически. Одновременно под действием сил плавучести происходит распространение интрузионных потоков жидкости в горизонтальном направлении и образование слоев с высокими значениями градиентов солёности (Рис. 5.б, в).

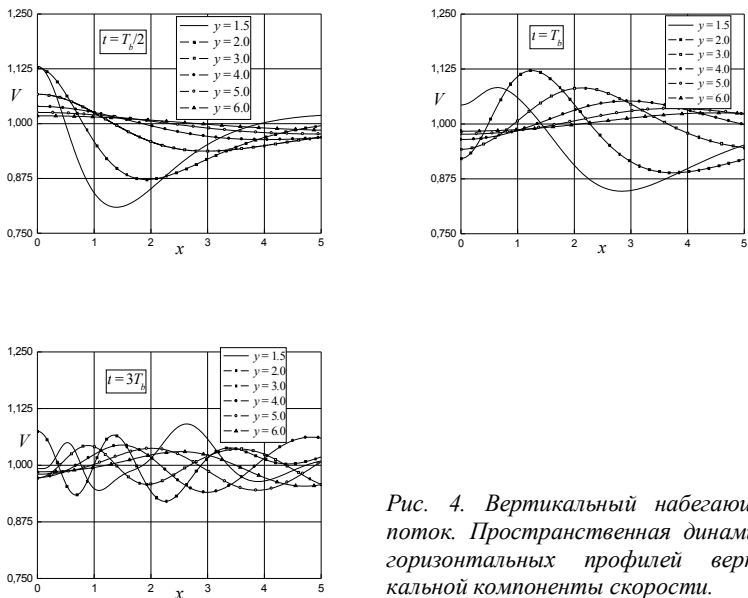


Рис. 4. Вертикальный набегающий поток. Пространственная динамика горизонтальных профилей вертикальной компоненты скорости.

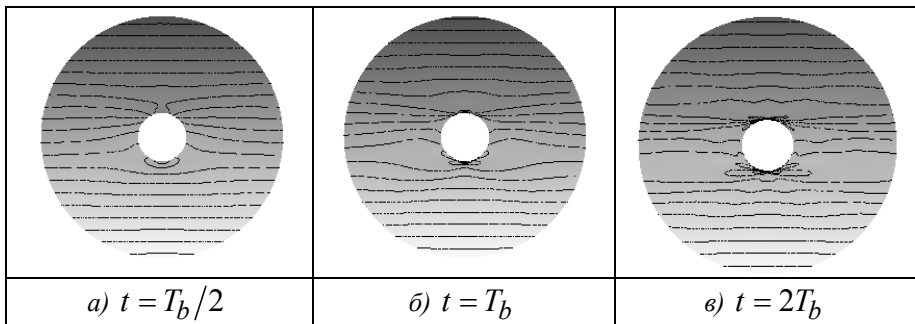


Рис. 5. Вертикальный набегающий поток. Карты полной солёности

$$\frac{\Delta}{R} S_{\text{полная}} = -y + \frac{U_0}{RN} S, \quad R = 1 \text{ см}, \quad N = 0.785 \text{ рад/с}, \\ U_0 = 0.3 \text{ см/с}$$

При этом, в отличие от задачи обтекания цилиндра горизонтальным потоком, значительных сдвигов скорости не образуется. При изменении направления набегающего потока на противоположное в силу симметрии задачи интрузионные те-

чения будут возникать уже вблизи верхней границы цилиндра, а течение в нижней полуплоскости станет гладким.

*Решение задачи формирования поля монохроматических внутренних волн.* Представленная теория расчета задач формирования течений может быть использована и для решения задачи формирования течения при гармоническом законе движения набегающего потока  $\tilde{U}_0(t) = \exp(j\omega t)$  (здесь  $\omega = \omega_0 R/U_0$  – безразмерная частота колебаний). В этом случае обращение образов Лапласа приводит к появлению  $n$ -кратных интегралов от гармонического закона набегающего потока. Тогда с точностью до секулярных членов имеем

$$\int_0^t dt \exp(j\omega t) = (-1)^n \frac{1}{\omega^{2n}} \exp(j\omega t) \quad . \text{Здесь мнимая единица обозначена че-}$$

рез  $j$  для того, чтобы разделить временную часть решения от пространственной, где также используется комплексная форма записи для унификации описания движения в горизонтальном и вертикальном направлениях (30). Таким образом, при осциллирующем набегающем потоке разложение ведётся по параметру  $\varepsilon/\omega$ .

Выражения для интегралов рассчитываются рекуррентно и имеют вид

$$I_{2n} = (-1)^n \frac{1}{\omega^{2n}} \int_0^\tau d\tau \exp(\tau) = (-1)^n \frac{1}{\omega^{2n}} \left( \exp(j\omega t) - \sum_{m=0}^{2n-1} \frac{(j\omega t)^m}{m!} \right),$$

где  $\tau = j\omega t$

В конфигурационном пространстве выражение для функции тока, скоростей течения и возмущения солёности принимают вид

$$\Psi = \left\{ \begin{aligned} & \left( \frac{1}{r} - r \right) e^{i\varphi + j\omega t} + \\ & + \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n \left( \frac{\varepsilon}{2\omega} \right)^{2n} \left( e^{j\omega t} - \sum_{l=0}^{2n-1} \frac{(j\omega t)^l}{l!} \right) \sum_{k=1}^n e^{i(2k+1)\varphi} \sum_{m=0}^k f_{n,k,m} r^{-(2m+1)} \end{aligned} \right\} \quad (42)$$

Чтобы снова перейти к решениям задач для движения тела в горизонтальном и вертикальном направлениях необходимо взять действительные и мнимые части от выражений (41, 42) относительно мнимой единицы  $i$ . Беря в выражении (42) действительные и мнимые части по мнимой единице  $j$ , находим решения задач формирования поля гармонических внутренних волн при движении источника по закону косинуса или синуса.

**Формирование течения, индуцированного диффузией на наклонной**

**плоскости.** В изначально покоящейся (3) линейно стратифицированной жидкости (1) возникает непроницаемая для соли, наклоненная на угол  $\alpha$  к горизонту плоскость (Рис. 7). В приближении Буссинеска задача оказывается инвариантной относительно сдвигов плоскости вдоль самой себя (вдоль оси  $\xi$ ), в результате формирующееся течение оказывается одномерным, а возмущения солёности и скорость зависят только от нормальной к плоскости координаты и времени

$$S = S(\eta, t), \quad \mathbf{V} = U(\eta, t) \cdot \mathbf{e}_\xi \quad (43)$$

Уравнение неразрывности при этом выполняется тождественно, а нелинейные члены в уравнениях обращаются в нуль. Таким образом, решение линейной задачи одновременно является и решением полной нелинейной задачи.

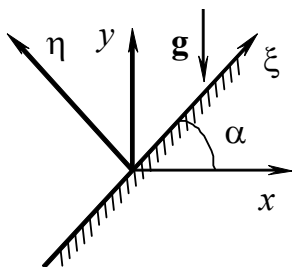


Рис. 7. Наклонная плоскость. Геометрия задачи. Лабораторная  $(x, y)$  и собственная  $(\xi, \eta)$  системы координат

Для конкретизации вида параметров обезразмеривания введенных выше, запишем уравнения движения, граничные и начальные условия в размерном виде

$$\frac{\partial U}{\partial T} = \nu \frac{\partial^2 U}{\partial \eta^2} - gS \sin \alpha, \quad \frac{\partial S}{\partial T} = \kappa \frac{\partial^2 S}{\partial \eta^2} + \frac{1}{\Lambda} U \sin \alpha \quad (44)$$

$$U, S|_{T=0} = 0, \quad U|_{\eta=0} = 0, \quad \frac{\partial S}{\partial \eta}|_{\eta=0} = \frac{1}{\Lambda} \cos \alpha, \quad U, S|_{\eta \rightarrow \infty} \rightarrow 0 \quad (45)$$

Отличие задачи (44, 45) от общей постановки (24, 25) состоит в отсутствии масштаба тела, как следствие уменьшение числа безразмерных комплексов на единицу (комплекс  $R_0 = 0$ ). Тогда выбирая параметры обезразмеривания таким образом, чтобы граничные условия не содержали параметров, получаем

$$\zeta = \sqrt{\frac{N \sin \alpha}{\kappa}} \eta, \quad \varepsilon = \sqrt{\frac{\kappa}{\nu}}, \quad t = NT \sin \alpha, \quad S = \sqrt{\frac{\kappa}{N \sin \alpha}} \frac{\cos \alpha}{\Lambda} s, \\ U = \sqrt{\kappa N \sin \alpha} \text{ctg } \alpha \cdot u \quad (46)$$

В результате задача (44, 45) в безразмерном виде содержит единственный определяющий параметр – число Шмидта

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \frac{1}{\varepsilon^2} \frac{\partial^2 u}{\partial \zeta^2} - s, \quad \frac{\partial s}{\partial t} = \frac{\partial^2 s}{\partial \zeta^2} + u \quad (47)$$

$$u, s|_{t=0} = 0, u|_{\zeta=0} = 0, \frac{\partial s}{\partial \zeta}|_{\zeta=0} = 1, u, s|_{\zeta \rightarrow \infty} \rightarrow 0 \quad (48)$$

Используя преобразования Лапласа, преобразуем уравнения движения к системе ОДУ ( $P$  – параметр преобразования,  $w$  и  $\sigma$  – образы Лапласа для скорости и возмущения солености, соответственно)

$$pw = \frac{1}{\varepsilon^2} w'' - \sigma, p\sigma = \sigma'' + w \quad (49)$$

с граничными условиями

$$w|_{\zeta=0} = 0; \sigma'|_{\zeta=0} = 1/p; w, \sigma|_{\zeta \rightarrow \infty} \rightarrow 0 \quad (50)$$

Используя общее положение о связи временных и пространственных переменных, в пограничном слое сделаем замену

$$\chi = \sqrt{p}\zeta, \sigma = p^{-3/2}h(\chi), w = p^{-5/2}f(\chi) \quad (51)$$

После чего краевые условия больше уже не содержат параметра преобразования Лапласа

$$f|_{\chi=0} = 0, h'|_{\chi=0} = 1, f, h|_{\chi \rightarrow \infty} \rightarrow 0 \quad (52)$$

а зависимость уравнений движения от параметра  $P$

$$h'' - h = -p^{-2}f, \varepsilon^{-2}f'' - f = h \quad (53)$$

указывает на вид представления решения в пространстве образов Лапласа

$$f = \sum_{n=0}^{\infty} p^{-2n} f_n, h = \sum_{n=0}^{\infty} p^{-2n} h_n \quad (54)$$

Подстановка разложений (54) в уравнения движения (53) приводит к системе рекуррентных ОДУ с постоянными коэффициентами второго порядка.

$$h_n'' - h_n = -f_{n-1}, \varepsilon^{-2}f_n'' - f_n = h_n \quad (55)$$

$$h_0'|_{\chi=0} = 1, f_0|_{\chi=0} = 0, h_n'|_{\chi=0} = 0, f_n|_{\chi=0} = 0, n > 0$$

Решение такой системы на каждом шаге содержит две экспоненты, показатели которых определяются кинетическими коэффициентами переноса скорости и солености. Учитывая, что коэффициенты уравнений не содержат в явном виде номера рекуррентной процедуры, решение (55) ищется в виде произведения полиномиальной и экспоненциальной функций

$$f_n = \sum_{k=0}^n \chi^k \left[ f_{n,k}^1 \exp(-\chi) + f_{n,k}^2 \exp(-\varepsilon\chi) \right] \quad (56)$$

$$h_n = \sum_{k=0}^n h_{n,k}^1 \chi^k \exp(-\chi) + \sum_{k=0}^{n-1} h_{n,k}^2 \chi^k \exp(-\varepsilon\chi) \quad (57)$$

В результате решение задачи сводится к числовым рекуррентным соотношениям относительно коэффициентов  $\{h_{n,k}^1, h_{n,k}^2\}$  и  $\{f_{n,k}^1, f_{n,k}^2\}$ . Определяя начальные значения коэффициентов разложения

$$h_{0,0}^1 = -1, f_{0,0}^1 = -\frac{\varepsilon^2}{1-\varepsilon^2}, f_{0,0}^2 = -\frac{\varepsilon^2}{1-\varepsilon^2}$$

Записываем систему рекуррентных уравнений относительно коэффициентов разложений (56, 57)

*Рекуррентные соотношения, следующие из первого уравнения системы (55)*

$$1.a.1. 2nh_{n,n}^1 = f_{n-1,n-1}^1$$

$$1.a.2. k = \overline{1, n-1}: 2kh_{n,k}^1 = (k+1)kh_{n,k+1}^1 + f_{n-1,k-1}^1$$

$$1.b.1. (1-\varepsilon^2)h_{n,n-1}^2 = f_{n-1,n-1}^2$$

$$1.b.2. (1-\varepsilon^2)h_{n,n-2}^2 = -2\varepsilon(n-1)h_{n,n-1}^2 + f_{n-1,n-2}^2$$

$$1.b.3. k = \overline{0, n-3}: (1-\varepsilon^2)h_{n,k}^2 = (k+1)[(k+2)h_{n,k+2}^2 - 2\varepsilon h_{n,k+1}^2] + f_{n-1,k}^2$$

*Рекуррентные соотношения, следующие из второго уравнения системы (55)*

$$2.a.1. (\varepsilon^{-2} - 1)f_{n,n}^1 = h_{n,n}^1$$

$$2.a.2. (1-\varepsilon^2)f_{n,n-1}^1 = 2nf_{n,n}^1 + \varepsilon^2 h_{n,n-1}^1$$

$$2.a.3. (1-\varepsilon^2)f_{n,k}^1 = (k+1)[-(k+2)f_{n,k+2}^1 + 2f_{n,k+1}^1] + \varepsilon^2 h_{n,k}^1, k = \overline{0, n-2}$$

$$2.b.1. 2\varepsilon^{-1}n f_{n,n}^2 = -h_{n,n-1}^2$$

$$2.b.2. 2\varepsilon^{-1}k f_{n,k}^2 = \varepsilon^{-2}(k+1)k f_{n,k+1}^2 - h_{n,k-1}^2, k = \overline{1, n-1}$$

*Рекуррентные соотношения, следующие из крайних условий*

$$3.1. f_{n,0}^2 = -f_{n,0}^1$$

$$3.2.1. h_{1,0}^1 = h_{1,1}^1 - \varepsilon h_{1,0}^2$$

$$3.2.2. h_{n,0}^1 = h_{n,1}^1 + h_{n,1}^2 - \varepsilon h_{n,0}^2$$

Определяя по рекуррентным уравнениям значения коэффициентов разложения и обращая образы Лапласа для скорости и солености, получаем решение задачи (44, 45)

$$s = -2\sqrt{t} i \operatorname{erfc}(Z) + \sum_{n=1}^{\infty} (2\sqrt{t})^{4n+1} \sum_{k=0}^n Z^k \left( h_{n,k}^1 i^{4n-k+1} \operatorname{erfc}(Z) + h_{n,k}^2 i^{4n-k+1} \operatorname{erfc}(\varepsilon Z) \right) \quad (58)$$

$$u = \sum_{n=0}^{\infty} (2\sqrt{t})^{4n+3} \sum_{k=0}^n Z^k \left( f_{n,k}^1 i^{4n-k+3} \operatorname{erfc}(Z) + f_{n,k}^2 i^{4n-k+3} \operatorname{erfc}(\varepsilon Z) \right) \quad (59)$$

где  $Z = \zeta / 2\sqrt{t}$ ,  $h_{n,n}^2 = 0$ , а  $i^n \operatorname{erfc}(z)$  –  $n$ -кратный интеграл вероятности [12].

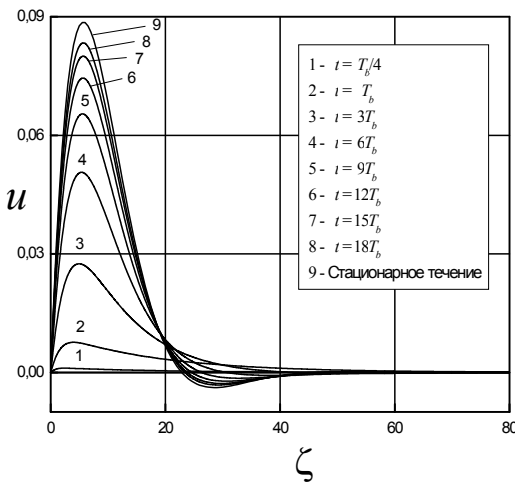


Рис. 8. Эволюция профиля скорости течения, индуцированного диффузией на наклонной плоскости.  $\alpha = \pi / 4$ .

На рис. 8 прослежена эволюция профиля скорости течения, индуцированного диффузией на наклоненной на угол  $45^\circ$  к горизонту плоскости (расчеты проведены для раствора поваренной соли в воде). На начальной фазе развития течения профиль скорости, определяемый с высокой точностью первыми членами ряда (59), знакопостоянен и растет пропорционально  $t^{3/2}$ . При временах превышающих период плавучести действие сил Архимеда приводит к появлению противотечения, темп роста амплитуды скорости замедляется, и профиль скорости монотонно приближается к профилю стационарного течения, полученному в [7]

$$u(\zeta) = \sqrt{2\varepsilon} \exp\left(-\sqrt{\frac{\varepsilon}{2}}\zeta\right) \sin\left(\sqrt{\frac{\varepsilon}{2}}\zeta\right),$$

$$s(\zeta) = -\sqrt{\frac{2}{\varepsilon}} \exp\left(-\sqrt{\frac{\varepsilon}{2}}\zeta\right) \cos\left(\sqrt{\frac{\varepsilon}{2}}\zeta\right).$$

Кроме того, на малых временах масштаб затухания возмущений солености определяется коэффициентом диффузии, а скорости – коэффициентом кинематической вязкости (см., например [9]), в результате пограничный слой распадается на два подслоя плотностной и скоростной. Однако с течением времени происходит согласование масштабов пространственной динамики возмущений различной природы и образуется единый пограничный слой, толщина которого определяется комбинационным масштабом длины ( $l_c = (4\nu\kappa / N^2 \sin^2 \alpha)^{1/4}$ ).

В результате проведенного анализа разработана техника построения точных решений задач формирования течений непрерывно стратифицированной жидкости при движении в ней двумерных тел. На основании предложенного подхода единообразно решаются задачи гидродинамики идеальной и диссипативной среды. Использование данной техники для решения задач формирования течения при обтекании горизонтального цилиндра и течения, индуцированного диффузией на наклонной плоскости, позволили детально проследить динамику течения. В частности показано, что формирование не только области заблокированной жидкости, но и высокоградиентных слоев плотности в спутном течении за горизонтальным цилиндром описываются в рамках модели идеальной жидкости. Следует отметить, что рассмотрение процесса формирования течения вместе с использованием предложенных разложений дают возможность решать и нелинейные задачи теории стратифицированных течений.

*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 08-01-00562).*

### Литература

1. Каменкович В.М. Основы динамики океана. – Л.: Гидрометеиздат. 1973. 240 с.
2. Миропольский Ю.З. Динамика внутренних гравитационных волн в океане. – Л.: Гидрометеиздат, 1981. 302 с.
3. Bretherton F.P. The time-dependent motion due to a cylinder moving in an unbounded rotating or stratified fluid // J. Fluid Mech., 1967, V. 28, Pt 3, P. 545 – 570.
4. Scase M.M., Dalziel S.B. Internal wave fields and drag generated by a translating body in a stratified fluid // J. Fluid Mech., 2004, V. 498, P. 289 – 313.
5. Vosin B. Internal waves generation in uniformly stratified fluids. Part 2. Moving point sources // J. Fluid Mech., 1994, V. 261, P. 333 – 374.
6. Прандтль Л. Гидроаэромеханика. – М.: Изд-во Иностран. Лит. 1949. 520 с.
7. Phillips O.M. On flows induced by diffusion in a stably stratified fluid. // Deep-Sea Res., 1970. V. 17. № 3. P. 435 – 443.
8. Woods A.W. Boundary-driven mixing // J. Fluid Mech., 1991. V. 226. P. 625 – 654.



9. Кистович А.В., Чашечкин Ю.Д. Структура нестационарного пограничного течения на наклонной плоскости в непрерывно стратифицированной среде // ПММ, 1993. Т. 57. Вып. 4. С. 50 – 56.
10. Standing R.G. The Rayleigh problem for a slightly diffusive density-stratified fluid // J. Fluid Mech., 1971. V. 48. Pt. 4. P. 673 – 688.
11. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя. – М.: Наука. ГРФМЛ. 1969. 742 с.
12. Справочник по специальным функциям с формулами, графиками и математическими таблицами / Под ред. М. Абрамовица, И. Стигана. – М.: Наука. 1979. 830 с.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ИСПАРЕНИЯ ЖИДКИХ СПЛАВОВ

Н.М. Барбин, Д.И. Терентьев, А.Б. Борисенко, А.Р. Курочкин,

С.Г. Алексеев, П.С. Попель

*Уральский институт ГПС МЧС России*

### ВВЕДЕНИЕ

Пожары сопровождаются массовым выбросом в атмосферу вредных веществ. Одним из источников данных выбросов является испарение.

До настоящего времени отсутствуют систематические исследования высоко-температурного испарения жидких сплавов в широкой области температур и концентраций легирующих элементов. Экспериментальное изучение испарения жидких сплавов при высоких температурах и давлениях трудоемко, сложно и выполняется со значительными погрешностями.

Для подобного рода исследований целесообразно использовать методы термодинамического моделирования, то есть математического моделирования равновесных состояний в гетерогенных многокомпонентных системах.

Корректность термодинамических расчетов обусловлена подбором такой математической модели, которая максимально приближена к реальной, а также точностью данных по термодинамическим параметрам для всех участвующих компонентов.

В настоящей работе проведено исследование давления паров газовой фазы над расплавами системы Al-Cu и Pb-Bi. Исследование выполнено с использованием методов термодинамического моделирования (ТМ) программного комплекса TERRA и модели идеального раствора продуктов взаимодействия (ИРПВ) [1]. Моделирование проводили в исходной среде аргона при общем давлении 105Па. Исследовалась область температур до 4000К. При моделировании учитывались термодинамические свойства чистых веществ и соединений в газообразном и конденсированном состоянии.

Исследованы концентрационные зависимости давления паров над расплавами.

### МЕТОДИКА

Термодинамическое моделирование (ТДМ) заключается в термодинамическом анализе равновесного состояния систем в целом (полный термодинамический анализ).

Расчет термодинамического равновесия произвольных систем (определение всех параметров, термодинамических свойств, химического и фазового состава) осуществляется максимизацией энтропии системы при учете всех потенциально возможных в равновесии индивидуальных веществ. Расчетные методы развиты на основе вариационных принципов термодинамики.

Из всех допустимых значений молей индивидуальных веществ в термодинамической системе те из них, которые минимизируют термодинамический потенциал системы, соответствуют равновесным значениям;

Из всех допустимых значений энергии, вносимой каждым независимым компонентом (атомом), те из них, которые максимизируют суммарный вклад энергии отдельных атомов в систему, соответствуют равновесным значениям.

Экстенсивными термодинамическими параметрами системы, т.е. пропорциональными количеству или массе вещества в системе, являются объем  $V$ , энтропия  $S$ , внутренняя энергия  $U$ , энтальпия  $H$ , энергия Гельмгольца  $F$  ( $F = U - TS$ ), энергия Гиббса  $G$  ( $G = H - TS$ ); интенсивными термодинамическими параметрами, т.е. не зависящими от количества или массы системы, являются давление  $P$ , термодинамическая температура  $T$ , концентрация, молярные и удельные термодинамические величины.

Для того чтобы представить в явном виде любую термодинамическую систему следует задать два независимых параметра из числа  $V, S, U, H, P, T, F, G$  и полный исходный химический состав системы. При этом каждая пара независимых параметров будет определять характеристическую функцию - «функцию состояния термодинамической системы соответствующих термодинамических параметров, характеризующуюся тем, что посредством этой функции и производных ее по этим параметрам могут быть выражены в явном виде все термодинамические свойства системы».

Критерием достижения системой равновесного состояния является экстремум ее характеристической функции. При независимых параметрах  $P$  и  $T$  характеристической функцией является свободная энергия Гиббса  $G$ , а минимум этой энергии системы ( $G_{\min}$ ) является критерием достижения равновесного состояния; при параметрах  $U$  и  $V$  для изолированной системы характеристической функцией является энтропия  $S$ , а максимум энтропии системы  $S_{\max}$  является критерием достижения равновесного состояния.

При создании алгоритма расчета в данном программном комплексе приняты следующие допущения математической модели:

- рассматриваются закрытые и изолированные термодинамические системы, в которых границы непроницаемы для обмена веществом, теплом и работой с окружающей средой;
- анализируются системы в состоянии внешнего и внутреннего термодинамического равновесия (полного или локального);
- считается, что исследуемая система является гетерогенной, состоящей из нескольких однородных частей (фаз), отделенных видимыми границами;
- присутствие газовой фазы в системе обязательно;

- все газообразные индивидуальные вещества (атомы, молекулы, атомарные и молекулярные ионы, электронный газ) входят в состав одной газовой фазы;
- газовая фаза описывается уравнением состояния идеального газа;
- поверхностные эффекты на границе раздела фаз не учитываются, растворимость газов в конденсированных (жидких и твердых) фазах отсутствует; конденсированные вещества могут отсутствовать;
- конденсированные вещества образуют однокомпонентные несмешивающиеся фазы либо включаются в состав идеальных конденсированных растворов;
- индивидуальные вещества, имеющие одинаковую химическую формулу, но входящие в различные фазы, считаются разными компонентами;
- вещества с одинаковой химической формулой, находящиеся в различных полиморфных модификациях, кристаллическом или жидком состоянии, рассматриваются как один компонент, у которого изменение свойств происходит скачкообразно при температурах превращений;
- объем конденсированных компонентов пренебрежимо мал.

Равновесие подобных систем в соответствии со вторым законом термодинамики характеризуется максимумом энтропии относительно термодинамических степеней свободы, к числу которых относятся концентрации компонентов равновесной смеси ( $M_q$ , моль/кг), температура  $T$  и давление  $P$ .

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

### Система Pb-Bi.

Моделирование проводили в среде аргона при общем давлении  $10^5$  Па. Исследования выполнялись в температурном интервале от 500 до 3000 К при содержании Pb в системе Pb-Bi от 0,1 до 0,9. При моделировании учитывались термодинамические свойства чистых веществ: и соединений: газообразные Pb, Bi, Pb<sub>2</sub>, Bi<sub>2</sub>, Bi<sub>3</sub>, Bi<sub>4</sub>, Ag; конденсированные Bi, Pb, PbBi, PbBi<sub>7</sub>, Pb<sub>3</sub>Bi, Pb<sub>3</sub>Bi<sub>4</sub>, Pb<sub>3</sub>Bi<sub>5</sub>, Pb<sub>3</sub>Bi<sub>7</sub>.

Получены концентрационные зависимости давления паров компонентов газовой фазы Bi, Pb, Pb<sub>2</sub>, Bi<sub>2</sub>, Bi<sub>3</sub>, Bi<sub>4</sub> над расплавами Pb-Bi.

На рис.1 показана температурная зависимость логарифма парциальных давлений компонентов газовой фазы, образующейся при нагревании системы Pb-Bi (1:1). Парциальные давления всех компонентов пара растут в температурном интервале от 600 до 1700 К. Давление пара Pb и Bi при температуре больше 1800 К практически не меняется (весь металл испарился). В температурном интервале от 1700 до 3000 К происходит уменьшение давления паров Pb<sub>2</sub>, Bi<sub>2</sub>, Bi<sub>3</sub>, Bi<sub>4</sub> вследствие диссоциации молекул.

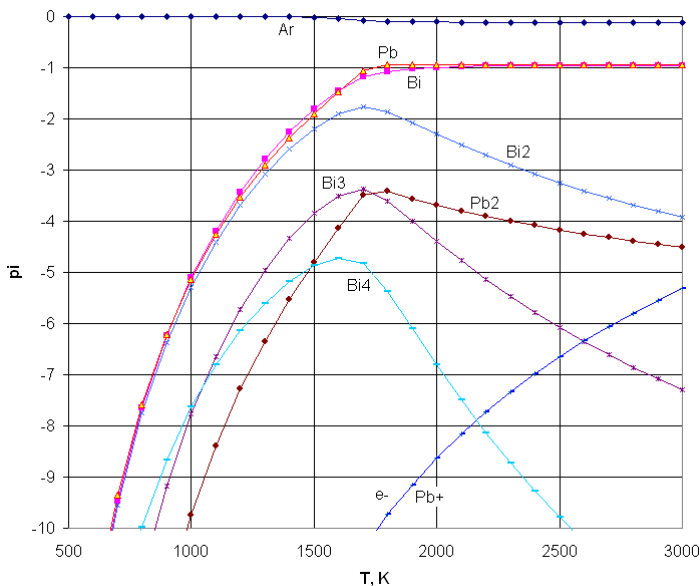


Рис. 1. Состав газовой фазы в системе Pb-Bi (1:1).

#### Система Al-Cu.

Моделирование проводили в среде аргона при общем давлении  $10^5$  Па. Исследования выполнялись в температурном интервале от 1400 до 3000 К при содержании Cu-Al от 0,1 до 0,9. При моделировании учитывались термодинамические свойства чистых веществ и соединений: газообразные Al, Al<sub>2</sub>, Cu, Cu<sub>2</sub>, Al<sup>+</sup>, Cu<sup>+</sup>, e<sup>-</sup>, Ar; конденсированные Al, Cu, CuAl<sub>2</sub>, Cu<sub>2</sub>Al<sub>3</sub>, Cu<sub>3</sub>Al, Cu<sub>4</sub>Al, Cu<sub>9</sub>Al<sub>4</sub>.

Получены концентрационные зависимости давления паров компонентов газовой фазы (Al, Al<sub>2</sub>, Cu, Cu<sub>2</sub>, Al<sup>+</sup>, Cu<sup>+</sup>, e<sup>-</sup>, Ar) над расплавами Cu-Al. Установлено, что с увеличением содержания Cu в системе Cu-Al давление паров Cu, Cu<sub>2</sub>, Cu<sup>+</sup> растет, а давление Al, Al<sub>2</sub>, Al<sup>+</sup> падает. С ростом температуры от 1400 до 2500 К давление паров компонентов растет во всем концентрационном интервале. Зависимости  $\lg(P_i, \text{мПа}) = f(1/T)$  являются для всех компонентов линейными и описываются уравнением  $\lg P_i = A + B/T$ .

На рис.2 показана температурная зависимость логарифма парциальных давлений компонентов газовой фазы, образующейся при нагревании системы Al-Cu (1:1). Парциальные давления всех компонентов пара растут в температурном интервале от 1400 до 2700 К. Давление пара Al и Cu при температуре больше 2700 К практически не меняется, а давление пара Al<sub>2</sub> и Cu<sub>2</sub> уменьшается вследствие диссоциации молекул.

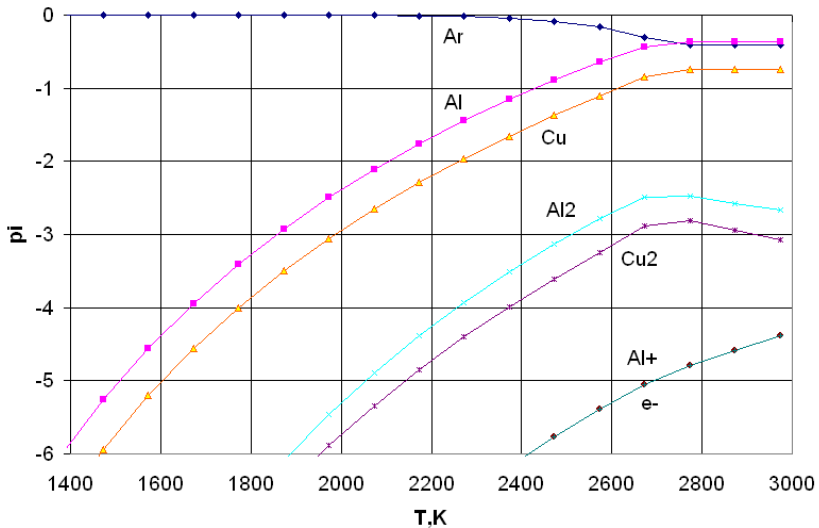


Рис.2. Состав газовой фазы в системе Al-Cu (1:1).

### Литература

1. Г.К. Моисеев, Г.П. Вяткин, Н.М. Барбин. Применение термодинамического моделирования для изучения взаимодействий с участием расплавов. Челябинск. Изд-во ЮУрГУ. 2002.

УДК 551.35

## ВОЗРАСТАНИЕ СРЕДНЕГО ГЛОБАЛЬНОГО УРОВНЯ ОКЕАНА И СРЕДНИХ УРОВНЕЙ ОКЕАНА В СЕВЕРНОМ И ЮЖНОМ ПОЛУШАРИЯХ ЗЕМЛИ В СОВРЕМЕННУЮ ЭПОХУ

Посвящается 300-летию со дня  
рождения М.В. Ломоносова

Ю.В. Баркин

*Государственный астрономический институт им.П.К. Штернберга*

Решена задача о возрастании среднего глобального уровня океана в современную эпоху. Дано объяснение явлению контрастного векового изменения средних уровней океана в северном и южном полушариях, предсказанному ранее автором на основе наблюдаемого векового тренда центра масс Земли в северном направлении со скоростью 5-6 мм/год.

## Введение

Смещение притягивающего центра Земли порождает медленный вековой прилив океанических и атмосферных масс из южного полушария в северное. Анализ асимметричного расположения континентов по отношению к северному и южному полушариям Земли, деформационных изменений поверхности Земли, устанавливаемым по спутниковым GPS наблюдением, и современных тепловых факторов увеличения объема океана и его теплового расширения позволил объяснить наблюдаемое возрастание среднего глобального уровня океана и выявить контрастное изменение его средних уровней в северном и южном полушариях. В северном полушарии Земли средний уровень океана возрастает со скоростью около  $2.45 \pm 0.32$  мм/год, а в южном полушарии средний уровень океана возрастает со средней скоростью  $0.67 \pm 0.30$  мм/год. Теоретическое значение скорости нарастания глобального уровня океана составляет  $1.61 \pm 0.36$  мм/год. Это значение хорошо согласуется с современными определениями этой характеристики из наблюдений на береговых приливных станциях. Выявленный асимметричный прилив по направлению юг-север также получил четкое подтверждение в современных наблюдениях на береговых приливных станциях в последние примерно 30 лет.

## 1. О решении фундаментальных проблем геодинамики, небесной механики и геофизики на основе решения задачи М.В. Ломоносова “о возможных смещениях притягивающего центра Земли”.

На возможность существования смещений центра масс Земли по отношению к ее поверхности впервые обратил внимание М.В. Ломоносов. Эти смещения могли бы быть “подмечены” показаниями специальных маятниковых приборов – гравиметров. М.В. Ломоносов фактически сформулировал обратную задачу гравиметрии – об определении возможных смещений центра масс планеты по показаниям гравиметрических приборов. Позднее ученые гравиметристы не раз обращали внимание на существование возможных смещений центра масс Земли и их отражений в показаниях гравиметров, однако существенного прогресса в решении фундаментальной проблемы достигнуто не было.

Полярный дрейф центра масс Земли к северу со скоростью около 1-2 см/год был теоретически предсказан автором в 1995 г. и в последствии получил подтверждение в спутниковых наблюдениях методами космической геодезии. В данной работе наблюдаемый вековой дрейф центра масс Земли принимается как данный эмпирический факт. Более точно направление дрейфа (по направлению к полуострову Таймыр) также было предсказано автором теоретически в результате анализа направленного перераспределения масс Земли, соответствующего смещению центра масс Земли, при объяснении неприливного ускорения ее осевого вращения и векового дрейфа полюса Земли.

Открытое явление дрейфа центра масс фактически дает ответ на вопрос, сформулированный М.В. Ломоносовым, о реальности смещения притягивающего центра Земли. С другой стороны на основе этого явления и специально разработанной нами геодинамической модели были решены фундаментальные проблемы геодинамики и небесной механики, геофизики и геологии, будоражившие научное сообщество в течении последних десятилетий и даже веков.

В цикле работ данного направления получили объяснение фундаментальные явления во вращении Земли: вековой дрейф полюса ее оси вращения и неприливное ускорение осевого вращения планеты. Объяснены наблюдаемые вековые вариации силы тяжести, коэффициентов геопотенциала, вековой дрейф центра масс Земли, геодезические изменения Земли в современную эпоху и др. В данной работе получили объяснение вековые изменения глобального уровня океана и изменения средних уровней океана в северном и южном полушариях Земли. Показано, что существует единый механизм для многих тел солнечной системы возбуждения природных процессов в их полярных областях. В частности показано, что полярные регионы многих небесных тел являются флюидонасыщенными, причем концентрация флюидов является асимметричной по отношению к северному и южному полушариям. Последнее положение получает четкие подтверждения в современных исследованиях грунтовых вод и водного льда на Марсе, Луне, Меркурии и др. телах солнечной системы (с помощью водородных детекторов).

Данная работа направлена на исследование глобального (планетарного) поведения и взаимодействия атмосферы и океана Земли с учетом векового дрейфа центра масс планеты и посвящена решению одной из труднейших задач естествознания – о вековом нарастании уровня океана, над которой научная общественность бьется около трехсот лет.

**2. Тренд центра масс.** Вековой тренд центра масс Земли по направлению к северному полюсу со скоростью около **12-20** мм/год был предсказан автором в 1995 [1], [2] и в настоящее время подтвержден данными космической геодезии. Например, данные наблюдений спутниковой системы DORIS в период 1999-2008 позволили нам получить оценку скорости полярного дрейфа центра в **5.24±0.29** мм/год [3]. Оказывается, что все имеющиеся данные о современных медленных перераспределениях поверхностных масс Земли не позволяют объяснить указанное фундаментальное планетарное явление. Это послужило сигналом для ряда западных ученых к отказу от самого явления, что привело в дальнейшем к жесткой кризисной ситуации в целом ряде наук о Земле, включая современную климатологию. Однако, дрейф центра масс легко объясняется, если допустить, что аналогичный дрейф примерно в том же направлении совершает центр масс ядра Земли относительно центра масс вязко-упругой мантии (или всей Земли). Мы допускаем, что указанные смещения возможны благодаря вязко-упругим, диссипативным и термодинамическим свойствам пограничного слоя между ядром и мантией Земли. Для объяснения дрейфа центра масс Земли достаточно предположить, что центр масс ядра Земли смещается со скоростью **2-3** см/год [4]. Указанные смещения имеют вынужденный характер и совершаются под гравитационным воздействием внешних небесных тел и в силу неинерциальных свойств относительных смещений оболочек Земли. В данной работе мы не останавливаемся на детальном изучении механизма векового дрейфа центра масс, а принимаем его как данный эмпирический факт. Наша задача – изучить геодинамические следствия дрейфа центра масс Земли. В частности его влияние на планетарное поведение океана, как на его глобальный средний уровень, так и на средние уровни океана в северном и южном полушариях. Полярный дрейф ядра с его колоссальной избыточной массой, обусловленной разницей средней плотности

жидкого ядра и плотности при подошве мантии. Эта масса составляет около 17 масс Луны и приводит в частности к нарастанию силы тяжести в северном полушарии со скоростью около  $1 \mu\text{Гал/год}$  и к убыванию (примерно с такой же по величине скоростью) в южном полушарии [5]. Эти выводы уже получили подтверждения в высокоточных гравиметрических наблюдениях последних (5 – 15) лет [6]. Естественно, что дрейф центра масс Земли (а по нашей геодинамической модели – дрейф центра масс ядра относительно центра масс мантии) приводит к дополнительным гравитационным воздействиям на все слои упругой мантии, а точнее к инверсионным изменениям их напряженных состояний, когда в одной полушфере (северной) эти напряжения возрастают, а в противоположной (южной) убывают. При этом, возможно, эффективно работает термодинамический инверсионный механизм плавления и затвердевания материала на границе ядро-мантия с контрастными (противоположными) тенденциями в северном и южном полушариях [7].

**3. Атмосферный и океанический инверсионный приливы.** Смещающийся к северу центр масс своим гравитационным притяжением увлекает все флюидные массы (в первую очередь океанические и атмосферные) смещаться из южного полушария в северное. С позиций геодинамической модели указанное перераспределение масс осуществляется гравитационным притяжением дрейфующим к северу ядром. Именно ядро наводит инверсионный прилив атмосферных и океанических масс из южного полушария в северное полушарие [8]. По нашим теоретическим оценкам среднее атмосферное давление в северном полушарии возрастает со скоростью около **0.17 мбар/год**, а в южном полушарии среднее атмосферное давление наоборот – убывает примерно с такой же скоростью. Выполненные оценки имеют предварительный характер, но они уже получили четкие подтверждения в данных современных метеорологических наблюдений в период 1.4. 2002 - 1.4. 2005 [9]: **0.17-0.22 мбар/год** (северное полушарие) и **-0.18 мбар/год** (южное полушарие). Современные данные спутниковой альтиметрии за период 1993-2007 гг. также подтвердили контрастный характер изменений средних глобальных уровней в северном и южном полушариях Земли [10] – [12]. Более того было показано, при устранении ошибок и неправильной интерпретации данных альтиметрических наблюдений уровня океана, теоретические оценки скоростей нарастания средних уровней океана в северном и южном полушариях совпали с “скорректированными” альтиметрическими оценками.

**4. Контрастные изменения средних уровней океана в северном и южном полушариях.** Воздушные массы медленно транспортируются из южного полушария в северное полушарие. Они формируют оригинальный инверсионный вековой атмосферный прилив, существование и организация которого уже подтверждаются данными современных наблюдений [8], [9]. Гравитационное влияние смещающегося центра масс (или точнее сказать, гравитационное притяжение дрейфующего ядра Земли) вызывает аналогичный по своим свойствам океанический прилив [5], [11]. Барометрический эффект перераспределяемых атмосферных масс приводит к уменьшению океанического прилива. Действительно, возрастание среднего атмосферного давления в северном



полушарии приведет к частичному вытеснению океанических масс в южное полушарие. Только по одной этой причине (по рассматриваемой модели) средний уровень океана в северном полушарии уменьшается со скоростью  $-1.98$  мм/год. В свою очередь убывание среднего атмосферного давления в южном полушарии приводит к возрастанию среднего уровня океана в южном полушарии со скоростью  $1.43$  мм/год. Предварительные оценки показали, что океанический инверсионный прилив, обусловленный гравитационным притяжением дрейфующего ядра, дает основной вклад в явление векового изменения средних уровней северного и южного полушарий (в северном полушарии средний уровень океана возрастает со скоростью  $3.01 \pm 0.17$  мм/год, а в южном полушарии средний уровень океана убывает со скоростью  $-2.18 \pm 0.12$  мм/год). Подчеркнем, что здесь речь идет отдельно о океаническом приливе (без учета атмосферного влияния).

На уровень океана оказывают влияния также деформации его дна. Мы сделали первые оценки этого трудно-учитываемого эффекта. Указанное тектоническое явление связано с глобальными (планетарными) деформациями Земли и изменениями ее фигуры, с изменениями формы полушарий Земли в современную эпоху. Последние были оценены на основе геодинамической модели вынужденных относительных колебаний и дрейфа ядра Земли по отношению к упругой мантии [5] и получили подтверждение по данным спутниковых наблюдений методами космической геодезии [11]. На основе этих результатов была получена оценка скорости нарастания глобального уровня океана только за счет деформации дна  $0.55 \pm 0.26$  мм/год. Выполненный анализ показал, что тепловые факторы играют существенную роль в вековом изменении уровня океана. Здесь мы используем современные данные, которые свидетельствуют, что прогревание океана и его расширение в совокупности с таянием ледников и другими поступлениями вод в океан приводят к нарастанию среднего глобального уровня океана со скоростью около  $0.83$  мм/год [12], [13]. Суммируя все рассмотренные факторы нарастания среднего уровня океана, мы приходим к важному заключению. В северном полушарии средний уровень океана возрастает со скоростью около  $2.45 \pm 0.32$  мм/год, а в южном полушарии лишь со скоростью около  $0.67 \pm 0.30$  мм/год. Этот результат уже получил ясное подтверждение в данных наблюдений за уровнем океана на береговых станциях в последние примерно 30 лет [14]. Тем самым получает подтверждение сам южно-северный океанический прилив [11]. Соответствующее теоретическое значение скорости нарастания среднего глобального уровня океана составляет  $1.61 \pm 0.36$  мм/год и хорошо согласуется с данными береговых наблюдений.

**5. Широкая зависимость изменения среднего уровня океана.** В силу специфики океанического инверсионного векового прилива должна наблюдаться зависимость скорости нарастания океанического прилива юг-север от широты. Теоретическая зависимость этой скорости представлена кривой на рис. 1 и хорошо подтверждается данными береговых наблюдений за изменением уровня океана в последние примерно 30 лет для достаточно крупных регионов мирового океана, указанных на рис. 2.

Научные результаты, представленные в статье, решают одну из фундаментальных проблем геофизики и геодинамики, насчитывающую почти 3х-вековую историю – вековое нарастание среднего глобального уровня океана.

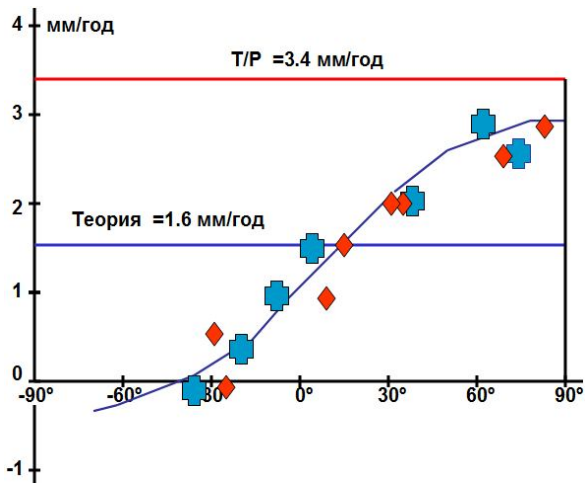


Рис. 1. Теоретическая кривая зависимости скорости нарастания уровня океана в зависимости от широты в сравнении с наблюдаемыми значениями для регионов мирового океана (отмечены крестиками и ромбиками).

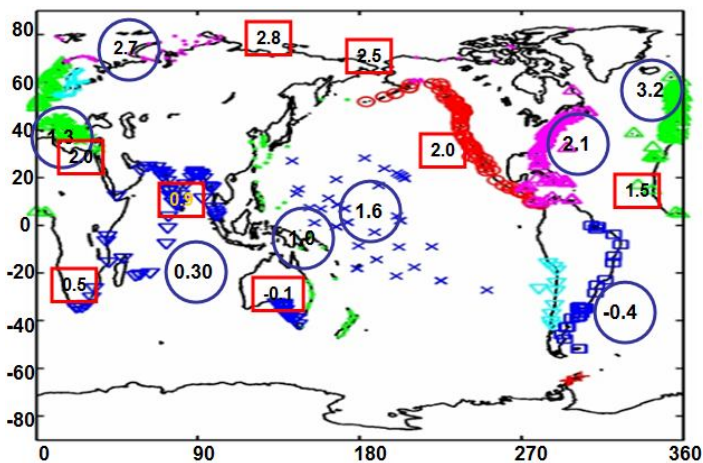


Рис. 2. Регионы океана, для которых использовались оценки средних скоростей изменения уровня океана. Значения скоростей указаны внутри кружков и квадратиков, которые соответствуют условным центрам указанных регионов океана. По результатам работы [14].

Более того, полученные результаты описывают новые и более тонкие эффекты планетарного поведения океана, а именно, асимметрию и инверсию в медленном нарастании уровня океана по отношению к северному и южному полушариям

Земли. Показано, что береговые измерения и правильно интерпретируемые альтиметрические измерения (с учетом векового дрейфа центра масс) дают примерно один и тот же результат – средний глобальный уровень океана в последние два-три десятилетия возрастал со скоростью около 1.6 мм/год. Вековой дрейф центра масс Земли к северу по отношению к базовой земной системе координат данной эпохи, задаваемой системой GPS станций порождает вековой океанический (и атмосферный) прилив по направлению юг-север, который и определяет наблюдаемое береговыми методами явление контрастного (с существенно разными скоростями) векового изменения средних уровней океана в северном и южном полушариях

Фактические параметры скорости нарастания уровня океана получены в п. 4 данной работы: скорость нарастания среднего глобального уровня океана составляет  $1.61 \pm 0.36$  мм/год, в северном полушарии средней уровень океана возрастает со скоростью около  $2.45 \pm 0.32$  мм/год, а в южном полушарии лишь со скоростью около  $0.67 \pm 0.30$  мм/год. Эти результаты хорошо согласуются с данными береговых измерений (рис. 2). С другой стороны здесь получает подтверждение сам вековой южно-северный прилив в современную эпоху [5, 11] и, что для нас наиболее важно, подтверждается сама геодинамическая концепция о вынужденных относительных смещениях оболочек планеты под действием гравитационного притяжения внешних небесных тел, развиваемая автором и имеющая несравненно большее значение для разносторонних исследований в геодинамике, планетодинамике и других науках [15].

Этот механизм направляет и определяет еще более фундаментальные явления трансгрессии, регрессии и планетарной инверсии океана в геологической шкале времени [10]. Фактически описанные здесь современные тенденции в поведении и изменениях уровня океана – это своеобразная “ниточка - хвостик” от гораздо более мощной трансгрессии океана в северном полушарии, которая медленно развивается в настоящее время, но уже с исключительно большими изменениями уровня океана до десятков и сотен метров за тысячи и сотни тысяч лет (в частности с циклами Миланковича).

### Литература

[1] Баркин Ю.В. О движении центра масс Земли, обусловленном глобальным изменением ее динамического строения и приливными деформациями //Вестник Моск. гос. ун-та. Сер. 3 Физ., Астрон. 1995. **36**, № 5, С. 99.

[2] Barkin Yu.V. About possible polar drifts of centers of mass of the Earth and Mars //Abstract Book (CD) of European Planetary Science Congress (Potsdam, Germany, 13 – 18 September 2009). 2009. 4, EPSC 2009-118.

[3] Zotov L.V., Barkin Yu.V., Lubushin A.A. Geocenter motion and its geodynamical content. “Space Geodynamics and Modeling of the Global Geodynamic Processes”, Novosibirsk, Russian Federation, 22-26 September, 2008; Russian Academy of Sciences, Trofimuk Inst. Of Petrol. Geol. And Geophys., SB RAS. – Novosibirsk: Academic Publishing House “Geo”. 2009. P. 98.

[4] Баркин Ю.В. Вековой полярный дрейф ядра в современную эпоху: геодинамические и геофизические следствия и подтверждения //Общие и региональные проблемы тектоники и геодинамики. Материалы XLI Тектонического совещания. Том 1. –М.: ГЕОС. 2008. С. 55-59.

[5] Баркин Ю.В. Колебания ядра Земли, новые океанические приливы и динамические следствия // Материалы XI Международной конференции «Строение, геодинамика и минералогические процессы в литосфере» (г. Сыктывкар, 20 по 22 сентября 2005 г.), Изд-во Института геологии Коми НЦ УрО РАН, Сыктывкар. 2005. С. 26-28.

[6] Баркин Ю.В. Объяснение вековых вариаций силы тяжести на станциях Нью-Йорк-Олесунн, Медисина, Черчилл и Сайова // Материалы Международной Конференции: «Пятые научные чтения Ю.П. Булашевца. Глубинное строение. Геодинамика. Тепловое поле Земли. Интерпретация геофизических полей» (Екатеринбург, 6 - 10 июля 2009 г.). 2009. С. 27-31.

[7] Barkin Yu.V. The mechanism of translational displacements of the core of the Earth at inversion molten and solidification of substance at core-mantle-boundary in opposite hemispheres // EGU General Assembly (Vienna, Austria, 19-24 April 2009). Geophysical Research Abstracts. 2009. V. **11**, abstract # EGU2009-6241.

[8] Barkin Yu.V. Forced redistribution of air masses between southern and northern hemispheres of the Earth // Proceedings of IUGG XXIV General Assembly, Perugia, Italy 2007: Earth: Our Changing Planet (Perugia, Italy, July 2-13, 2007), (A)-IAGA, JAS008. 2007. P. 326. [www.iugg2007perugia.it](http://www.iugg2007perugia.it).

[9] Burlutsky R.F. Determination of the global concentration of pair on the ground pressure // Materials of Sagitov's conference. M., SAI, MSU. 2007, [www.sai.msu.ru](http://www.sai.msu.ru).

[10] Баркин Ю.В. Механизм планетарных деформаций дна океана и явления регрессии, трансгрессии и инверсии уровня океана в геологической истории // «Геология морей и океанов: Материалы XVII Международной научной конференции (школы) по морской геологии». Т.IV. М.: ГЕОС. 2007. С. 188-191.

[11] Barkin Yu.V. Prediction and explanation of mean sea levels in northern hemisphere, in southern hemisphere and all ocean of the Earth. EGU General Assembly (Vienna, Austria, 19-24 April 2009). Geophysical Research Abstracts. 2009. V. **11**, abstract # EGU2009-1610.

[12] Баркин Ю.В. Предсказание ошибочных альтиметрических и объяснение наблюдаемых береговых скоростей нарастания глобального среднего уровня океана и средних уровней океана в северном и южном полушариях. «Геология морей и океанов: Материалы XVII Международной научной конференции (школы) по морской геологии». Т.V. - М.: ГЕОС. 2009. С. 183-187.

[13] Barkin Yu.V. Mechanisms of the mean global sea level rise and solution of "attribution problem" // Proceedings of IUGG XXIV General Assembly, Perugia, Italy 2007: Earth: Our Changing Planet (Perugia, Italy, July 2-13, 2007), (G)-IAG, JGS002. 2007. P. 483. [www.iugg2007perugia.it](http://www.iugg2007perugia.it).

[14] Jevreeva S., Grinsted A., Moore J.C., Holgate S. Nonlinear trends and multiyear cycles in sea level records // Journal Geophysical Research, 2006, V. 111, C09012, doi: 10.1029/2005JC003229, 2006.

[15] Баркин Ю.В. (2002) Объяснение эндогенной активности планет и спутников и ее цикличности. Известия секции наук о Земле Российской академии естественных наук. М., ВИНТИ. Вып. 9. С. 45-97.

## ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ СТИМУЛЫ РАЗВИТИЯ ВОЗОбновляемой ЭНЕРГЕТИКИ

М.Ю. Берёзкин

*Московский Государственный Университет имени М.В.Ломоносова**Географический факультет*

Распространение инновационных технологий и экологизация, безусловно, является приоритетными направлениями современного мирового развития энергетики. Под воздействием инновационных процессов начиная с начала 1980-х годов наметилась тенденция прекращения роста энергопотребления на душу населения в развитых странах. В последнее 30-летие душевое энергопотребление в них оставалось практически неизменным, а в новых индустриальных странах, напротив, отмечается увеличение подушного потребления энергии. Подобная тенденция отражает характерные черты развивающегося постиндустриального общества, которое характеризуется ростом и распространением информационных технологий, снижением энергопотребления и ресурсоемкости в отраслях материального производства. В отличие от индустриальной экономики новые технологические решения не требуют таких же количеств невозобновляемых природных ресурсов и энергии.

В отношении базового энергоносителя для постиндустриальной экономики сложилась уникальная ситуация, отличная от аналогичных переходных процессов при смене технологических укладов в индустриальной экономике, где происходило плавное замещение одного энергоресурса другим, качественно лучшим. Как известно, каждому технологическому укладу в терминах циклов Кондратьева соответствует свой базовый энергоноситель [3]. Исторически, для 1-го технологического уклада им являлась энергия воды и ветра, для 2-го и 3-го – уголь, для 4-го – нефть.

Что касается 5-го технологического уклада, то еще в 1970-е годы преобладало оптимистичное мнение о скором замещении нефти ядерной энергией, демонстрирующей тогда быстрый экспоненциальный рост. Ядерная энергетика претендовала на роль базовой инновации в новом технологическом укладе. Но известные трагические события с авариями на атомных электростанциях выявили реальные риски и несовершенство ядерных энергетических технологий. Атомная энергетика не стала базовой энергетической технологией. Сейчас в странах-лидерах ядерной энергетике работают над реализацией концепции безопасной эксплуатации атомных электростанций нового поколения. Однако промышленное внедрение их вряд ли возможно в ближайшей перспективе. Поэтому основным фактором формирования современного мирового энергетического пространства все же остается природный газ. Благодаря высокой экономической эффективности и относительной экологичности, природный газ продолжает замещать нефть и уголь в энергетическом балансе мира.

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

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

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

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

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

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

Основным экологическим стимулом развития возобновляемой энергетики в настоящее время стал Киотский протокол, основная цель которого - снижение на 5% выбросов парниковых газов к 2012 году, а также создание глобального углеродного рынка. Для пост-Киотского процесса высказываются следующие уровни порядка 20% к 2020 году и 50% к 2050 году.

В 2008 году оборот мирового углеродного рынка увеличился по сравнению с предыдущим, 2007 годом в 2,3 раза и составил 92 млрд. евро. Наибольшая доля рынка (примерно 75%) приходится на страны ЕС, где реализована так называемая Европейская схема торговли выбросами парниковых газов. В рамках схемы круп-

ным компаниям-эмитентам устанавливаются определенные квоты (разрешения) на их выбросы и предоставляется право торговать ими без ограничения. По итогам года разрешения на выбросы парниковых газов изымаются в зависимости от количества фактически произведенных выбросов за год и погашаются. За выбросы, не обеспеченные разрешениями, взимается штраф в размере 100 евро за тонну CO<sub>2</sub>.

Наряду с квотами на выбросы парниковых газов на углеродном рынке представлены и другие углеродные единицы. Компания, осуществляющая проект, который позволяет сократить выбросы парниковых газов, может оформить и утвердить этот проект в установленном порядке для целей Киотского протокола и получать оплату за достигнутые сокращения выбросов в течение определенного периода времени.

Механизм чистого развития (МЧР) предназначен для проектов, реализуемых в развивающихся странах, которые не имеют количественных обязательств по ограничению и сокращению выбросов парниковых газов (это Индия, Китай, Бразилия и т.д.). Механизм получивший название «совместное осуществление» (СО) реализуются в странах, имеющих обязательства по выбросам парниковых газов - это развитые страны Евросоюза, Россия, Украина, Австралия, Япония, Швейцария и др.

В реализации Киотского протокола основная роль отводится возобновляемой энергетике. Энергетика (включая использование энергии на транспорте) дает около 80% выбросов парниковых газов. И именно в этом секторе сосредоточен основной потенциал по сокращению их выбросов. Задача стоит в кардинальном изменении структуры современной энергетики в низкоуглеродном направлении, в уходе от принципа «палео-топлива – палео-климат». Большая часть проектов в рамках Киотского протокола заключается во вводе новых мощностей возобновляемой энергетики. При этом Киотский протокол создает дополнительный канал инвестиций в возобновляемую энергетику, измеряемый десятками миллиардов долларов. Внедрение новых мощностей возобновляемой энергетики в рамках Киотского протокола в развивающихся странах стимулирует пространственную диффузию инноваций. Странами-лидерами в этом процессе по количеству установленной мощности возобновляемых источников энергии являются Китай, Индия, Бразилия и Индонезия. В Китае, например, согласно программе развития возобновляемых источников энергии на средний и длительный период, к 2020 году объем потребления таких источников энергии должен составить 15% от общего объема потребления. Это, несмотря на то, что Китай в последние годы демонстрирует самые высокие темпы прироста энергопотребления, прежде всего за счет углеводородных ресурсов.

В 2008-2012 гг. заканчивается период действия Киотского протокола 1997 г. Достижения весьма скромны и противоречивы. В декабре 2009 г. на всемирной конференции в Копенгагене должны быть выработаны принципы и цели пост-Киотского процесса сокращения выбросов парникового газа, уже с участием США, Китая, Индии и других невовлеченных сторон. Более амбициозные цели пост-Киото с учетом вышеописанных механизмов дадут дополнительный стимул развития инновационного процесса в возобновляемой энергетике.

В таких условиях у возобновляемой энергетики появляются существенные преимущества такие как:

- более справедливый доступ к энергии, вследствие широкой распространенности и доступности возобновляемых ресурсов по сравнению с ископаемыми;
- простота в управлении в отличие от многоступенчатых операций в топливной и атомной энергетике;
- широту возможностей при варьировании мощностей в соответствии с запросами и нуждами потребителей: от больших до маленьких;
- исключают ситуации с опустошением природы, как это происходит в топливдобывающих отраслях;

Для возобновляемой энергетики потенциал для новых технологий еще далеко не исчерпан. Высокая наукоемкость, разнообразие методов и технологических решений преобразования возобновляемых энергетических ресурсов открывает большой простор для будущего развития. Возобновляемая энергетика, начав серьезно развиваться всего каких-то 30 лет назад, сегодня отличается сравнительно низкой стоимостью энергетических установок. Например, себестоимость ветровых турбин снизилась с 1980 года почти в 3 раза, а солнечных элементов – в 9 раз.

В развитие возобновляемой энергетики выделяются три этапа:

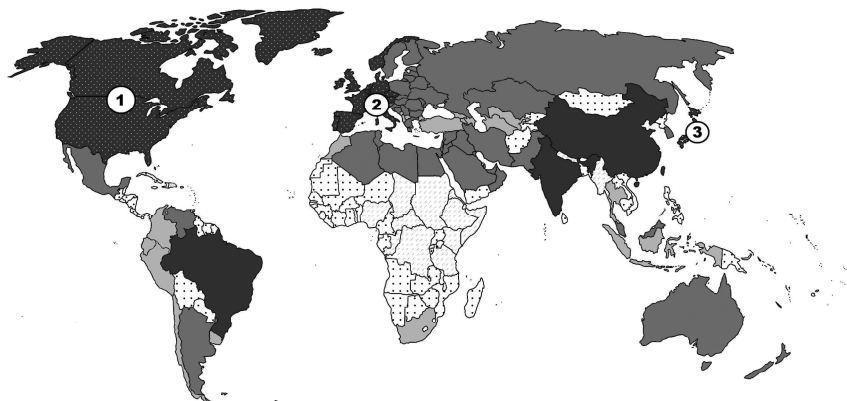
- с конца XIX века появление и становление гидроэнергетики, и зарождение ветроэнергетики;
- после нефтяных кризисов 1970-х годов интенсивное инвестиционно стимулированное развитие ветровой и солнечной энергетики на основе имеющихся в традиционной энергетике технологий, а также возникновение первых геотермальных и приливных электростанций;
- с начала XXI века формирование новейших технологий солнечной фотоэнергетики, эффективных преобразователей энергия океана, комплексных биоэнергетических систем.

Спектр фундаментальных исследований достаточно широк: в области материаловедения ведутся разработки новых материалов для солнечных элементов; новые информационные технологии и микроэлектроника применяется для моделирования и автоматизации энергосистем и их компонентов; в области биотехнологии ведется широкая работа по увеличению урожая биомассы, выведению новых сортов биоэнергетических культур, получения новых видов биотоплива.

По данным ООН использование возобновляемых источников энергии в последние четыре года удвоилось (с 2004 по 2008 гг.). Наиболее динамичные темпы роста продемонстрировала солнечная энергетика – 50% прироста в 2008 году. Если в 2004 году мировые инвестиции в возобновляемые источники энергии достигли 30 млрд. долларов США, то уже в 2007 году составили 100 млрд. долларов.

Основной массив инноваций в сфере возобновляемых источников энергии сконцентрирован в странах «триады» – Западной Европы, Северной Америки и развитых стран Восточной Азии, в которых производится половина ВВП мира. По абсолютному уровню финансирования выделяются США, Япония и Германия – на которые приходится 68% общих расходов на развитие возобновляемой энергетики мира. Диффузия инноваций происходит, прежде всего, в страны периферии этих трех центров, экономически связанных с ними (рис. 1).





Страны инновационного «Центра» «триады» – Северная Америка (1), Западная Европа (2) и Япония (3), на которые приходится 4/5 общих расходов на развитие возобновляемой энергетики мира.



Страны «Полупериферии» – Китай, Индия, Бразилия, на которых вместе со странами «триады» приходится 3/4 общемировой установленной мощности возобновляемых источников энергии (ВИЭ).



Страны «Полупериферии» с долей в энергобалансе ВИЭ более 2% и сжигаемой биомассы менее 10%.



Страны «Полупериферии» с долей сжигаемой биомассы в энергобалансе 10-30%.



Страны «Полупериферии» с долей сжигаемой биомассы в энергобалансе 10-30%. страны «Периферии» с долей ВИЭ менее 1% или с долей сжигаемой биомассы в энергобалансе 30-70%.



Страны глубокой «Периферии» с долей сжигаемой биомассы в энергобалансе более 70%.

Рис.1.

В настоящее время страны-члены Организации Экономического Сотрудничества и Развития (ОЭСР) вместе с Бразилией, Индией и Китаем производили 80% коммерческого электричества и 77% тепла от общемирового количества использованных возобновляемых источников энергии, а также 99% возобновляемого транспортного топлива.

Закономерным этапом развития возобновляемой энергетики стал тот факт, что в январе 2009 г. в Бонне учреждено Международное агентство по возобновляемым источникам энергии (International Renewable Energy Agency - IRENA).

Основной новой энергополитики в Евросоюзе признана стать существенное снижение зависимости от импортных энергоносителей и улучшить экологическую обстановку в Европе. Следование этим принципам приведет к тому, что корпора-

ции свернут в Европе остатки энергозатратных промышленных производств и перенесут их в другие регионы мира. Что касается энергетической независимости, то североморские месторождения практически выработаны и в 2007 году Европарламент утвердил показатель вклада возобновляемых источников энергии в энергобаланс в странах сообщества: в 2020 г. – 20% и к 2040 г. – 40%. В настоящее время показатель в 20% уже превышен, например, в Дании, где возобновляемая энергетика уже составляет 27% в энергобалансе.

Что касается США, то в январе 2009 года там обнародована программа, в соответствии с которой в возобновляемые источники энергии будет инвестировано 150 млрд. долларов. В ближайшие три года предусмотрено двойное увеличение производства возобновляемой энергии. Планируется к 2025 году обеспечить производство 25% американской энергии за счет возобновляемых источников.

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

- Централизованные системы энергоснабжения охватывают лишь 1/3 территории страны. Около 20 млн. чел. проживает вне этих систем. Надежное энергообеспечение отдаленных районов сложная и дорогая для государства задача.
- Более половины административных районов энергодефицитны (импортируют энергоресурсы из других регионов).
- Газифицировано лишь около 50% населенных пунктов.

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

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

В принятом распоряжении правительства прописано увеличение показателя объема производства и потребления электрической энергии с использованием возобновляемых источников на период до 2020 году (с учетом малых гидроэлектростанций): в 2010-м - 1,5%, в 2015-м - 2,5%, в 2020-м - 4,5%. Объем мощности, генерируемой с помощью возобновляемых источников энергии, будет возможно увеличить до такого уровня лишь в том случае, если вся нормативно-правовая документация, которая разрабатывается в рамках этого постановления, будет создана в течение 2009 году.

### Литература

1. *Шумпетер Й.А.* Теория экономического развития. – М.: ЭКСМО, 2007. – 864 с.
2. *Бушуев В.В., Телегина Е.А., Шафраник Ю.К.* Мировой нефтегазовый рынок: инновационные тенденции. – М.: ИАЦ Энергия, 2008. – 358 с.

3. Голицын М.В., Голицын А.М., Пронина М.В. Альтернативные энергоносители. – М.: Наука, 2004. – 159 с.
4. Бабурин В.Л. Инновационные циклы в российской экономике. – М.: Эдиториал УРСС, 2002. – 120 с.
5. Берёзкин М.Ю., Синогин О.А. Постиндустриальные тенденции конкурентоспособности энергетики мира / В сб. Конкурентоспособность в системе мирового хозяйства: пространственный анализ / Под ред. Н.С. Мироненко. – М.: Пресс-Соло, 2002. – С.340-354.

## ОСОБЕННОСТИ ТЕЧЕНИЙ В ПРЕСНЫХ ВОДОЕМАХ ЧАСТИЧНО ПОКРЫТЫХ ЛЬДОМ ВЕСНОЙ

Н.С. Блохина\*, А.Е. Орданович\*\*

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

\*\*МГУ им. М.В. Ломоносова, Механико-математический факультет

### Введение

Формирование течений в различные периоды года в пресных водоемах связано с протеканием разнообразных процессов как на границе раздела водоем-атмосфера, так и внутри водоема. Однако первопричиной всех тепловых и динамических процессов в водоемах является теплообмен между водоемом и атмосферой.

Весной, в период времени, когда водоем еще покрыт льдом, поток проникающей через лед радиации может достичь значений, достаточных для того, чтобы подо льдом возникла гидродинамическая неустойчивость, связанная с аномальной зависимостью плотности воды от температуры в районе 4°C. Это приводит к возникновению свободной проникающей конвекции и образованию квазигоризонтального слоя воды подо льдом. Температура и толщина этого слоя постепенно растут. При этом его толщина в глубоких озерах может достигать нескольких десятков метров [6]. В тоже время лед экранирует все внешние динамические воздействия атмосферы на поверхность водоема в этот период и существенно ограничивает потоки солнечной радиации через лед.

В весенний период, когда водоем полностью освобожден ото льда, теплообмену между водоемом и атмосферой ничто не препятствует и водоем начинает активно прогреваться в первую очередь у берега. Так как в пресных водоемах зимой температура воды ниже 4°C (температуры максимальной плотности воды) неустойчивость в плотностной стратификации, вызванная нагревом сверху весной, способствует интенсивному конвективному перемешиванию воды. Поверхностные воды с температурой максимальной плотности опускаются ко дну, формируя столб наиболее плотных вод с температурой 4°C - термобар. Взаимодействие теплых прибрежных вод с температурой больше 4°C с холодными водами в глубоководной части водоема происходит в узкой фронтальной зоне, которая является фронтом термобара [12-13]. Справа и слева от фронта возникают сходящиеся в районе термобара конвективные ячейки, способствующие прогреву и формированию течений в водоеме весной. По мере прогрева водоема термобар перемещается к центру водоема и исчезает, когда температура поверхностных вод становится больше 4°C.

Таким образом, хотя в эти два периода весеннего прогрева водоема конвективное перемешивание, связанное с аномальной зависимостью плотности воды от

температуры в районе  $4^{\circ}\text{C}$  происходит по-разному, конвекция является одним из основных факторов формирования термической и динамической структуры вод в водоеме. Особый интерес представляет исследование термогидродинамических процессов в водоеме и, в частности динамика развития термобара, в случае, когда водоем частично покрыт льдом и лед постепенно тает.

Исследованиям термогидродинамических процессов в пресных водоемах свободных ото льда весной, связанных с зарождением и распространением термобара, посвящено достаточно как натурных наблюдений, так и теоретических работ и в частности работ авторов [1-5]. Однако особенности течений в водоеме, частично покрытом льдом, в период его таяния не исследовались.

Настоящая работа посвящена теоретическому изучению развития термобара в пресном водоеме в период освобождения его ото льда.

### Постановка задачи

Для изучения динамики развития термобара весной рассматривается движение жидкости в области, соответствующей половине водоема симметричного относительно оси  $Ox_3$ , вытянутого в направлении широкой стороны и имеющей наклонное дно (Рис.1). Задача решается в системе координат  $Ox_1, Ox_2, Ox_3$ . За начало отсчета принимается левый нижний угол. Ось  $Ox_1$  направлена вдоль термобара, ось  $Ox_3$ - вертикально вверх.

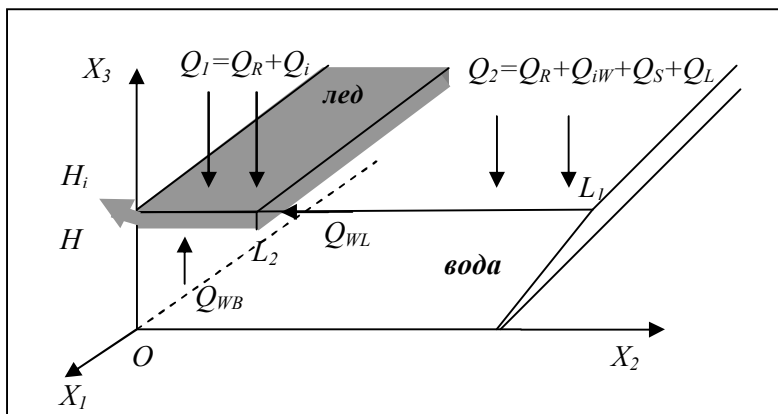


Рис. 1. Схема водоема.  $H$ - глубина водоема,  $L$ - ширина по дну,  $L_1$ - ширина по поверхности,  $L_2$  – расстояние от центра водоема до границы вода-лед,  $Q_1 = Q_R + Q_i$  и  $Q_2 = Q_R + Q_i + Q_S + Q_L$  – суммарные потоки тепла, приходящие на верхнюю границу льда и воды соответственно.  $Q_{WB}$  и  $Q_{WL}$  – потоки тепла от воды к нижней и боковой границам льда.  $H_i$  – толщина льда. Остальные обозначения потоков тепла описаны в тексте.

Для построения математической модели изучаемого процесса рассматривается движение вязкой несжимаемой жидкости, находящейся в поле силы тяжести. Используется следующая система уравнений:

$$\frac{\partial \bar{U}}{\partial t} + (\bar{U} \nabla) \bar{U} = - \frac{1}{\rho_0} \nabla p_1 + \nu \Delta \bar{U} - \frac{\bar{g} \rho_1 (T - 4^0 C)}{\rho_0} \quad (1)$$

$$\operatorname{div}(\bar{U}) = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + (\bar{U} \nabla) T = \lambda \Delta T \quad (3)$$

$$\rho(T) = \rho_0(4^0 C) - \rho_1(T - 4^0 C) = \rho_0(4^0 C) - \rho_0(4^0 C) \gamma (T - 4^0 C)^2 \quad (4)$$

Система уравнение гидродинамики в приближении Буссинеска (1-3) совместно с уравнением состояния пресной воды в районе  $4^0 C$  (4) описывает конвективные процессы в пресном водоеме в период развития весеннего термобара. Уравнение состояния (4) описывает квадратичную зависимость плотности воды от температуры в районе  $4^0 C$ .

Здесь  $t$  – время,  $\bar{U}$  – вектор скорости,  $T$  – температура воды,  $p_1$  – гидростатическое давление,  $\rho$  и  $\rho_0$  – плотность воды при температуре  $T$  и  $4^0 C$  соответственно,  $\nu$  и  $\lambda$  – коэффициенты молекулярной вязкости и теплопроводности соответственно,  $\gamma = 0,0000075$  град $^{-2}$ . Граничные условия для переменных уравнений теплопроводности и Навье-Стокса задаются следующие.

На дне водоема и правой наклонной частью дна – отсутствие потока тепла между дном и водой, условия прилипания и непроницаемости для скорости:

$$\frac{\partial T}{\partial x_3} = 0, \quad U_1 = 0, U_2 = 0, U_3 = 0 \quad (\text{дно}), \quad (5)$$

$$\frac{\partial T}{\partial n} = 0, \quad U_{1n} = 0, U_{2n} = 0, U_{3n} = 0 \quad (\text{правая граница}), \quad (6)$$

где  $n$  – нормаль к наклонной поверхности.

На левой границе задаются условия симметрии для всех переменных и отсутствие горизонтального теплового потока:

$$\frac{\partial T}{\partial x_2} = 0, U_1 = 0, U_2 = 0, \frac{\partial U_3}{\partial x_2} = 0 \quad (7)$$

На верхней границе водоема отдельно задаются граничные условия для части водоема покрытого льдом и свободного ото льда.

Граничные условия подо льдом:

$$T=0, \quad U_1=0, U_2=0, U_3=0, \quad (8)$$

На свободной ото льда поверхности водоема задается поток тепла  $Q_2$  и условие свободной границы для скорости.

$$-c_o \rho \lambda \frac{\partial T}{\partial x_3} = Q_2, \quad U_1 = 0, \frac{\partial U_2}{\partial x_3} = 0, U_3 = 0 \quad (9)$$

Здесь  $U_1, U_2, U_3$  – проекции скорости на оси  $X_1, X_2, X_3$ .

Поток  $Q_2 = Q_R + Q_{iw} + Q_S + Q_L$  состоит из потоков:

$Q_R$  – потока радиации, поступающей от солнца,

$Q_S = \rho_a c_p C_T (T - T_a) V$  – потока явного тепла, (10)

$$Q_L = LC_q(q - q_a)V \quad \text{- потока скрытого тепла,} \quad (11)$$

$$Q_{wv} = \delta_w \sigma (T_K + T)^4 (0.39 - 0.05e_a^{1/2})(1 - 0.6n^2) \quad \text{-} \quad (12)$$

потока длинноволнового излучения с поверхности воды ( $T_K = 273,15 \text{ K} - \theta^\circ \text{C}$ ), учитывающий облачность и обратную радиацию в отсутствии облаков [7].

Здесь  $\delta_w$  - излучающая способность воды ( $\delta_w = 0,93$ ),  $\sigma$  - постоянная Стефана-Больцмана ( $\sigma = 5,67 * 10^{-8} \text{ Вт/м}^2 * \text{K}^4$ ),  $c_o$  - теплоёмкость воды,  $\rho_a$  - плотность воздуха,  $c_p$  - теплоёмкость воздуха при постоянном давлении,  $C_T$  и  $C_q$  - коэффициенты Стентона и Дальтона для переноса тепла и влаги, соответственно,  $L$  - скрытая теплота парообразования,  $T_a$  и  $q_a$  - температура и удельная влажность воздуха,  $T$  и  $q$  - температура поверхности воды и удельная влажность вблизи ее поверхности,  $V$  - скорость ветра над поверхностью водоема,  $n$  - балл облачности,  $e_a$  - численное значение парциального давления водяного пара на стандартной высоте (2 м от подстилающей поверхности), измеренное в миллибарах при температуре  $T_a$  воздуха в атмосфере на той же высоте. Множитель в формуле (12), содержащий  $e_a$ , описывает поправку на обратную радиацию, которая, в свою очередь, зависит от содержания пара в атмосфере. Последний множитель есть поправка на эффект облачности.

Выражение для скрытого потока тепла (11) в зависимости от температуры подстилающей поверхности  $T$  может быть записано с учетом относительной влажности воздуха  $f$  и зависимости насыщающей влажности  $\Phi(T_a)$  от температуры воздуха в виде (см. работу [5]):

$$Q_L = LC_q(q - q_a)V = LC_q((1 - f)\Phi(T_a) + \frac{\partial \Phi}{\partial T}(T - T_a))V \quad (11a)$$

Парциальное давление водяного пара  $e_a$  (в формуле (12)), выразим через насыщающую упругость водяного пара  $E$  и относительную влажность воздуха  $f$  (выраженную в %) согласно соотношениям [14]:

$$e_a = E(T_a) * f / 100\%,$$

$$\text{где } E(T_a) = E_o * 10^B, \quad B = \frac{7.63 * T_a}{241.9 + T_a}, \quad E_o = 6.11 \text{ мбар.}$$

Учитывая это соотношения, формулы (12) примет вид:

$$Q_{wv} = \delta_w \sigma (T_K^4 + T^4) (0.39 - 0.05(E(T_a) * f / 100)^{1/2}) (1 - 0.6n^2) \quad (12a)$$

Толщина ледяного покрова определяется из уравнения

$$\frac{\partial H_i}{\partial t} = \frac{(Q_{WB} + Q_{WL} + Q_i)}{L_i r_i}, \quad (13)$$

с помощью которого вычисляется толщина льда  $H_i$ . По мере прогрева водоема толщина льда уменьшается, лед тает и ледовая кромка перемещается к центру водоема. На поверхности водоема, где в данный момент времени толщина льда равна нулю, задаются граничные условия (9).

В уравнении (13)  $Q_i = Q_R + Q_i$  - суммарный поток тепла, поступающий на верхнюю границу ледовой поверхности, состоящий из потока радиации от Солнца

$Q_R$  и  $Q_{iw} = \delta_i \sigma T_K^4 (0.39 - 0.05 e^{1/2}) (1 - 0.6 n^2)$  ( $T_K = 273,15$  K – температура льда -  $0^\circ\text{C}$ ) – потока длинноволнового излучения с поверхности льда;  $\delta = 0,98$ ,  $L_i$  – удельная теплота плавления льда,  $r_l$  – плотность льда.  $Q_{WB}$  и  $Q_{WL}$  – потоки тепла, поступающие к нижней границе и кромке льда соответственно (Рис.1). Эти потоки вычисляются по формулам  $Q_{WB} = \alpha_{WB} \Delta T_{WB}$  и  $Q_{WL} = \alpha_{WL} \Delta T_{WL}$  с использованием значений коэффициентов теплоотдачи  $\alpha_{WB}$  и  $\alpha_{WL}$  от воды ко льду в условиях свободной конвекции, полученных в работе [9]. Здесь  $\Delta T_{WB}$  и  $\Delta T_{WL}$  – разница температур между водой и льдом.

При решении совместно выше описанной системы уравнений с граничными условиями и уравнением (13) считается, что крупномасштабные конвективные структуры в водоеме формируется в турбулентной среде, а вдоль оси  $X_1$  свойства конвективных образований остаются однородными, что позволяет перейти к решению плоской задачи. Для выделения крупномасштабных структур в турбулентной среде используется подход, предложенный в работе [10].

Решается плоская задача, что позволяет введение функция тока  $\psi$ :

$$U_2 = \frac{\partial \psi}{\partial x_3}, \quad U_3 = -\frac{\partial \psi}{\partial x_2} \quad (14)$$

В переменных функции тока  $\psi$  и вихря  $\varphi$  в безразмерном виде система уравнений (1-3) запишется:

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t} + \left( \frac{\partial \psi}{\partial x_3} \frac{\partial \varphi}{\partial x_2} - \frac{\partial \psi}{\partial x_2} \frac{\partial \varphi}{\partial x_3} \right) = \mu \left( \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x_2^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x_3^2} \right) - 2(T - T_4) \frac{\partial T}{\partial x_2} \quad (15)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \left( \frac{\partial \psi}{\partial x_3} \frac{\partial T}{\partial x_2} - \frac{\partial \psi}{\partial x_2} \frac{\partial T}{\partial x_3} \right) = \mu \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x_2^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial x_3^2} \right) \quad (16)$$

$$\Delta \psi = \varphi \quad (17)$$

Здесь  $\mu = \nu_T / H \sqrt{gH}$  – безразмерный коэффициент обмена,  $T_4$  – безразмерное значение температуры максимальной плотности пресной воды. При введении безразмерных переменных приняты: масштаб размеров -  $L_m = H$  – глубина водоема; скорости -  $V_m = \sqrt{gH}$ ; времени -  $t = \sqrt{(H/g)}$ ; масштаб коэффициента турбулентной вязкости  $\nu_m = H \sqrt{gH}$ ; температуры -  $T_m = 1/\sqrt{\gamma}$ ;

Для замыкания системы уравнений и вычисления коэффициента турбулентной вязкости  $\nu_T$  используется известное соотношение  $\nu_T = C \varepsilon^{1/3} H^{4/3}$ . Скорость диссипации турбулентной энергии  $\varepsilon$  находится из уравнения баланса турбулентной энергии. После необходимых выкладок, в безразмерном виде, уравнение замыкания имеет вид:

$$\mu^2 = \left( \frac{\nu_T}{H \sqrt{gH}} \right)^2 = \frac{C^3}{s} \int_s \left[ 4 \left( \frac{\partial^2 \psi}{\partial x_2 \partial x_3} \right)^2 + \left( \frac{\partial^2 \psi}{\partial x_3^2} - \frac{\partial^2 \psi}{\partial x_2^2} \right)^2 - (T - T_4) \frac{\partial T}{\partial x_3} \right] ds \quad (18),$$

где  $s$  – площадь области решения задачи. Коэффициент  $C$  подбирается экспериментально. Вопрос выбора коэффициента  $C$  подробно обсуждается в [8].

Граничные условия для системы уравнений в переменных функции тока и вихря в безразмерном виде записываются следующим образом.

На дне водоема и правой наклонной боковой границе - условия прилипания и непроницаемости для скорости и отсутствия потока тепла соответственно имеют вид:

$$\frac{\partial \psi}{\partial x_2} = \frac{\partial^2 \psi}{\partial x_3^2} = 0, \quad \frac{\partial T}{\partial x_3} = 0 \quad \text{и} \quad \frac{\partial \psi}{\partial n} = \frac{\partial^2 \psi}{\partial n^2} = 0, \quad \frac{\partial T}{\partial n} = 0 \quad (19)$$

На левой границе области задаются условие симметрии для всех переменных.

На верхней границе для части водоема свободного ото льда граничные условия примут вид:

$$-\mu \frac{\partial T}{\partial x_3} = Q_2^b, \quad \frac{\partial \psi}{\partial x_2} = 0, \quad \varphi = \frac{\partial^2 \psi}{\partial x_3^2} = 0, \quad (20)$$

$$\text{а подо льдом:} \quad \frac{\partial \psi}{\partial x_2} = \frac{\partial^2 \psi}{\partial x_3^2} = 0, \quad T = 0 \quad (21)$$

Здесь  $Q_2^b = Q_2 / Q^b$ , где в качестве масштабов потоков принята величина  $Q^b = \sqrt{\gamma} / c_o \rho_o \sqrt{gH}$ .

В качестве начальных условий задаются поля температуры, функции тока и вихря соответствующие расчетным полям для ситуации, когда термобар возник у самого берега для данных гидрометеорологических условий. В случае расчетов, когда водоем частично покрытого льдом в начальный момент времени, по его поверхности у левой границы задается ледовый покров определенной толщины и длины.

Задача решается численно. Система уравнений (15)-(17), уравнение (13), граничные условия (19)-(21), уравнение замыкания (18) записываются в конечно-разностном виде с использованием центральных разностей для аппроксимации пространственных и односторонних для временных производных. Используется явная конечно-разностная схема. Уравнение Пуассона решается методом последовательной верхней релаксации [11]. Расчеты проводятся на сетке 26x75. Шаг сетки по вертикали равняется 0.4 м, а по горизонтали – 10 метров.

Рассматривается движение жидкости в водоеме с наклонным дном глубиной  $H=10$  м и шириной  $L_1=750$  м (половина водоема) (Рис.1) при различной толщине (1 и 3 см) и протяженности ледяного покрова (50 и 100 м), температуре и относительной влажности воздуха.

Для выявления особенностей течения в водоеме в период развития термобара проводятся сравнения результатов расчетов для случаев, когда в начальный момент времени водоем полностью свободен ото льда и частично покрыт льдом для температура атмосферы  $T_a=8^\circ\text{C}$ , относительной влажности воздуха  $f=60\%$  и балла облачности  $n=0$ . Поток солнечной радиации, поступающий на поверхность водоема равняется  $Q_R=450$  Вт/м<sup>2</sup>. В результате расчетов были получены поля распределения температуры  $T$ , функции тока  $\psi$  и скоростей течений в водоеме. На основе этих расчетов оценивается месторасположение, время жизни и скорость перемещения термобара во времени, время таяния ледяного покрова и другие характеристики течений.

### Обсуждение результатов



На Рис.2 представлены поля распределения температуры ( $T$ ) и функции тока ( $\psi$ ) для случая водоема свободного (а) и частично покрытого льдом (б) (в начальный момент времени) в различные моменты времени  $t$  после начала его прогрева. Так как качественная картина течений для различных параметров ледяного покрова развивается одинаково, проводится сравнение результатов расчетов для случая, когда в начальный момент времени лед имел толщину 1 см и длину 50 м (6 точек по оси абсцисс на рисунках). Отметим, что во всех рисунках температура воды  $T$  обозначена в  $^{\circ}\text{C}$ , а по оси абсцисс и ординат отложены номера узлов расчетной сетки.

Как видно из Рис.2(а) термобар (ТБ)- фронтальный раздел, совпадающий с изотермой  $4^{\circ}\text{C}$ , возникает около правого берега и по мере прогрева водоема продвигается к его центру. Термобар разделяет водоем на области, охваченные вихрями противоположного направления вращения с опусканием воды ко дну в районе изотермы  $4^{\circ}\text{C}$ . Термобар перемещается от берега к центру водоема примерно за 38 часов. Скорость его продвижения составляет около 18 м/час, что качественно совпадает с данными натурных наблюдений (среднесуточная скорость распространения ТБ составляет 7.2 – 43 м/час). По мере перемещения термобара к центру водоема, вертикальная скорость опускания воды в зоне фронтального раздела уменьшается от 2.8 см/час ( $t=8,5$  ч) до 0.8 см/час ( $t=34$  ч) Рис.1(а). Вне наклонной части водоема наблюдается примерно постоянный градиент температуры по горизонтали.

Сравнение результатов расчетов в одни и те же моменты времени для случаев водоема свободного и частично покрытого льдом в начальный момент времени, позволяет выявить особенности распространения термобара и структуры течений в водоеме во втором случае Рис.2(б). Отметим, что движение воды весной в нашем случае можно разделить на 2 периода: движение, когда лед еще существует и полностью растаял. Ниже не обсуждается структура течений в водоеме во время существования ледяного покрова, а оценивается отдаленное его влияние на течения после того, как лед уже растаял. Лед, в начальный момент времени, занимает область размером 50 м. Примерно через 1 час после начала прогрева водоема он полностью тает. Через 8,5 ч в водоеме образуется структура течений и температурное распределение, представленное на Рис.2(б, $t=8,5$  ч) и отличное от случая (а) Рис.2(а, $t=8,5$  ч). Месторасположение термобара остается прежним. Распределение изотерм во всей области, исключая центральную часть размером 200 м (20 узлов расчетной сетки) схоже. Отличие лишь в их наклоне. Ближе к центру водоема наблюдается значительный градиент температуры по горизонтали, связанный с тем, что лед способствует образованию столба холодной воды под ним с температурой значительно ниже, чем температура в этой области в случае (а). Конвективные вихри справа и слева от термобара остаются одинакового размера. Однако во втором случае внутри антициклонического глубинного вихря в зоне существования льда в начальный момент времени формируется интенсивный вихрь с максимальной скоростью опускания воды в его центре около 20 см/ч.

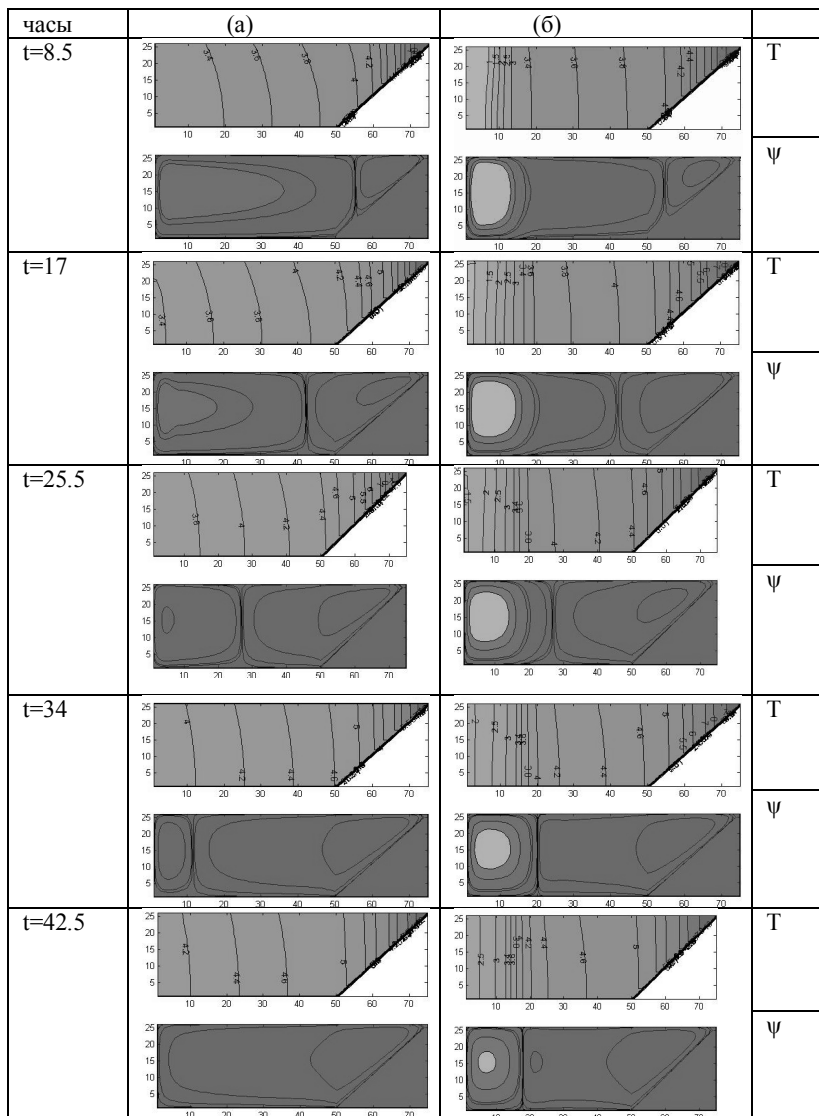


Рис.2. Поля распределения температуры (Т) и функции тока ( $\psi$ ) для случая водоема свободной ото льда (а) и частично покрытого льдом (б) в различные моменты времени t после начала его прогрева.

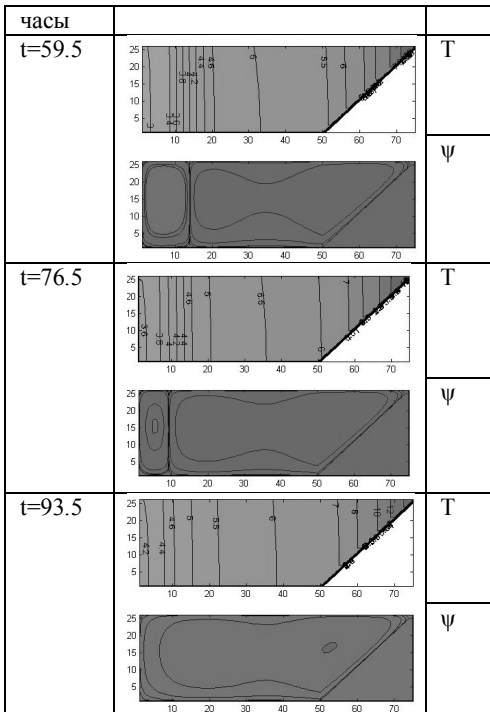


Рис.3. Поля распределения температуры (Т) и функции тока ( $\psi$ ) для водоема (частично покрытого льдом в начальный момент времени) в различные моменты времени  $t$  после начала его прогрева.

Скорость распространения ТБ существенно уменьшается и равняется 5.8 м/час. При этом скорость опускания воды в районе ТБ увеличивается до 11 см/час. Это связано с тем, что на динамические характеристики воды в районе термобара стало существенно оказывать влияние месторасположение и интенсивность глубинного вихря, скорость движения воды в котором выше, чем во всей другой области водоема. Дальнейший прогрев водоема приводит к тому, что градиент температуры в центральной части водоема уменьшается, глубинный вихрь так же постепенно уменьшается в размере, теряя свою интенсивность и к моменту времени  $t=93.5$  ч (Рис.3) полностью исчезает.

### Заключение

В районе ледового покрова в воде формируется интенсивный вихрь, внутри большого антициклонического вихря, вращающегося в направлении берега и способствующий образованию столба холодной воды с большим градиентом темпера-

Этот вихрь охватывает область, примерно в 2.5-3 раза большую, чем заданный в начальный момент времени горизонтальный размер ледового покрытия. По мере прогрева водоема термобар в случае (б) до момента времени  $t=34$  ч (Рис.2(б)) распространяется в глубинную область с той же скоростью, что и в случае водоема, свободного ото льда. К этому моменту времени прибрежный циклонический вихрь увеличивается в размере и достигает внутреннего интенсивного антициклонического вихря, размер которого до этого момента времени не изменяется, а максимальная вертикальная скорость опускания воды в нем падает с 20 до 7 см/час. Отметим, что в течении 34 ч скорость опускания воды в районе ТБ в случае (б) примерно одинакова (около 0.7 см/час) и меньше, чем в случае (а) (2.8 – 0.8 см/час).

После достижения прибрежного вихря интенсивного глубинного вихря скорость

туры в горизонтальном направлении. Этот вихрь (хотя лед уже растаял) практически не изменяет своего месторасположения до того момента, пока прибрежный циклонический вихрь его не достигает и не начинает постепенно вытеснять. До этого момента времени скорость опускания воды в его центре, больше, чем в районе термобара. Холодные воды в районе ледового покрытия, существовавшего в начальной фазе прогрева водоема, нагреваются значительно дольше, чем прибрежные воды и являются барьером для распространения термобара, что увеличивает время его жизни примерно в 2.5 раза (для расчетных параметров задачи).

*Работа выполнена при финансировании РФФИ (гранты № 08-05-00574-а).*

### Литература

1. Блохина Н.С., Савельева О.С., Орданович А.Е. Математическое моделирование весеннего термобара. Физические проблемы экологии (экологическая физика), т.4, изд-во Физического фак-та МГУ, Москва, 1999, с.54-61.
2. Блохина Н.С., Орданович А.Е., Савельева О.С. Модель возникновения и развития весеннего термобара. Водные ресурсы, 2001, т.28, № 2, с.224-228.
3. Блохина Н.С., Овчинникова А.В., Орданович А.Е. Математическое моделирование весеннего термобара в неглубоком водоеме, Вестник Московского университета. Серия 3, Физика. Астрономия, 2002, № 2, с.60-66.
4. Блохина Н.С., Соловьев Д.А. Влияние ветра на динамику развития термобара в период весеннего прогрева водоема, Вестник Московского университета. Серия 3, . Серия 3, Физика. Астрономия, 2006, № 3, с. 59-63.
5. Блохина Н.С., Орданович А.Е., Влияние температуры и относительной влажности воздуха на изменение теплозапаса водоема, его энергообмен с атмосферой и перемещение весеннего термобара в ночное время, Сб. науч. трудов «Физические проблемы экологии (экологическая физика), изд-во Физического фак-та МГУ, Москва, 2010, № 16, с.38-47.
6. П.М. Бояринов, М.П. Петров Процессы формирования термического режима глубоких пресноводных водоемов. Л.: Наука, 1991, 175с.
7. А. Гилл, Динамика атмосферы и океана, т.1, М.: изд-во «Мир», 1986 ,397с.
8. Т.Б. Глуховская, А.Е. Орданович. О турбулентной конвекции в плоском горизонтальном слое. Механика жидкости и газа, 1993, №6, с.49-56.
9. Е.С. Гоголев, А.Н. Красавин, Влияние ориентации ледяной поверхности на интенсивность теплоотдачи от воды ко льду в условиях свободной конвекции, 1984, т. 46, № 3, с. 447-451.
10. Ковалев В.А., Орданович А.Е. Физико-математическая модель турбулентного горизонтального стратифицированного потока с учетом когерентных структур. //Препринт Московский Университет, 1981.
11. Роуч П. Вычислительная гидродинамика. изд-во «Мир», Москва,1980, 616 с.
12. Тихомиров А.И. О термическом баре в Якимварском заливе Ладожского озера, Изв. Всесоюзного географического общества, 1959, т.91, №5, с. 424-438.
13. Тихомиров А.И. Термика крупных озер. Л.: Наука, 1982. 232 с.
14. А.Х. Хргиан, Физика атмосферы, Л.: Гидромет. изд-во, 1969, 647 с.

ПАРАМЕТРЫ ОЧАГА ЦУНАМИ КАК ФУНКЦИЯ МАГНИТУДЫ И ГЛУБИНЫ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ

А.В. Большакова, М.А. Носов

*Физический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова*

Для численного моделирования волн цунами, как правило, используют теорию длинных волн, которая оперирует уравнениями гидродинамики, осредненными вдоль вертикальной координаты [4, 10, 11, 17]. При этом процесс формирования цунами подводным землетрясением рассматривается как мгновенный, а система уравнений теории длинных волн решается с начальными условиями, представляющими собой некоторое смещение свободной поверхности воды от равновесного положения (начальное возвышение) при нулевом поле скорости течения. В большинстве случаев начальное возвышение полагают равным вертикальным остаточным деформациям дна, образовавшимся в результате подводного землетрясения. Деформации дна рассчитывается по параметрам очага землетрясения с использованием аналитического решения стационарной задачи теории упругости (формулы Окада) [14].

Невзирая на существование описанной выше практической методики расчета источника сеймотектонического цунами, часто возникает необходимость выявления простых общих закономерностей, связывающих параметры сейсмического источника и характеристики очага цунами. Связи такого рода являются полезными для понимания физической природы явлений, происходящих в водном слое над очагом подводного землетрясения. На их основе, например, можно оценить долю энергии землетрясения, переходящую в волну цунами, либо в иной динамический процесс. Кроме того, по заданной магнитуде можно быстро оценить максимально возможную амплитуду волн в источнике и их длину. Отметим, что аналогичные общие закономерности, связывающие, например, параметры очага землетрясения и магнитуду, широко распространены в сейсмологии [7, 8, 9, 13, 16, 18].

Попытки выявить связь параметров очага цунами (или параметров волн цунами в области источника) с магнитудой землетрясения предпринимались неоднократно. Не претендуя на полноту списка, отменим некоторые из работ. Доценко и Соловьев [2] построили эмпирические зависимости среднего радиуса очага цунами и амплитуды смещения поверхности океана в очаге от магнитуды землетрясения:

$$\lg R_{TS} [\text{км}] = (0.50 \pm 0.07)M - (2.1 \pm 0.6), \quad (1)$$

$$\lg \xi_0 [\text{м}] = (0.8 \pm 0.1)M - (5.6 \pm 1.0). \quad (2)$$

Формулы (1) и (2) получены для диапазона магнитуд  $6.7 < M < 8.5$  в результате анализа волнового поля в очаге, восстановленного по измерениям на побережье. Интервальные оценки соответствуют 80%-й вероятности. Необходимо отметить, что данные формулы дают завышенные значения, особенно в области больших магнитуд. Так, для катастрофического землетрясения 26.12.2004 г. с магнитудой  $M_w=9.1$  (USGS), произошедшего в Индонезии, формула (2) даёт значение  $\xi_0 = 48 \text{ м}$ , в то время, как более реальные оценки, приведенные в работе [5] дают

значения для максимального поднятия и опускания дна 8.6 м и 3.9 м соответственно. Кроме того, неточность зависимостей (1) и (2) проявляется в величине доверительных интервалов – разброс значений достигает нескольких порядков.

В работе Окада [13] была получена зависимость между максимальным вертикальным смещением дна и параметрами точечного источника землетрясения, такими как расстояние до гипоцентра и момент-магнитуда:

$$\lg U_z[\text{см}] = 1.5 M_w - 2 \lg R[\text{км}] - 5.96. \quad (3)$$

Но эта зависимость не может быть применима к цунамигенным землетрясениям. Дело в том, что цунамигенные землетрясения представляют собой достаточно сильные сейсмические события, очаг которых не может считаться точечным.

Каджиура исследовал связь энергии цунами с момент-магнитудой землетрясения [6]. Им была получена следующая зависимость максимальной энергии цунами от магнитуды:

$$\lg E_{TS}[\text{Дж}] = 2.0 M_w - 2.46. \quad (4)$$

По прошествии более чем 20 лет после публикации статьи [6] Окал предложил для энергии цунами следующую уточненную формулу [15]:

$$\lg E_{TS}[\text{Дж}] = 2.0 M_w - 1.66. \quad (5)$$

Во всех отмеченных выше работах делались попытки связать амплитуду волны цунами в очаге, горизонтальный размер очага и энергию волны с магнитудой. В наших работах [1, 3] было предложено рассматривать дополнительную характеристику – объем воды, вытесненный подвижкой дна. Важность этой характеристики объясняется тем, что вытесненный объем, также как и энергия цунами, представляет собой интеграл движения для задачи распространения цунами. Кроме того, вытесненный объем является одной из тех характеристик, которые могут быть однозначно вычислены по известной остаточной деформации дна. Кроме вытесненного объема к таким характеристикам относятся амплитуда деформации дна и потенциальная энергия начального возвышения. Заметим, что, например, площадь очага цунами не является характеристикой, которая однозначно рассчитывается по деформации дна. Для определения площади необходимо ввести дополнительный параметр – уровень деформации, разграничивающий очаг цунами и внешнюю область.

В работах [1, 3] нами исследовались однопараметрические зависимости – связи максимально возможных значений параметров очага цунами (амплитуда деформации дна, вытесненный объем, энергия начального возвышения) с момент-магнитудой землетрясения. Настоящая работа направлена на построение двухпараметрических зависимостей, связывающих параметры очага цунами с магнитудой и глубиной очага землетрясения.

В соответствии с традиционным подходом к расчетам цунами будем предполагать, что начальное возвышение в очаге эквивалентно вертикальной остаточной деформации дна. Такое предположение фактически позволяет исключить из рассмотрения водный слой и тем самым сократить число свободных параметров. Заметим, что точное решение задачи об определении начального возвышения требует учета сглаживающего влияния водного слоя и вклада горизонтальных компонент деформации наклонного дна [11, 12].

Для расчета вертикальных деформаций дна в очаге цунами мы используем формулы Окада [14]. Начало прямоугольной системы координат расположим

на невозмущенной поверхности упругого полупространства (Рис. 1). Ось  $Oz$  направим вертикально вверх, ось  $Ox$  – в направлении простирания площадки разрыва. В качестве модельного очага землетрясения рассматривалась прямоугольная площадка разрыва шириной  $W$  и длиной  $L$ . Положение площадки разрыва в пространстве фиксировалось углом падения  $\delta$  и глубиной верхней кромки  $h$ . Подвижка полагалась однородной вдоль площадки разрыва. Направление и величина подвижки задавались вектором Бюргерса  $\vec{D}$ . Упругие свойства полупространства определялись коэффициентами Ламе  $\lambda$  и  $\mu$ .

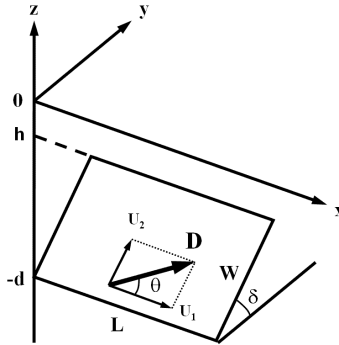


Рис.1. Модель очага землетрясения.

Для сокращения набора входных данных мы использовали эмпирические соотношения, предложенные в работе [8]

$$L/W = 2, \quad D/L = 5 \cdot 10^{-5} \quad (6)$$

определение сейсмического момента

$$M_0 = \mu D L W \quad [H \cdot m] \quad (7)$$

и связь между магнитудой и сейсмическим моментом [9]

$$M_w = \frac{Lg M_0}{1.5} - 6.07 \quad (8)$$

Соотношения (6)-(8) позволяют выразить характеристики очага через магнитуду

$$\lg L[\text{км}] = 0.5 M_w - A_L \quad (9)$$

$$\lg W[\text{км}] = 0.5 M_w - A_W \quad (10)$$

$$\lg D[\text{м}] = 0.5 M_w - A_D \quad (11)$$

В зависимости от значения параметра Ламе  $\mu$ , который в реальности изменяется в диапазоне  $3 - 8 \cdot 10^{10} \text{ Па}$ , коэффициенты в формулах (9)-(11) могут варьироваться в следующих пределах:  $A_L = 1.92 - 2.07$ ,  $A_W = 2.22 - 2.37$ ,  $A_D = 3.22 - 3.37$ .

В расчетные формулы Окада входит комбинация констант Ламе  $\lambda$  и  $\mu$ , которую можно выразить через скорости продольных  $c_p$  и поперечных  $c_s$  волн

$$\kappa = \frac{\mu}{\lambda + \mu} = \frac{c_s^2}{c_p^2 - c_s^2}. \quad (12)$$

Обычно величина  $\kappa$  варьируется в пределах от 0.3 до 0.5. Информацию о значении величины  $\kappa$  для конкретного региона можно получить, например, из модели CRUST2.0 (<http://igppweb.ucsd.edu/~gabi/>). В наших расчетах данная константа полагалась равной  $\kappa = 0.45$ .

Будем полагать, что вектор Бюргера лежит в плоскости разрыва  $\vec{D} = (U_1, U_2, 0)$ . Такая подвижка описывается длиной вектора Бюргера и углом между этим вектором и направлением простирания разрыва  $\theta$  (Rake). В итоге число параметров, описывающих очаг землетрясения, сократилось до четырех: (1) магнитуда землетрясения  $M_w$ , (2) глубина верхней кромки площадки разрыва  $h$ , и углы (3)  $\delta$  (Dip) и (4)  $\theta$  (Rake). Глубина очага  $h$  выбиралась равной 1, 10, 50, 100 и 200 км. Оставшиеся три параметра варьировались случайным образом (статистически равномерно) в следующих диапазонах:  $6.5 < M_w < 9.5$ ,  $0^\circ < \delta < 90^\circ$ ,  $-90^\circ < \theta < 90^\circ$ .

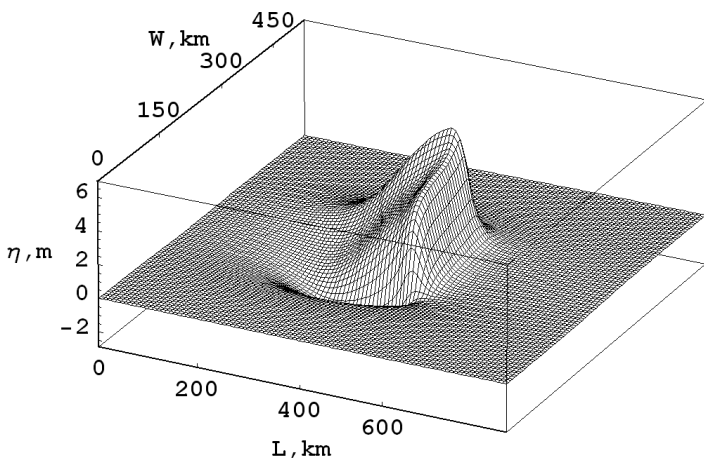


Рис.2. Пример расчета вертикальной остаточной деформации дна при  $M_w = 9$ ,  $h = 30$  км,  $\delta = 30^\circ$ ,  $\theta = 30^\circ$ .

На Рис. 2, в качестве примера, представлен расчет остаточной вертикальной деформации дна, выполненный при следующих входных параметрах модели:  $M_w = 9$ ,  $h = 30$  км,  $\delta = 30^\circ$ ,  $\theta = 30^\circ$ .

По вертикальной остаточной деформации дна  $\eta(x, y)$  мы рассчитывали следующие параметры очага цунами:

1. амплитуду деформации дна

$$\Delta\eta = \max[\eta(x, y)] - \min[\eta(x, y)], \quad (13)$$



2. потенциальную энергию начального возвышения

$$E = \frac{\rho g}{2} \iint \eta^2(x, y) dx dy, \quad (14)$$

3. объем вытесненной воды

$$V = \left| \iint \eta(x, y) dx dy \right|, \quad (15)$$

где  $\rho$  – плотность воды,  $g$  – ускорение силы тяжести. При численных расчетах мы полагали  $\rho = 1000 \text{ кг/м}^3$ .

Результаты расчетов представлены на Рис 3-5 в виде точек (во избежание загроможденности рисунков мы представляем только незначительную часть всех расчетов). Видно, что при заданной магнитуде значения расчетных параметров могут варьироваться в широких пределах – до нескольких порядков. Амплитуда деформации дна и энергия начального возвышения сильно зависят от глубины очага землетрясения: при увеличении глубины амплитуда и энергия уменьшаются. Интересно отметить, что вытесненный объем не зависит от глубины очага. Причины этой особенности подробно обсуждаются в нашей работе [3].

Разброс данных при фиксированных магнитуде и глубине определяется случайным выбором углов  $\delta$  (Dip) и  $\theta$  (Rake). В дальнейшем анализе мы использовали максимальные значения расчетных параметров, достигнутые при всевозможных значениях величин  $\delta$  и  $\theta$ . Отметим, что, несмотря на аналитическую форму решения Окада, сложность формул не позволяет выявить максимальные значения традиционными аналитическими методами. По максимальным значениям строились аппроксимации следующего вида:

$$\lg Q = \sum_{i=0}^{i_{\max}} \sum_{j=0}^{j_{\max}} \alpha_{ij} M W^j h [\text{км}]^i, \quad (16)$$

где величина  $Q$ , искомый параметр очага цунами ( $\Delta\eta[\text{м}]$ ,  $E[\text{Дж}]$ ,  $V[\text{м}^3]$ ). Характер зависимостей максимальной амплитуды деформации и энергии от магнитуды и глубины оказался достаточно сложным. Удовлетворительное согласие с расчетными данными обеспечивает параметризация с  $i_{\max} = j_{\max} = 3$ . Матрицы коэффициентов  $\alpha_{ij}$  имеют следующий вид ( $i$  – вертикальный индекс,  $j$  – горизонтальный):

<i>амплитуда</i>	<i>энергия</i>
$\begin{pmatrix} 4.91 \cdot 10^{-6} & -9.3 \cdot 10^{-5} & 4.4 \cdot 10^{-4} \\ -1.4 \cdot 10^{-3} & 0.0297 & -0.15 \\ -0.056 & 1.47 & -7.44 \end{pmatrix},$	$\begin{pmatrix} 3.59 \cdot 10^{-6} & -7.2 \cdot 10^{-5} & 3.6 \cdot 10^{-4} \\ -0.001 & 0.023 & -0.13 \\ -0.06 & 3.05 & -6.29 \end{pmatrix}.$

Параметризация (16) показана на Рис. 3 и 4 сплошными серыми линиями, интенсивность цвета которых соответствует глубине источника.

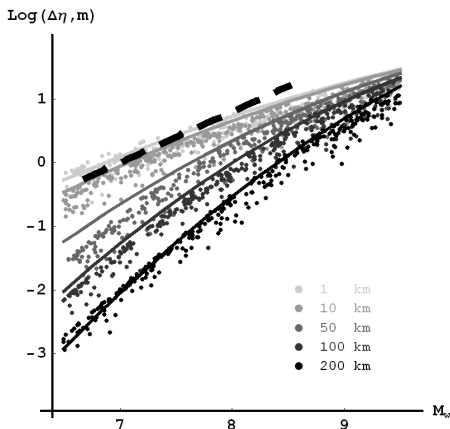


Рис. 3. Амплитуда деформации дна в очаге цунами как функция момент-магнитуды землетрясения при различных глубинах очага землетрясения. Точками представлены результаты численных расчетов. Кривыми показана параметризация (16). Интенсивность цвета точек и кривых соответствуют разным глубинам очага (указаны на рисунке). Жирная пунктирная линия – эмпирическая зависимость (2).

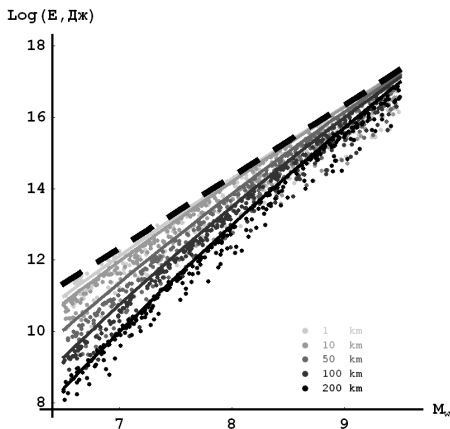


Рис. 4. Потенциальная энергия начального возвышения в очаге цунами как функция момент-магнитуды землетрясения при различных глубинах очага землетрясения. Точками представлены результаты численных расчетов. Кривыми показана параметризация (16). Интенсивность цвета точек и кривых соответствуют разным глубинам очага (указаны на рисунке). Жирная пунктирная линия – зависимость (5).

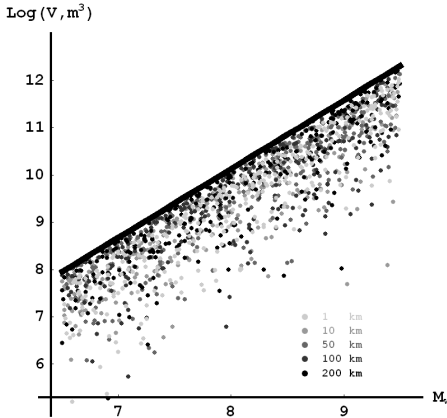


Рис. 5. Вытесненный объем воды в очаге цунами как функция момент-магнитуды землетрясения при различных глубинах очага землетрясения. Точками представлены результаты численных расчетов. Черной линией показана параметризация (17). Интенсивность цвета точек и кривых соответствуют разным глубинам очага (указаны на рисунке).

Как уже отмечалось, вытесненный объем не зависит от глубины очага, следовательно, в данном случае отпадает необходимость построения двухпараметрической зависимости. Максимальное значение вытесненного объема связано с магнитудой следующей формулой:

$$\lg V [m^3] = 1.45 M_w - 1.47. \quad (17)$$

На Рис. 5 зависимость (17) показана черной сплошной линией. Из рисунка видно, что объем воды, вытесненный подвижкой дна, может достигать колоссальных величин. Так, например, при  $M_w = 9$  вытесненный объем составляет  $\sim 1000 \text{ км}^3$  ( $\sim 10^{12} \text{ м}^3$ ). А при значении магнитуды  $M_w = 7$  (пороговое значение для объявления тревоги цунами) объем может достигать почти  $1 \text{ км}^3$ .

Возвращаясь к Рис. 3, заметим, что зависимость Доценко и Соловьева (2), показанная жирной пунктирной линией, примерно соответствует максимальным значениям амплитуд деформации дна, полученным в наших расчетах, в диапазоне магнитуд  $6.7 < M < 8.5$ . При больших магнитудах зависимость (2), очевидно, дает некорректные (завышенные) значения.

Максимальные значения энергии цунами (Рис. 4), полученные в наших расчетах хорошо соответствуют формуле Окала (5). Кроме того, видно, что энергия цунами сильно зависит от глубины очага, что особенно ярко проявляется при малых магнитудах. Так, например, при магнитуде 7 увеличение глубины очага с 1 км до 200 км приводит к уменьшению энергии цунами почти на 3 порядка. Соответствующее уменьшение энергии при магнитуде 9 составляет всего около одного порядка.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, грант 10-05-00562.

### Литература

1. Денисова А.В., Колесов С. В., Носов М. А. Связь параметров сейсмического источника и характеристик очага цунами // Природные катастрофы: изучение, мониторинг, прогноз: III Сахалинская молодежная научн. школа, Южно-Сахалинск, 3-6 июня 2008 г.: сб. материалов / отв. ред. О.Н. Лихачева. Южно-Сахалинск: ИМГиГ ДВО РАН, 2009. с.160-167.
2. Доценко С.Ф., Соловьев С.Л. Математическое моделирование процессов возбуждения цунами подвижками океанского дна. Исследования цунами. М. 1990. №4. С.8-20.
3. Bolshakova A.V., Nosov M.A. Parameters of tsunami source versus earthquake magnitude // Pure and Appl. Geophys. (in print).
4. Gisler G.R. Tsunami simulations // Annu. Rev. Fluid Mech., 2008, 40, 71-90.
5. Grilli S.T., Ioualalen J.M., Kirby J.T., Watts P., Asavant J., and Shi F. Source Constraints and Model Simulation of the December 26, 2004, Indian Ocean Tsunami // Journal of Ocean Engineering, 2007, 133(6), 414-428.
6. Kajiura K., Tsunami energy in relation to parameters of the earthquake fault model // Bulletin of the Earthquake Research Institute, 1981, 56, 415-440.
7. Kanamori H. The energy release in great earthquakes // J. Geophys. Res., 1977, 82, 2981-2987.
8. Kanamori H., Anderson D. L. Theoretical basis of some empirical relations in seismology // Bulletin of the Seismological Society of America, 1975, 65, 1073-1095.
9. Kanamori H., Brodsky E. E. The physics of earthquakes // Rep. Prog. Phys., 2004, 67, 1429-1496.
10. Kowalik Z., Knight W., Logan T., and Whitmore P. Numerical modelling of the global tsunami: Indonesian tsunami of December 26 2004 // Science of Tsunami Hazard, 2005, 23(1), 40-56.
11. Levin B.W., and Nosov M.A. Physics of Tsunamis. Springer, 2008.
12. Nosov M. A., Kolesov S. V. Optimal initial conditions for simulation of seismotectonic tsunamis // Pure and Appl. Geophys. (in print).
13. Okada Y. Simulated empirical law of coseismic crustal deformation // J. Phys. Earth, 1995, 43, 697-713.
14. Okada Y. Surface deformation due to shear and tensile faults in a half-space // Bulletin of the Seismological Society of America, 1985, 75(4), 1135-1154.
15. Okal E.A. Normal mode energetics for far-field tsunamis generated by dislocations and landslides // Pure and Applied Geophysics, 2003, 160, 2189-2221.
16. Sato R. Theoretical basis on relationships between focal parameters and earthquake magnitude // J. Phys. Earth, 1979, 27, 353-372.
17. Titov V.V., and Gonzalez F.I. Implementation and testing of the Method of Splitting Tsunami (MOST) model / NOAA Technical Memorandum ERL PMEL-112, 1997.
18. Wells D. L. and Coppersmith K. J., New Empirical Relationships among Magnitude, Rupture Length, Rupture Width, Rupture Area, and Surface Displacement // Bulletin of the Seismological Society of America, 1994, 84(4), 974-1002.

СТАТИСТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОЛЯ ПОВЕРХНОСТНОЙ  
ТЕМПЕРАТУРЫ В СЕВЕРНОЙ АТЛАНТИКЕ

Василенко В.М., Сапожникова Е.В., Чугаевич В.Я.

*Российский государственный университет им. Иммануила Канта,*

*г. Калининград*

*Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Атлантическое отделение,*

*г. Калининград*

Проведено исследование 10-летнего массива данных ТПО Архив OI.v2.SST NOAA Северной части Атлантического океана.

<http://iridl.ldeo.columbia.edu/SOURCES/IGOSS/nmc/ReynSmithOIv2/monthly>.

Данные (с 1997 по 2007гг) SST осреднены по месяцам на одноградусной сетке. Дана общая картина распределения поверхностной температуры в Северной Атлантике. По массивам спутниковых данных проведены расчеты и составлены карты, гистограммы, с описаниями распределения температуры на поверхности Северной Атлантики; карты средней температуры поверхности Северной Атлантики за 10 лет и средние квадратичные значения, которые позволили выделить районы океана с наибольшей и наименьшей сезонной изменчивостью.

Изучение поля поверхностной температуры океана остается одной из наиболее важных задач в океанологии. Среднее многолетнее распределение температуры воды в океане является важной характеристикой его режима. Однако в каждом конкретном году в разных районах океана наблюдаются более или менее значительные отклонения от вычисленных за многолетний период норм [1, 3]. Многолетняя изменчивость теплового состояния отдельных районов океана имеет особенно большое значение, так как определяет процессы взаимодействия океана с атмосферой и, следовательно, оказывает влияние на погоду [5,6,7]. Поэтому исследование изменчивости температуры воды от года к году представляет определенный практический интерес. Предполагаемое исследование должно выяснить, во-первых, каковы величины возможных отклонений от нормы в различных районах океана, во-вторых, каковы причины и условия образования этих отклонений. Вторая задача в какой-то мере решает вопрос о возможности прогноза температуры воды.

Исследование пространственно-временной изменчивости температуры поверхностного слоя Северной Атлантики в данной работе проводилось по данным дистанционного зондирования, полученным из Национального метеорологического центра штата Мэриленд (США) [8].

Архив OI.v2.SST NOAA построен на основе спутниковых данных (1982-2007 гг.), дополненных данными натурных наблюдений (1971 - 2007 гг.) с использованием метода Reynolds and Smith (Reynolds, R.W., N. A. Rayner, T.M. Smith, D.C. Stokes and Wang, 2000: Improved In Situ and Satellite SST Analysis for Climate. J. Climate, 15, 1609-1625).

Данные SST осреднены по месяцам на одноградусной сетке. Изучался район Северной Атлантики за 10 лет (с 1997 по 2007) (рис. 1).

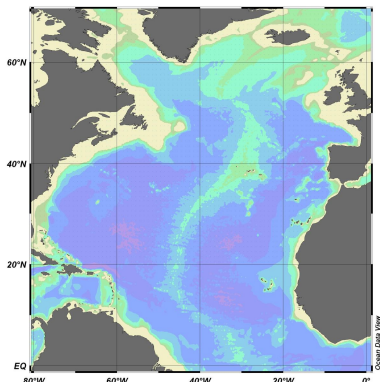


Рис. 1. Район исследований. Северная Атлантика.

Распределение температуры воды на поверхности океана в грубых чертах подчиняется зональному закону [1, 3]. Однако в Атлантическом океане, как ни в каком другом, выражены отклонения от зонального закона. Область самых теплых поверхностных вод расположена в низких широтах и несколько смещена в Северное полушарие, в западную половину океана. Изотермы сгущены в северо-западной части Северной Атлантики, откуда они веером расходятся по всей акватории. В результате к югу от северного полярного фронта (полосы наибольшего сгущения изотерм) температура поверхности океана с запада на восток снижается, а к северу от этого фронта, наоборот, растет. Такое распределение находит отражение в аномалиях температуры поверхности относительно средних широтных значений: к югу от фронта они отрицательные в восточной части и положительные — в западной, к северу от фронта — наоборот [4].

В январе ТПО Северной Атлантики изменяется от  $0^{\circ}\text{C}$  на севере до  $25^{\circ}\text{C}$  на юге (рис.2). Лабрадорское течение выносит из Девисова пролива холодные арктические воды, которые проникают до  $40^{\circ}$  широты. Там они встречаются с теплыми водами Гольфстрима. Гольфстрим и Северо-Атлантическое течение выносят теплые воды до берегов Исландии, где ТПО до  $7,5^{\circ}\text{C}$ . Канарское течение выносит холодные воды умеренных широт вдоль северо-западного берега

Африки до Северного тропика. Радиационный баланс поверхности океана в январе уменьшается. В годовом ходе баланса во внетропических широтах минимум приходится в Северном полушарии на январь (около нуля). Теплые воды Гольфстрима формируются в зоне пассатов и, постепенно трансформируясь, продвигаются на север вдоль берегов Америки, затем поворачивают на восток.

В феврале проникновение холодных вод Лабрадорского течения достигает  $45^{\circ}$  с.ш. Значительно опустилась изотерма в  $25^{\circ}\text{C}$ , т.к. снизилась активность Антильского и Северо - Пассатного течений, которые обусловлены деятельностью пассатов в этом районе.

В марте холодные воды Восточно-Гренландского и Лабрадорского течений соединяются и доходят до  $48^{\circ}$  с.ш. Северо-Атлантическое течение выносит до бере-

гов Англии изотерму в  $10^{\circ}\text{C}$ . Температура Гольфстрима заметно стала ниже - от  $22,5^{\circ}$  до  $12,5^{\circ}\text{C}$ . Изотерма в  $25^{\circ}\text{C}$  приблизилась к тропикам.

В апреле активно начинает работать Гольфстрим, поднимая изотерму в  $20^{\circ}\text{C}$  до  $38^{\circ}$  широты. Холодное Канарское течение выхолаживает тропические воды до  $17,5^{\circ}\text{C}$  и выносит их до  $20^{\circ}$  с.ш. Арктические воды доходят лишь  $46^{\circ}$  широты.

В мае теплые воды Гольфстрима активно распределяются по всему океану. Изотерма в  $20^{\circ}\text{C}$  у берегов Америки доходит до  $40^{\circ}$  с.ш., а холодные арктические воды оттесняются далеко на север. Северо—Атлантическое течение выносит к берегам Англии изотерму в  $10^{\circ}\text{C}$  почти до  $60^{\circ}$  широты.

В июне наблюдается общее потепление ТПО. Гольфстрим оказывает действие на весь океан: у берегов Кубы и Флориды проходит изотерма в  $27,5^{\circ}\text{C}$ ; западноатлантическая экваториальная водная масса поднимается до  $40^{\circ}$  с.ш. с изотермой  $22,5^{\circ}\text{C}$ . За счет Гольфстрима и Северо-Атлантического течений хорошо обогревается Европа. Там ТПО от  $20^{\circ}$  у берегов Испании до  $12,5^{\circ}\text{C}$  у берегов Англии, а изотерма в  $10^{\circ}\text{C}$  доходит до берегов Исландии. Восточно-Гренландское и Лабрадорское течения несут соответственно воды с температурой  $5^{\circ}$  и  $0-5^{\circ}\text{C}$ . В июне появляется область хорошо прогретой воды в Бискайском заливе до  $17,5^{\circ}\text{C}$ .

В летний период солнечная радиация увеличивается, соответственно увеличивается и радиационный баланс поверхности океана. В годовом ходе баланса во вне-тропических широтах в Северном полушарии максимум приходится на июль ( $5-6$  ккал/см<sup>2</sup>-мес) [3]. Максимум радиации океан получает в тропических широтах ( $120$  ккал/см<sup>2</sup> в год). К югу и к северу от тропиков баланс уменьшается соответственно до  $100$  ккал/см<sup>2</sup> • год и до  $30$  ккал/см<sup>2</sup> • год (на северных границах океана) [3]. Распределение баланса близко к зональному. Изотерма в  $27,5^{\circ}\text{C}$  поднимается до  $34^{\circ}$  с.ш. у берегов Америки, а минимальная изотерма в  $5^{\circ}\text{C}$  расположена только у берегов Гренландии (рис.3).

В августе ТПО продолжает увеличиваться на юге (изотерма в  $25^{\circ}\text{C}$  поднимается до  $40^{\circ}$  широты), но на севере возле берегов Гренландии появляются изотермы ниже  $5^{\circ}\text{C}$ . Очевидно, это связано с таянием ледников Гренландии. Хорошо прослеживается широтная зональность в распределении температуры. В Бискайском заливе область прогретой воды достигает своего максимума в августе. Вода здесь прогревается до  $20^{\circ}\text{C}$ .

В сентябре картина распределения ТПО заметно меняется. Начинают наступать арктические водные массы, выносимые Восточно-Гренландским и Лабрадорским течениями.

Постепенно солнечная активность падает, соответственно изменяется и радиационный баланс океана. Холодные арктические воды проникают в октябре до  $50^{\circ}$  широты, а изотерма в  $27,5^{\circ}\text{C}$  приближается к Северному тропику.

В ноябре картина распределения ТПО в Северной Атлантике постепенно приближается к январю. Восточно-Гренландское и Лабрадорское течения активно выносят холодные воды (от  $0^{\circ}$  до  $5^{\circ}\text{C}$ ) до  $45^{\circ}$  широты у берегов Северной Америки. Теплые воды Гольфстрима достигают  $40^{\circ}$  с.ш. Ниже приведены карты распределения ТПО для холодного и теплого месяцев года.

Все построенные гистограммы, как правило, имеют двухмодальный характер. Это указывает на то, что исследуемые процессы не являются гауссовскими. (приведены примеры гистограмм за февраль и июль рис. 4,5).

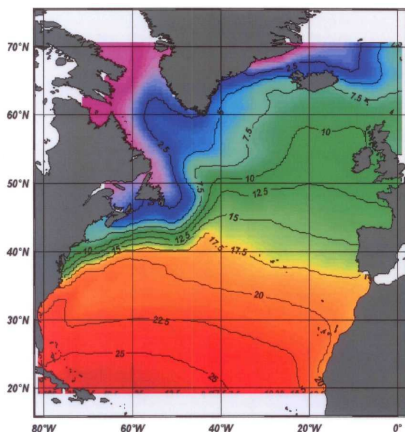


Рис.2. ТПО Северной Атлантики в феврале.

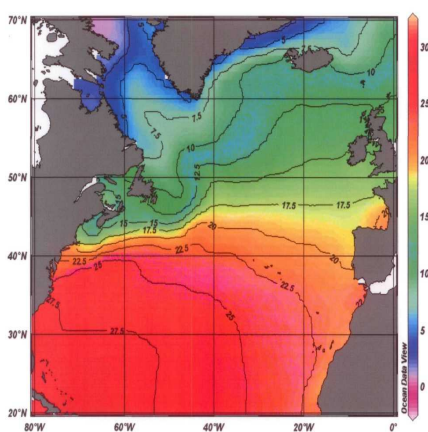


Рис 3. ТПО Северной Атлантики в июле.

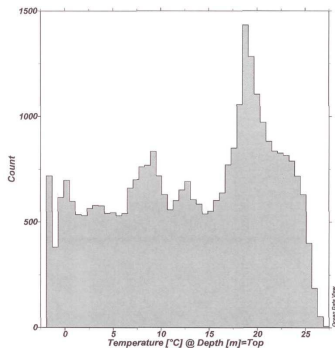


Рис.4. Гистограмма распределения температуры воды на поверхности в Северной Атлантике в феврале.

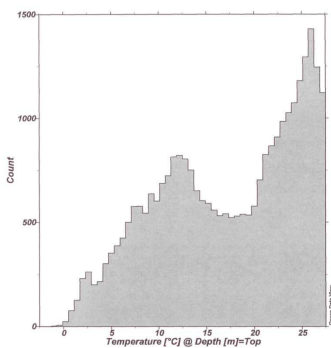


Рис.5. Гистограмма распределения температуры воды на поверхности в Северной Атлантике в июле.

Полугодовая волна в колебаниях поверхностной температуры везде выражена достаточно хорошо, хотя соотношение между амплитудами волн с годовым и полугодовым периодами неодинаково.

По данным измерений со спутников были вычислены среднегодовые значения температуры по всему региону наших исследований (область Северной Атлантики от 20° с.ш. до границы сплошных льдов) (рис.6).

Из графика видно, что за время измерений температура исследуемой акватории океана поднялась в среднем на 0,16°C. По этим данным было построено уравнение среднеквадратической регрессии (сплошная линия на рис.15). Коэффициент корреляции оказался равным 0,49.



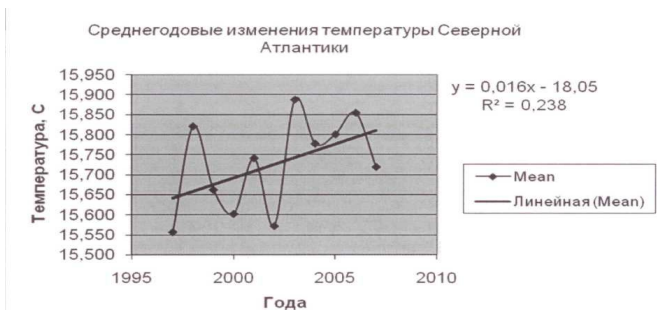


Рис. 6. Среднегодовые изменения температуры

Анализ используемого массива данных позволяет констатировать, что в исследуемом районе наблюдалось повышение температуры поверхности океана, влияние антропогенного фактора считаем не значимым в этом процессе. Для более надежного суждения о том, реально ли повышение ТПО в данном районе Мирового океана, нужно рассматривать более длинный временной ряд.

Построенные карты средней температуры поверхности Северной Атлантики за 10 лет и средние квадратичные значения, позволили выделить районы океана с наибольшей и наименьшей сезонной изменчивостью (рис. 7,8).

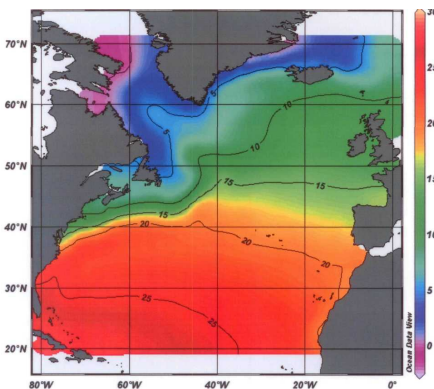


Рис. 7. Средняя температура поверхности Северной Атлантики за период 1997 – 2007 гг.

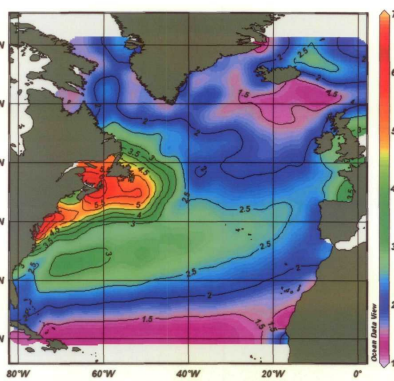


Рис. 8. Средние квадратичные значения температуры поверхности Северной Атлантики

Наибольшая амплитуда колебаний поверхностной температуры воды наблюдается в средних широтах у берегов Северной Америки. В районе Большой Ньюфаундлендской банки на широте порта Сент-Джонс зимой температура воды отрицательная (около  $-1^{\circ}\text{C}$ , в отдельные годы и ниже). Летом среднее многолетнее значение на поверхности  $11^{\circ}\text{C}$ . У берегов Новой Шотландии амплитуда больше. К югу от порта Галифакс она достигает  $15\text{--}16^{\circ}\text{C}$ , по направлению к тропику убывает, на широте  $30\text{--}33^{\circ}$  она равна только  $9^{\circ}\text{C}$ . В восточной части Северного полушария амплитуда

сезонных колебаний поверхностной температуры на соответствующих широтах значительно меньше. В Бискайском заливе и на широте Пиренейского п-ова она составляет 5—6° С. У побережья Северной Африки еще меньше.

Сезонные колебания поверхностной температуры воды в районе географического экватора выражены хорошо и связаны с сезонным ходом атмосферных процессов. Их амплитуда составляет 1—2° в западной части океана и достигает 6° в Гвинейском заливе, где температура воды в августе понижается до 23—24°, тогда как в феврале она достигает 29° С.

Особенностью экваториальной зоны является то, что она охвачена областью пониженного давления (экваториальная ложбина), расположенной между двумя стационарными субтропическими антициклонами. На экваториальной периферии антициклонов находятся зоны пассатных ветров, меняющие в зависимости от сезона положение по широте. В зимний и летний периоды экваториальная ложбина характеризуется слабыми ветрами (1—2 м/сек), неустойчивыми по направлению. Однако летом ось ложбины смещается к северу примерно на 10°, и вся зона экватора оказывается охваченной юго-восточным пассатом, что приводит к увеличению скорости ветра по сравнению с ее зимним значением [2].

Анализ, полученного набора карт распределения поверхностной температуры в Северной Атлантике за 10 лет (с 1997 по 2007) по спутниковым данным архива OI.v2.SST NOAA, позволяет констатировать, что:

– за последние 10 лет поле поверхностной температуры Северной Атлантики качественно не изменилось;

– наибольшие колебания поля ТПО наблюдаются, как и ранее, в районах схождения теплого течения Гольфстрим и холодного Лабрадорского, а наименьшие - в Норвежском и Карибском морях;

– средняя температура поверхности океана в рассматриваемом районе Мирового океана несколько повысилась (на 0,16°С), Коэффициент корреляции оказался равным 0,49.

*Благодарности: Работа выполнена при поддержке ФЦП МО 2009/03 10050к.*

### Литература

1. Атлас океанов. Атлантический и Индийский океаны. М.: ГУНИО, 1977, кар. 128-139.
2. Галеркин Л.И., Гриценко А.М., Панфилов С.Г., Ямпольский А.Д. Внутригодовая изменчивость температуры и положения термического экватора в Атлантическом океане // Метеорология и гидрология. М., 1999. № 11.
3. География Мирового океана. Атлантический океан / Под ред. Корт В.Г. и др. Л.: Наука, 1984. 585 с.
4. Нестеров Е.С. Сезонные особенности формирования аномалий температуры поверхности океана в Северной Атлантике. // Метеорология и гидрология. М, 2005. № 9.
5. Тимонов В.В. Очаги взаимодействия океана и атмосферы. — Тр. ЛГМИ, вып. 321 Л., 1970, с. 69-75.
6. Угрюмов А.И. Тепловой режим океана и долгосрочные прогнозы погоды. — Л.: Гидрометеиздат, 1981.— 176 с.
7. Шулейкин В. В. Физика моря. М., «Наука», 1968.
8. <http://irid.ldeo.columbia.edu/SOURCES/.IGOSS/.nmc/.ReynSmithOIv2/.monthly>

ЧЕЛОВЕК И ТРИ ОКРУЖАЮЩИЕ ЕГО СРЕДЫ.  
ЧЕТЫРЕ ТОМА АТЛАСА ВРЕМЕННЫХ ВАРИАЦИЙ

А.Г. Гамбурцев

*Учреждение Российской академии наук Институт физики Земли  
им. О.Ю. Шмидта РАН*

Биосферу, другие геосферы, Космос рассматривают как ансамбли открытых нелинейных динамических систем. В рамках этой модели изучаемые сферы характеризуются нестационарностью временных вариаций, нелинейными свойствами, способностью к самоорганизации и хаотизации.

Обычно в экологии, в ряде других дисциплин, под окружающей средой понимают природную окружающую среду. И когда говорят об охране окружающей среды, то всегда имеют в виду только природную окружающую среду. Но мы живем не только в природной среде, но и в созданных человечеством антропогенной и социальной средах, которые так же, как Земля и Солнечная система входят в состав Универсума. Можно говорить о том, что мы живем в окружении трех сред: природной, антропогенной и социальной, и на нас в той или иной степени влияют все процессы, которые протекают в этих средах, особенно, конечно в тех их частях, которые дали нам жизнь и продолжают снабжать нас всем необходимым, в том числе солнечным теплом и светом, подходящим составом атмосферы, гидросферой, литосферой и ландшафтом, биотой.

Человек, находясь в уникальных и исключительно благоприятных условиях, реагирует на изменяющиеся во времени воздействия со стороны окружающих его сред. Если говорить об отрицательных сторонах взаимодействия человека с Универсумом, то эти взаимодействия могут иметь самые разнообразные отрицательные последствия, такие, как гибель при землетрясениях и наводнениях, простудные заболевания при сквозняке, экономические кризисы в результате чьего-то злого умысла или неправильных экономических действий, развитие психологического стресса при действиях террористов, войны и революции при определенных экономических и политических условиях, рост преступности, падение нравственности и появление колдунов в критические периоды или при слабых действиях государства и пассивности общества.

Если мы хотим продвинуться в проблеме прогнозирования неблагоприятных явлений, процессов и событий и их предотвращения, то нужно решить главную задачу - понять взаимосвязи между процессами, их динамику в комплексе. Именно на это направлена деятельность по созданию новых томов Атласа временных вариаций. Вопросы, связанные с междисциплинарным, комплексным исследованием динамики процессов в трех средах рассматриваются в томах Атласа временных вариаций (1994, 1998, 2002, 2009 гг.) и книге «Экология человека в изменяющемся мире» [Агаджанян и др., 2008]. В первых трех томах рассматривались процессы в широчайшем временном диапазоне – от миллисекунд до сотен миллионов лет. В этих томах вопросам, связанным с влиянием внешних воздействий на здоровье и качество жизни человека уделялось с каждым томом все большее место. Наконец, четвертый том, опубликованный только что, получил подназвание «Человек и три окружающие его среды». Мы думаем такое же подназвание

дать и следующему, пятому тому. 4-й том содержит две части, в первой из них рассмотрены вариации процессов, протекающих в окружающих нас средах, а второй – вариации медицинских параметров, в том числе количество вызовов скорой помощи (ВСП) в Москве, вариации физиологических параметров у отдельно взятых людей.

Большой вклад в изучение различных аспектов этих проблем замечательные ученые разных направлений и поколений. Среди них: Ю.Н. Авсюк, Н.А. Агаджанян, В.В. Адушкин, Б.С. Алякринский, С.Л. Афанасьев, В.В. Белоусов, А.А. Богданов, Т.К. Бреус, В.И. Вернадский, Б.М. Владимирский, Н.Н. Вороноцов, О.Г. Газенко, Г.А. Гамбурцев, А.И. Григорьев, Т.Б. Дмитриева, А.М. Звягинцев, С.П. Капица, В.И. Кейлис-Борок, Ю.Л. Климонтович, Ф.И. Комаров, Н.Д. Кондратьев, А.А. Конрадов, В.М. Котляков, П.Н. Кропоткин, Г.М. Крученицкий, М.И. Кузьмин, О.Л. Кузнецов, С.П. Курдюмов, Ф.А. Летников, А.А. Любушин, Г.Г. Малинецкий, А.А. Маловичко, Е.Е. Милановский, Н.Н. Моисеев, М.В. Невский, И.Л. Нерсесов, А.В. Николаев, Н.И. Николаев, С.П. Перов, В.М. Петров, Г.Н. Петрова, И.Р. Пригожин, Ю.М. Пушаровский, С.И. Рапопорт, А.Б. Ронов, Д.В. Рундквист, В.А. Садовничий, Н.С. Сидоренков, С.И. Степанова, А.Д. Сытинский, Е.В. Сюткина, А.М. Тарко, Н.В. Тимофеев-Ресовский, В.Е. Хаин, Г. Хакен, Ф. Халберг, С.А. Федотов, С.С. Четвериков, В.А. Черешнев, А.Л. Чижевский, А.В. Шнитников, С.Э. Шноль, Ю.К. Щукин, Ю.В. Яковец, А.Л. Яншин. Многие из них написали свои главы для Атласа. Среди авторов есть и государственные деятели: А.И. Бедрицкий, Г.Г. Онищенко, С.К. Шойгу. Всего в Атласе более 300 авторов. Большую работу в работе над Атласом провели сотрудники ИФЗ РАН: С.И. Александров, О.И. Аптикаева, О.В. Олейник. Решающую поддержку мы получили от Н.П. Лаврова. Первые три тома вышли под его общей редакцией.

#### **Атлас временных вариаций как феномен**

Существуют разные виды атласов. Среди них – атласы географические для Земли и Луны, планет, их отдельных частей, атласы звездного неба, анатомические и другие атласы. В этих атласах графически изображаются особенности природных или иных объектов, позволяющие понять их структуру, определять расстояния между объектами, путь из одного места в другое. Но до сих пор не было атласов, которые показывали бы важные для науки и практики особенности протекания процессов *во времени*. Мы надеемся, что создание многотомного Атласа временных вариаций будет способствовать уменьшению разобщенности между науками, позволит установить некоторые не известные ранее закономерности динамики процессов в разных сферах, установить общие и частные черты и особенности протекания процессов в природе и обществе в различных пространственных и временных масштабах. В Атласе помещаются фактические данные о протекании различных природных и социальных процессов, результаты обработки временных рядов, дается их интерпретация – рассмотрение динамики процессов, их изменчивость, во многих случаях проводится сопоставление результатов, поиски причинно-следственных связей.

Идея создания атласа временных вариаций возникла в результате работ по сейсмическому мониторингу литосферы в Южном Таджикистане в связи с проблемой прогноза землетрясений. Эти работы продолжались в течение 8 лет [Гамбурцев, 1992]. За это время помимо получения непосредственных интереснейших геолого-геофизических результатов, удалось сделать более важное – поставить

междисциплинарную проблему создания атласа временных вариаций природных, антропогенных и социальных процессов. Идея оказалась плодотворной. Об этом свидетельствует тот интерес к Атласу, который проявляется со стороны ученых и практиков разных специальностей, студентов и аспирантов.

### **Цели и задачи**

**Цели.** Взятая направление преследует две следующих важных цели.

1) Фундаментальная научная цель: понять закономерности динамики различных процессов в разных сферах во всей сложности постоянно изменяющихся прямых и опосредованных связей между процессами, продвинуться по пути решения проблем, связанных с прогнозированием будущих явлений и процессов.

2) Практическая цель: способствовать защите биосферы и человека, развитию цивилизации, укреплению здоровья и качества жизни людей путем прогнозирования неблагоприятных явлений в космосе, литосфере, атмосфере, гидросфере, биоте, антропосфере, социальной сфере; предотвращения катастроф и/или уменьшения ущерба от них, сбалансированного природопользования, не нарушающего гармонию природы и в то же время достаточно эффективного. Если сказать коротко, главная цель, которую мы преследуем, - это способствовать выживанию, оздоровлению, безопасности и социальному благополучию населения России, ее устойчивому развитию. Одной из важнейших задач в рамках этого направления является задача развития системного медико-экологического мониторинга.

Для достижения указанных целей необходимо изучить и проанализировать особенности фонового и аномального протекания природных процессов без участия и с участием антропогенных воздействий, установить причинно-следственные связи между процессами, найти пути к прогнозированию будущих процессов и явлений. Необходимо изучить закономерности процессов во всех трех окружающих нас средах, особенно связанные со здоровьем и качеством жизни людей, их связи с процессами в природе и обществе. Это сложные задачи, и мы пытаемся участвовать в их решении. Наши подходы заключаются в комплексном анализе фактических данных о временных и пространственно-временных процессах в природе и обществе. Такие попытки отображены в томах Атласа.

Проведен большой цикл междисциплинарных исследований динамики процессов в природе и обществе в широчайшем диапазоне пространства и времени. Мы смогли установить неизвестные ранее закономерности, упорядочить некоторые взгляды на характер динамики в различных – живых и неживых – объектах и их совокупностях как в открытых динамических системах.

**Обработка временных рядов** проводится унифицированными способами анализа *нестационарных процессов*, в значительной мере по программам С.И. Александрова [Атлас..., 2009]. Используются различные методы анализа: спектрально-временной, спектральный, корреляционный, анализ фазовых портретов и др. Обработка методом спектрально-временного анализа (СВАН), проводится для подавляющего большинства временных рядов; это способствует лучшему сопоставлению особенностей динамики процессов.

### **Закономерности динамики природных и других процессов**

Исследования выявили ряд универсальных закономерностей динамики протекающих в реальном мире процессов в широчайшем диапазоне масштабов простран-

ства и времени. Режимы изменений различных показателей в разных сферах имеют ряд общих свойств; в то же время они индивидуальны, имеют свои характерные особенности, которые могут изменяться во времени. На основании результатов обработки многих тысяч временных рядов, а также существующих публикаций нами составляется свод свойств (закономерностей) динамики процессов, протекающих в разных сферах, в разных пространственных и временных масштабах, сделаны заключения об общих и индивидуальных свойствах динамики различных процессов, протекающих в природе и обществе. Это позволяет проводить анализ самых различных материалов одними и теми же методами, проводить сопоставления. Ниже приводится свод основных (как это нам представляется в настоящее время) свойств развития динамики процессов в окружающих человека средах и в показателях здоровья человека.

### **Общие черты.**

1) Изменения состояния объектов биосферы и других сфер характеризуются различными типами временных вариаций – трендовыми, ритмическими, импульсными и шумовыми, а также изменениями уровня. Структура наблюдаемых временных рядов, имеющая обычно сложную форму, часто в большой степени бывает обусловлена суперпозицией доминирующих в этих рядах гармоник (хотя принцип суперпозиции работает не всегда). Характер суперпозиции может быть как конструктивным, так и деструктивным. Конструктивная суперпозиция может привести к большому, даже критическому отклонению вариаций.

2) Ритмичность – один из важнейших компонентов упорядоченного состояния биосферы и ее частей. Величины ритмов варьируют в очень широких пределах. Одновременно процессы могут характеризоваться множеством ритмов (*полиритмичность*), находящихся в определенных иерархических соотношениях, однако в некоторые интервалы времени могут доминировать один из них или группа ритмов, которые могут сменяться (при этом для земных условий основные ритмы – это суточный, недельный, годовой и 11-летний). Можно сказать, что процессам свойственна *переменная полиритмичность*.

3) Реакция биосферы и ее объектов на внешние воздействия часто носит нелинейный характер и изменяется во времени. Нелинейность среды обусловлена постоянным движением, взаимодействием и неустойчивостью элементов среды в условиях воздействий, в том числе слабых, со стороны различных источников. Характер и сила реакции могут не соответствовать внешним воздействиям. Это вообще характерно для систем, находящихся в неустойчивом или критическом состоянии, – они могут реагировать на внешние воздействия – даже на очень слабые – аномально сильно. Очень важно то, что в природных и других системах мы сталкиваемся с полиритмичными и нестационарными процессами, причем в разных сферах и в разных регионах Земли выраженность и временная устойчивость этих ритмов разная. Примером может служить различная изменчивость атмосферного давления – в разных регионах мира она может различаться по величине и характеру смены режимов.

4) Реакция биосферы и ее объектов на внешние воздействия носит избирательный характер, т.е. биосфера и ее объекты не реагируют на все воздействия одновременно, при этом чувствительность к разным воздействиям изменяется во времени. Имеет место избирательная реакция конкретного объекта на внешние воздействия: объект каждый раз “выбирает” из многих воздействий то,

на которое он будет реагировать прежде всего. При этом другой – пусть даже почти такой же, соседний, – объект может «избрать» себе другой режим изменений. Определенную роль может играть и собственная частота объекта. Это касается разных объектов – слоев и блоков литосферы, объемов атмосферы, отдельных людей, обществ, разных контингентов больных.

5) В разные интервалы времени один и тот же объект биосферы может реагировать на одинаковые воздействия по-разному. Отдельно взятый объект может проходить через один или несколько видов реакции.

6) Причины изменения реакции биосферы и ее объектов на воздействия обусловлены не только изменением характера воздействий, но и свойствами самих объектов. Это означает, что способность конкретного объекта воспринимать внешнее воздействие зависит от его внутреннего состояния в конкретный момент, от готовности именно в данное время откликнуться на данное внешнее воздействие.

7) Одна из причин изменения доминирующих ритмов – *десинхронизация (или ресинхронизация) процессов*, которая может быть вызвана сильными стрессами, например, в земной коре – сильными землетрясениями или ядерными взрывами, в организме человека – физическими или психологическими стрессами. В медицине этот термин применяется чаще всего к системообразующему суточному – циркадианному ритму.

8) Для биосферы и ее объектов характерны самоорганизация и хаотизация. Самоорганизация проявляется, в частности, в установлении стабильных и продолжительных ритмических изменений состояния среды, хаотизация – в усложнении характера ритмических изменений, вплоть до их исчезновения. Смена относительно упорядоченных и хаотических состояний также происходит то ритмично, то беспорядочно. Из-за смены режимов в ряде случаев могут наблюдаться переменные корреляционные связи, когда два процесса на одних отрезках времени характеризуются большими положительными коэффициентами корреляции, на других, – наоборот большими отрицательными коэффициентами корреляции, а на третьих – вообще отсутствием коррелированности.

9) В конкретном временном интервале каждый отдельно рассматриваемый объект биосферы имеет свои собственные режимы изменений. В то же время имеют место общие черты протекания процессов у разных объектов, в том числе разнородных и разномасштабных, находящихся в разных частях земного шара. Эти общие черты могут быть вызваны глобальными причинами.

10) Эффект от внешнего воздействия на отдельно взятый объект часто характеризуется большей амплитудой, большей контрастностью и упорядоченностью, чем эффект воздействия на совокупность объектов, когда становится трудно установить однозначные соответствия или найти значимые корреляции между рядами внешних факторов и реакцией объектов. Объекты обладают индивидуальными режимами, но для совокупности объектов индивидуальные эффекты смешиваются.

11) Большую роль играет степень индивидуальных восприятий внешних стрессорных воздействий и способность к адаптации к этим воздействиям.

**Различительные черты** динамики процессов – это разная их выраженность: разные амплитуды, контраст, степень зашумленности, различная продолжительность прослеживания ритмов.

\* \* \*

Таким образом, можно с достаточной долей уверенности считать, что определен свод особенностей динамики разных процессов, среди которых (особенностей) есть неизвестные ранее. Непосредственным толчком к развитию некоторых чрезвычайных ситуаций в разных масштабах могут быть неожиданные – как сильные, так и слабые природные, техногенные или социальные события. Разные объекты по-разному реагируют на динамику внешних воздействий. Если говорить о литосфере, то такими объектами являются разные слои или блоки горных пород разного размера, причем особенно сильно реагируют наиболее неоднородные участки – зоны разломов или месторождения углеводородов.

По-разному реагируют на динамику внешних воздействий различные контингенты больных. Наиболее уязвимыми, по-видимому, можно считать больных такими заболеваниями, как гипертоническая болезнь, сердечно-сосудистые нарушения, заболевания желудочно-кишечного тракта и т.д. Реакция одних и тех же больных на близкие по своим характеристикам воздействия в разное время может быть различной. Реакция разных больных на одно и то же воздействие также может быть различной. Этот вывод является достаточно общим.

Один из важнейших вопросов – это вопрос о причинно-следственных связях между процессами, в частности между процессами, протекающими в трех окружающих нас средах и процессами, описываемыми медицинскими показателями. Этот вопрос разрабатывается давно, и продвижение в его решении идет медленно. Понятно, что влияние некоторых процессов на медицинские показатели бесспорно, – это касается, например сильнейших стрессов, вызванных какими-то причинами, в результате чего у некоторых людей возникает острый сердечный приступ. Есть процессы, которые влияют на некоторые группы людей, хотя могут не относиться к каждому человеку из этих групп. Примером может служить увеличение количества вызовов Скорой помощи (ВСП) в зимнее время по сравнению с летним.

Мы пытаемся быть сугубо осторожными с установлением причинно-следственных связей заболеваний или других явлений с неритмическими, внезапно возникающими событиями, такими, как магнитные бури, ураганы, социальные потрясения. С нашей точки зрения нельзя рассматривать вариации медицинских показателей в связи только с каким-то одним фактором, хотя в некоторых случаях такие связи бесспорны.

### **О необходимости развития и использования системного эколого-медицинского мониторинга**

Известно, что состояние здоровья и качества жизни населения Российской Федерации неблагоприятно, несмотря на имеющиеся сейчас положительные тенденции. Положение усугубляется участвующими природными и техногенными катаклизмами, локальными войнами, террористическими актами. Громадную роль играют современные природно-техногенные факторы, связанные с возрастающим влиянием электромагнитных, вибрационных и других полей искусственного генезиса – мирного и военного, с возрастающим риском природно-техногенных катастроф. Угрожающие формы приняло влияние наркотиков, алкоголя, психических форм террора. В то же время до сих пор мониторинги в разных сферах большей частью проводятся изолированно друг от друга, полученные данные обрабатываются по-разному, а результаты обработки недостаточно сопоставляются, отсутст-



ует их комплексный анализ. Более полную картину могут дать комплексные системные мониторинговые исследования, проводимые по единой согласованной программе с использованием совместной унифицированной обработки всего массива данных. Вопрос о создании системного космического–геодинамического–экологического–социального–медицинского мониторинга (для краткости - системного эколого-медицинского мониторинга – СЭМ) был поставлен еще в 1997 г. [О проведении..., 1998]. К сожалению, положительное Решение двух Межведомственных Комиссий Совета Безопасности носило рекомендательный характер, но до сих пор не потеряло актуальности.

Опубликованные тома Атласа временных вариаций, книга «Экология человека в изменяющемся мире», созданные сотрудничеством ученых разных направлений, во многом приблизили нас к поставленной цели. Представляется, однако, что пока эти положительные тенденции еще не вполне осознаны обществом и, конечно, не в состоянии переломить инерцию деструктивных процессов в демографической сфере, экономике, в области здравоохранения, промышленности, моральной сфере, сферах образования, науки и культуры.

Представляется, что наряду с принимаемыми мерами по улучшению ситуации в стране, необходимо проведение научно обоснованных специально направленных природозащитных, профилактических, организационных, лечебных, социальных мероприятий, основанных на знании причинно-следственных связей между процессами, что позволит повысить эффективность прогнозирования будущих неблагоприятных процессов и явлений.

### **Несколько примеров**

Воздействия разных факторов на число вызовов скорой помощи в зимние и летнее время. На рис. 1 приведены ряды некоторых природных процессов, которые могут оказывать влияние на здоровье людей и ряды количества вызовов скорой помощи (ВСП) по ряду заболеваний (данные Н.С. Сидоренкова, А.А. Любушина и др., Н.Н. Новиковой).

Ряды по числам Вольфа свидетельствуют об изменениях солнечной активности. Геомагнитный индекс  $A_p$  описывает оценку возмущений магнитного поля Земли. Рассмотрены ряды индекса патогенности  $J$  и эффективной температуры  $E_T$ , описанные Н.Н. Новиковой с соавторами в работе [Атлас..., 2002, с. 361-364]. Индекс  $J$  учитывает показатели влажности, ветра, облачности, межсуточного изменения атмосферного давления и температуры. Величина  $E_T$  показывает степень температурной комфортности человека. Изменения угловой скорости вращения Земли  $\nu$  обусловлены процессами, протекающими в атмосфере, гидросфере, жидком ядре, а также лунно-солнечными приливами [Атлас..., 1994; 1998; 2002]. Эти графики имеют характерные особенности. Форма ряда скорости вращения Земли характерна тем, что в течение года наблюдается один достаточно острый непродолжительный максимум и один широкий минимум, несколько осложненный локальным январским максимумом. Временной ряд чисел Вольфа имеет ярко выраженный 10-12-летний ритм, и некоторые другие, менее выраженные. В рассматриваемый интервал времени попала минимальная часть графика, и начало его подъема. Три ряда имеют четкий годовой ритм. Ряд вариаций скорости вращения Земли имеет также околосесячный, околоразомесячный, и околонедельный ритмы. Некоторые ряды имеют заметные выбросы – это относится к ряду индекса  $A_p$ ,

индексу патогенности J (выбросы вверх), к ряду ET (выбросы вниз), а также к ряду вариаций атмосферного давления (выбросы вверх и вниз).

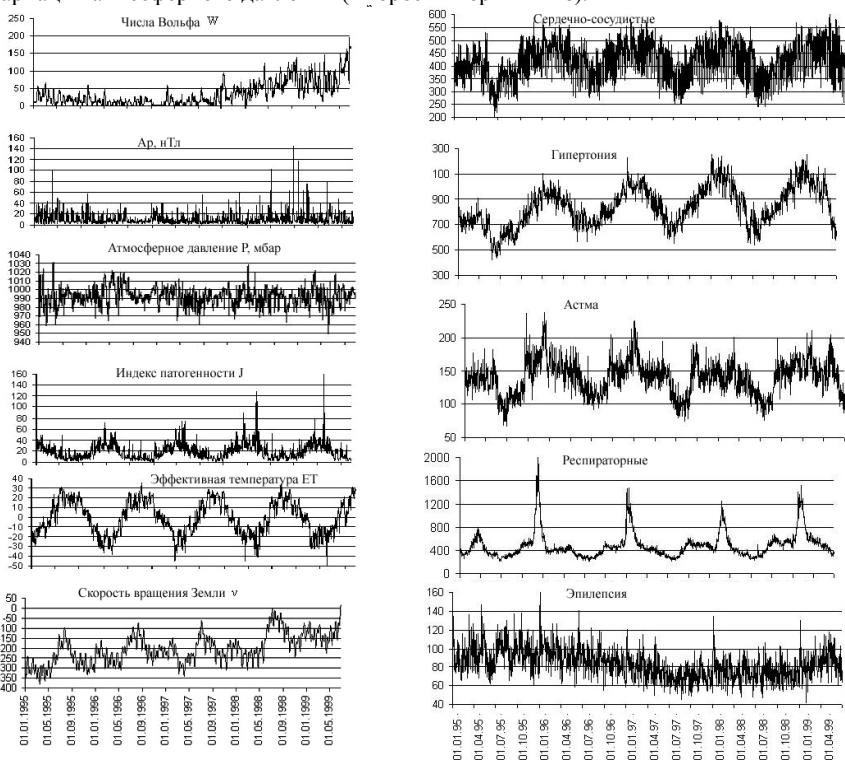


Рис. 1. Временные ряды некоторых природных процессов (солнечная активность – числа Вольфа W, геомагнитный индекс Ar в нанотеслах, атмосферное давление в миллибарах, индекс патогенности J, эффективная температура ET° в градусах по Цельсию, скорость вращения Земли v и вызовов Скорой помощи в Москве по случаям сердечно-сосудистых заболеваний, гипертонии, астмы, респираторных заболеваний и эпилепсии. Январь 1995 – июнь 1999 г.

Большинство обработанных нами рядов ВСП в Москве имеют годовой ритм, осложненный флуктуациями [Атлас..., 2009]. Некоторые из этих рядов показаны на том же рисунке. Количество вызовов по многим заболеваниям увеличивается зимой и весной, а летом уменьшается. Графики имеют не очень выраженную двугорбую форму (более четко она видна на графиках с месячным опросом) с минимумом в летнее время. На рисунке для ВСП по случаю астмы графики трехгорбые с максимумами осенью, зимой и весной. В статье [Гамбурцев, Горбаренко, 2009] высказано предположение о том что, скорее всего, причина большой разницы между числом ВСП летом и зимой заключается в том, что зимой в отличие от лета наблюдаются значительно большие и быстрые перепады атмосферного давления.

Это подтверждает рис. 2, на котором показаны фазовые портреты величин атмосферного давления отдельно для каждого сезона в течение января 1995 – февраля 1999 гг. На горизонтальных осях показаны значения атмосферного давления  $P_n$ , на вертикальных – значения  $P_{n-1}$ , т.е. значения атмосферного давления за соседние сутки – «сегодня» и «вчера». Траектории построены в одном и том же масштабе с шагом в один день. Видно, что процесс изменения величин атмосферного давления во времени зимой и летом сложен и хаотизирован. Четко видно, что летом траектории на фазовых портретах группируются сравнительно тесно, а зимой значительно больше разбросаны. Это также свидетельствует о том, что разбросы рассматриваемых величин в разное время года различно. Летом разбросы самые маленькие, а зимой – самые большие. Разбросы весной и осенью занимают промежуточное место. В ряде случаев они становятся соразмерными с зимними (например, для атмосферного давления весной 1995 г.), а иногда – с летними (весна 1996 г.).

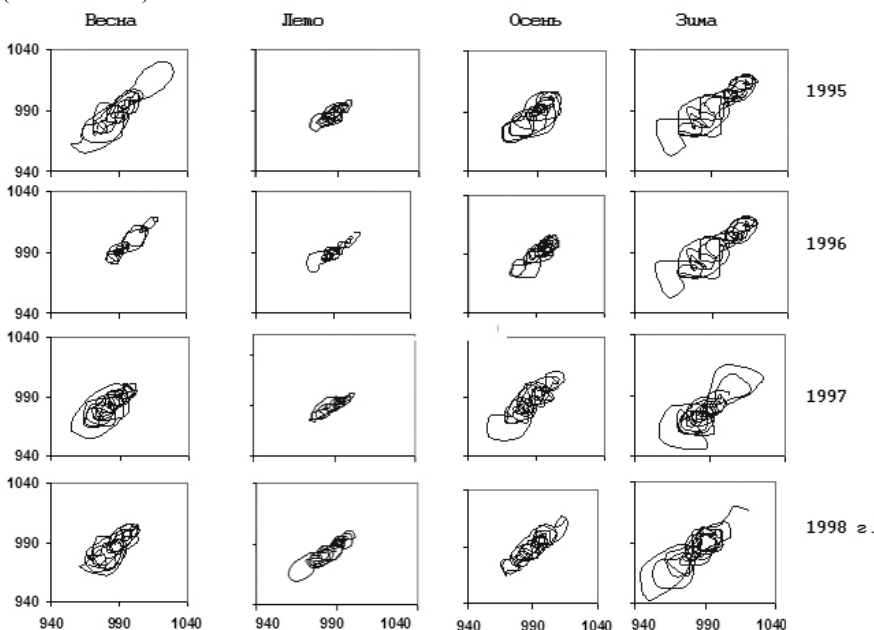


Рис.2. Фазовые портреты, построенные для рядов величин атмосферного давления в Москве по данным метеонаблюдений географического факультета МГУ для четырех сезонов 1995 – 1999 гг.

Как отмечено в книге [Справочник..., 2003, с. 209], изменения давления более чем на 6 мбар могут вызвать резко выраженные метеотропные реакции у людей, а «на дни с изменениями внешнего давления более 10 мбар, как правило, приходится максимумы ВСП с диагнозом «стенокардия и гипертония». Мы же наблюдаем и испытываем на себе быстрые изменения давления, достигающие в

течение одних суток 25 мбар и выше, и в течение нескольких суток - 40 мбар и выше. Все временные ряды кроме одного – среднесуточной величины атмосферного давления – имеют хорошо выраженный годовой ритм. Годовой ритм характерен для большинства ВСП Москвы однако, не для всех [Агаджанян и др., 2006]. Причем, разные заболевания характеризуются своими собственными формами и особенностями временных рядов.

Вернемся к рис. 1, и сопоставим некоторые особенности графиков – рядов с параметрами некоторых внешних воздействий на человека и его реакций. Влияние чисел Вольфа и индексов геомагнитной активности на число заболевших не отмечается. Очень сильны ритмы, связанные с сезонными изменениями эффективной температуры и индекса патогенности. Форма ряда для астмы очень похожа на форму ряда для скорости вращения Земли; коэффициент корреляции (КК) получился очень большим, статистически значимым и равным  $-0.46$  при более чем 1600 точек в каждом ряде и почти нулевом сдвиге. Но это, конечно не говорит о причинно-следственной связи между этими процессами. Интересно то, что КК в скользящем временном окне изменяется очень мало. Однако в связи с сезонными особенностями поведения каждого из исследуемых здесь параметров можно усомниться в существовании причинно-следственной связи между ними. Недельный и полунедельный ритмы (наряду с другими) в заболеваниях был замечен давно. Т.К. Бреус с соавторами отмечает наличие этих ритмов в сердечных заболеваниях [Атлас..., 1998, с. 323-334 и др.] и считает, что в значительной степени они обусловлены природными воздействиями. Эти ритмы для разных заболеваний сильно отличаются амплитудами, датами их изменений, степенью устойчивости. Дальнейший анализ большого количества материалов по ВСП в Москве показал наличие этих ритмов практически во всех случаях. Он есть и в рядах криминальных событий [Атлас..., 2002]. Бесспорно, большую роль в формировании этих ритмов играет социальный фактор, но влияние природных причин здесь, возможно, также имеет место (этот ритм присутствует в рядах вариаций геомагнитных индексов и скорости вращения Земли).

Анализ более продолжительных временных рядов ВСП Москвы по случаю инфаркта миокарда с месячной дискретностью показал, что хорошо выраженная двугорбая форма графиков устойчива во времени. Количество заболеваний увеличивается в зимнее и весеннее время (январь и март) и, количество случаев зимой и весной превышает количество случаев летом примерно в 1.5-2 раза. Заметим, что по данным Центральной клинической больницы (ЦКБ) РАН в Москве это отношение достигает 5–7. Столь большие различия могут быть связаны с преобладанием пожилого и хрупкого контингента пациентов ЦКБ.

Возможное влияние краткосрочных воздействий. В течение каждого года имеются особые дни, которые влияют на жизнь и здоровье больших групп населения. К ним относятся некоторые праздники, особенно встреча Нового Года, 8 марта, день начала нового учебного года. В некоторые годы к ним относятся и некоторые другие особые дни, например, сильнейший ураган 21 июня (в дни около 21 июня произошли резкие изменения атмосферного давления). Для того чтобы показать особое влияние того или иного особого дня или отрезка времени, рассмотрим фрагменты временных рядов, так, чтобы в поле зрения были интервалы времени *до и после* события.

Нами проанализированы временные ряды по изменению атмосферного давления в Москве в интервал времени, включающий памятный ураган 21 июня 1998 г. и по числу ВСП по случаю гипертонии. Атмосферное давление в течение 16 июня – 4 июля дважды сильно понижалось. При этом в обоих случаях заметно увеличивалось число вызовов скорой помощи - более чем на 30%.

На рис. 3 показаны годовые фрагменты временных рядов числа ВСП в Москве по случаям обострения гипертонической болезни за 4 года с суточной частотой опроса. Декабрь и январь помещены в середине графиков. Мы видим, что для приведенных фрагментов характерно некоторое уменьшение числа ВСП перед новым годом, а через несколько дней после его встречи - заметный всплеск. Аналогичные результаты получены и для некоторых других случаев.

Представляется, что могут быть две причины появления этого феномена. Первая, и на наш взгляд главная причина, заключается в том, что новогодний праздник – особый, к нему готовятся все, причем эта подготовка идет и на служебном (верстка планов, подготовка и сдача отчетов, поздравления сотрудников, корпоративные вечеринки), и на бытовом уровне (предпраздничный ажиотаж, покупка подарков, подготовка сюрпризов и т.д.). Вторая причина заключается в нарушении жизненного режима – как по приему пищи и алкоголя, так и режима дня. Перед встречей Нового года все заняты, людям не до болезни. А после встречи – люди расслабляются, и у каждого вылезают свои болячки.

Аналогично, но не так выражено, люди реагируют и на приход других праздников. Начало учебного года – 1 сентября – не относится к числу государственных праздников, но и к этому времени приурочены всплески некоторых заболеваний. Реакция гипертоников на начало учебного года была заметной – в 1996 и 1997 гг. количество вызовов увеличилось примерно на 15%. Но это происходило не каждый год. Отмечена также реакция на 1 сентября у больных астмой.

Таким образом, можно с достаточной долей уверенности считать, что установлены ранее неизвестные особенности сезонных и некоторых других изменений медицинских показателей. Можно также с высокой степенью уверенности считать установленным, что непосредственным толчком к развитию некоторых заболеваний являются такие события, как красные дни календаря и неожиданные сильнодействующие природные или социальные события. Различные контингенты больных по-разному реагируют на динамику внешних источников. Наиболее уязвимыми, по-видимому, можно считать больных гипертонической болезнью, сердечно-сосудистыми и нервными заболеваниями и астмой. Отметим, что реакция одних и тех же больных на близкие по своим характеристикам воздействия в разное время может быть различной. Реакция разных больных (даже внутри одного и того же контингента) на одно и то же воздействие также может быть различной. При прочих равных условиях большую роль играет степень индивидуальных восприятий внешних стрессобразующих воздействий и индивидуальных возможностей адаптации к стрессам. Известно, что во время трансляции футбольных матчей у многих поднимается температура, повышается ЧСС и т.д. (зарегистрированы даже смертные случаи!). Этот вывод является достаточно общим, и справедлив не только применительно к медицинским показателям, но и к другим параметрам, в частности относящимся к геологии и геофизике.

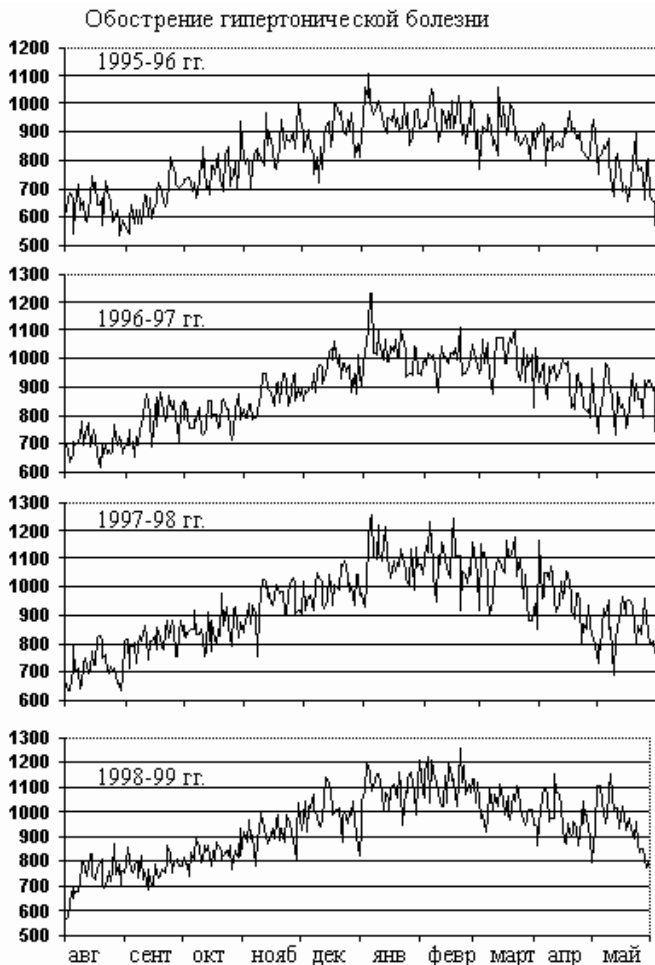


Рис. 3. Годовые фрагменты временных рядов числа вызовов скорой помощи в Москве по случаям обострения гипертонической болезни.

#### Промежуточные итоги

Работа в заданном направлении не закончена. Но ее начало можно считать состоявшимся, она признана многими, хотя пока не получила еще должного развития. Решение, которое было принято Советом Безопасности РФ, как было сказано, носило лишь рекомендательный характер. Тем не менее, можно подвести

некоторые промежуточные итоги исследований динамики процессов в разных сферах. Оказалось, что плоды, оказались довольно увесистыми.

- Проведена (хотя и не закончена) большая междисциплинарная научная работа, в которой исследованы вопросы динамики процессов в природе и обществе в широчайшем временном диапазоне и решается вопрос нахождения причинно-следственных связей между процессами.

- Общество пришло к пониманию того, что те виды мониторинга, которые проводятся в нашей стране, недостаточны, и необходимо развить системный экологический мониторинг. Составлена концепция такого мониторинга, а часть разработок внедрена в практику и в научно-образовательный процесс.

- Сформулированы общие и индивидуальные закономерности, касающиеся динамики процессов в разных сферах.

- Исследованы явления, которые в медицине известны как десинхронизация и ресинхронизация суточного ритма. Это – интересная область, и оказалось, что аналогичные явления имеют место и в других областях знаний.

- Наша деятельность одобрена сообществом ученых. За коллективную работу «Развитие и внедрение системного экологического мониторинга как компонента экологической безопасности» коллективу ученых была присуждена Премия Правительства РФ в области науки и техники за 2006 г., а за коллективную монографию «Экология человека в изменяющемся мире» (2006 г., 2008) авторам присуждена Национальная экологическая премия «Экомир» за 2010 г.

Работа в названном направлении поддержана Программой Президиума РАН «Фундаментальные науки – медицине» 2006-2010 гг.). Издание томов Атласа поддержано РФФИ (гранты за 1994, 1998, 2002, и 2009 гг.).

Работа продолжается, и мы приглашаем читателей принять участие в 5 и следующих томах.

### Литература

1. Агаджанян Н. А., Александров С. И., Антикаева О. И. и др. Экология человека в изменяющемся мире. Екатеринбург: Изд-во УрО РАН, 2006. 572 с.
2. Атлас временных вариаций природных процессов. Т. 1. Порядок и хаос в литосфере и других сферах. М.: ОИФЗ РАН, 1994. 176 с.
3. Атлас временных вариаций природных, антропогенных и социальных процессов. Т. 2. Циклическая динамика в природе и обществе. М.: Науч. Мир, 1998. 430 с.
4. Атлас временных вариаций природных, антропогенных и социальных процессов. Т. 3. Природные и социальные сферы как части окружающей среды и как объекты воздействий. М.: Янус-К, 2002. 652 с.
5. Атлас временных вариаций природных, антропогенных и социальных процессов. Т. 4. Человек и три окружающие среды. М.: ОИФЗ РАН, 2009. 335 с.
6. Гамбурцев А.Г. Сейсмический мониторинг литосферы. М.: Наука, 1992. 200 с.
7. Гамбурцев А.Г. Человек и три окружающих его среды. Четыре тома Атласа временных вариаций // Пространство и время. 2010. № 1. С. 119-134.
8. Гамбурцев А.Г., Горбаренко Е.В. Возможные причины увеличения количества вызовов скорой помощи в зимнее время // Геофизические процессы и биосфера. 2009. Т.8, № 4.

9. О проведении эколого-медицинского мониторинга в регионах с неблагоприятной средой обитания. М.: ОИФЗ РАН, 1998. 44 с.
10. Справочник эколого-климатических характеристик Москвы (по наблюдениям Метеорологической обсерватории МГУ). Том 1. Солнечная радиация, солнечное сияние. Метеорологические элементы и явления, характеристики пограничного слоя атмосферы. Под ред. д.г.н. А.А.Исаева. – М.: Изд-во МГУ, 2003, 305 с.

## ЭФФЕКТИВНОСТЬ АКУСТИЧЕСКИХ ЭКРАНОВ НА НИЗКИХ ЗВУКОВЫХ ЧАСТОТАХ

Гончаренко Б.И., Миронов Р.А.

*Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова*

*Физический факультет*

Отмечено, что в известных работах недостаточно внимания уделено изучению эффективности акустических экранов на низких частотах, когда длина волны сравнима или больше характерного размера экрана. Приведены данные модельных расчетов исследования эффективности акустических экранов на низких звуковых частотах. На основе анализа полученных данных показано, что на низких звуковых частотах на пространственном распределении звукового поля наблюдаются интерференционные эффекты. Изменение эффективности акустического экрана при увеличении расстояния от точки приема до акустического экрана также имеет осциллирующий характер, и эффективность акустического экрана уменьшается при увеличении расстояния от точки приема до акустического экрана. Эффективность акустического экрана возрастает при увеличении частоты излучаемого сигнала.

### Введение

Одним из средств ослабления транспортного шума являются придорожные акустические экраны, получившие в последнее время широкое распространение при проектировании и строительстве транспортных магистралей в больших городах.

Основной характеристикой акустического экрана, определяющей его шумозащитные свойства, является эффективность экрана, которая определяется разностью уровня звука до и после установки экрана и может быть рассчитана по следующей формуле:

$$I_{эфф} = 20 \log \left| \frac{\Phi_A}{\Phi_{экран}} \right|,$$

где  $\Phi_A$  - звуковое поле в точке приемника при отсутствии экрана, а  $\Phi_{экран}$  - при его наличии.

На эффективность шумозащиты влияет множество факторов, которые следует учитывать при моделировании или расчете эффективности экрана.

Так, например, в работе [1] отмечено наличие тени за акустическим экраном, увеличение дифракционных эффектов на краю акустического экрана при уменьшении отношения размеров шумового барьера к длине волны. Установлено также



ослабление области тени при увеличении расстояния от подстилающей поверхности до точки приема. Исследования проводились численно методом граничных элементов на частотах 125 Гц и 1 кГц.

В работе [2] описан модельный эксперимент по изучению эффективности акустических экранов в звукозаглушенной камере. Показано, что на эффективность акустического экрана влияет его высота, а также удаление источника шума от акустического экрана. Удаления расчетной точки от акустического экрана, по мнению авторов, мало влияет на его эффективность.

В работе [3] обобщены факторы, которые влияют на эффективность акустических экранов, полученные при натурных измерениях и расчетным путем. Отмечается, что эффективность акустических экранов зависит, например, от характеристик дорожного полотна, от состояния окружающей среды (например, атмосферные явления, отражение и поглощение звука поверхностью земли и фасадами зданий, влияние зеленых насаждений, рельефа местности). Отмечено также, что эффективность экранов зависит от характеристик самого экрана (высоты и длины экрана), его расположение относительно источника и приемника шума, его звукоизоляции и звукопоглощения и конструкции самого экрана.

Авторы отмечают, что большинство расчетных моделей не учитывают протяженности источника, отражения звука от транспортного потока, отражение от экранов на другой стороне дороги - подобные переотражения, как отмечают авторы, значительно увеличивают долю звуковой энергии, дифрагированной на верхней кромке барьера, на больших расстояниях существенную роль начинает играть температурный и ветровой градиенты.

В известных работах недостаточно внимания уделено изучению эффективности акустических экранов на низких частотах, когда длина волны сравнима или больше характерного размера барьера, это связано с тем, что большинство авторов представляет результаты исследования в децибелах шкалы "А", однако в этом случае теряется информация о низкочастотных составляющих спектра.

Одним из инструментов численного исследования рассеяния звукового поля акустическим экраном, является метод граничных элементов [4]. Этот метод показывает хорошие результаты применительно к задачам рассеяния волн на препятствии, поэтому именно он был нами выбран для расчетов.

Проведены численные расчеты, целью которых являлось выяснение общих законов распространения звуковых волн за препятствием в виде экрана прямоугольной формы с абсолютно отражающими поверхностями, источник был точечным, экран находился на абсолютно отражающей поверхности (земле). В качестве изменяющихся параметров выбирались: толщина экрана, расстояние от источника до экрана, высота экрана и длина волны.

Влияние затухания звука в воздухе не учитывалось, поскольку на низких частотах оно мало, также не учитывалось звукопоглощение самого экрана и подстилающей поверхности. Основное внимание было уделено влиянию дифракционных эффектов на картину звукового поля, которые наиболее существенны на низких звуковых частотах.

Значение волнового поля рассматривалось за экраном на высоте 1 м над землей в соответствии с ГОСТ Р 51943 –2002 "Экраны акустические для защиты от шума транспорта".

Задача рассеяния волны на препятствии состояла в нахождении поля отраженного поверхностью препятствия при падении на него волны от некоторого источника. В качестве критерия влияния дифракции рассматривалось соотношение [5]:

$$p = \sqrt{\lambda R} / D$$

где  $\lambda$  - длина волны,  $R$  - расстояние от точки наблюдения до объекта,  $D$  - характерный размер препятствия. При  $p \sim 1$  явления дифракции существенны и их необходимо учитывать, при  $p \ll 1$  - "ближняя зона". При  $p \gg 1$  ("дальняя зона") пучок превращается в сферически расходящуюся волну.

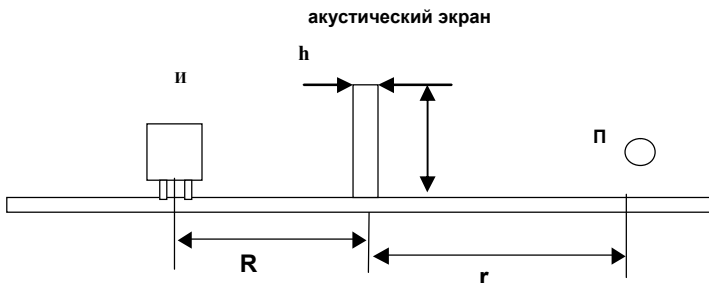


Рис. 1. Модель численного эксперимента

### Результаты и их обсуждение

На рис. 1 показана использованная схема модели, для которой проведены численные расчеты. Буквенные обозначения соответствуют следующим элементам: И, П соответственно положения источника звука и приемника, Н и h – высота и толщина акустического экрана, R – расстояние от источника звука до акустического экрана, r - расстояние от приемника звука до акустического экрана.

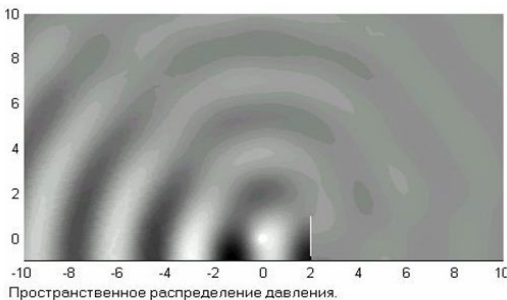


Рис.2. Распределение звукового давления

Рис.2. Пространственное распределение звукового давления

На рис. 2 представлен вид пространственного распределения звукового давления, рассеянного на тонком экране. Под тонким экраном понимается такой, ширина которого много меньше длины волны.

При расчете использовались следующие параметры: источник сферический, длина волны составляла  $\lambda=3.14$  м, ширина акустического экрана -  $h=0.1$  м, высота экрана -  $H=2$  м, высота источника над землей - 1 м, земная поверхность считалась акустически жесткой, значение давления представлено градацией серого цвета.

На рис. 3 представлен пример поля модуля градиента давления для тех же параметров, что и на предыдущем рисунке.

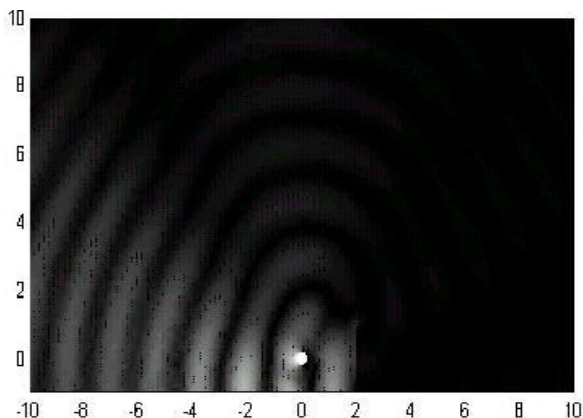


Рис.3. Распределение градиента звукового давления.

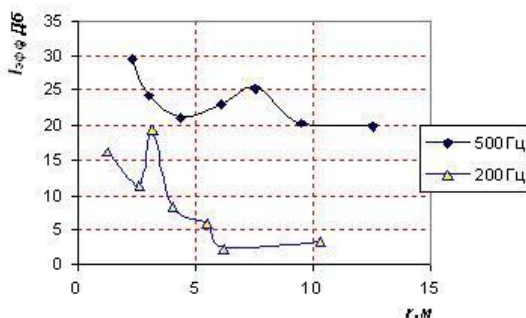


Рис. 4. Зависимость эффективности экрана от расстояния.

Как следует из данных приведенных на рис.2 и рис.3, качественно наблюдается интерференция звуковых волн перед акустическим экраном и в меньшей степени за экраном, которая обусловлена взаимодействием прямых волн от источника, отраженных от экрана и дифрагированных на кромке экрана.

На рис.4 представлен график зависимости эффективности экрана от изменения горизонтального расстояния от приемной системы до акустического экрана для двух частот 500Гц и 200Гц. Высота экрана  $H=6\text{м}$ , толщина его  $h=0,2\text{м}$ , расстояние от источника до экрана  $R=1\text{м}$ .

На рис.5 – та же зависимость, только для частот 130Гц и 100Гц.

Из приведенных данных видно, что наблюдается чередование значений максимумов и минимумов эффективности экрана, которое качественно связано с интерференционными эффектами, наблюдаемые на пространственном распределении звукового поля (см., например, рис.2 и рис.3).

Из сравнения данных рис.4 и рис.5 видно, что с повышением частоты эффективность акустического экрана увеличивается вне зависимости от изменения горизонтального расстояния от приемной системы до экрана.

На рис. 6 и рис. 7 представлены графики зависимостей эффективности акустического экрана от частоты. На рис. 6 представлены данные для случая, когда

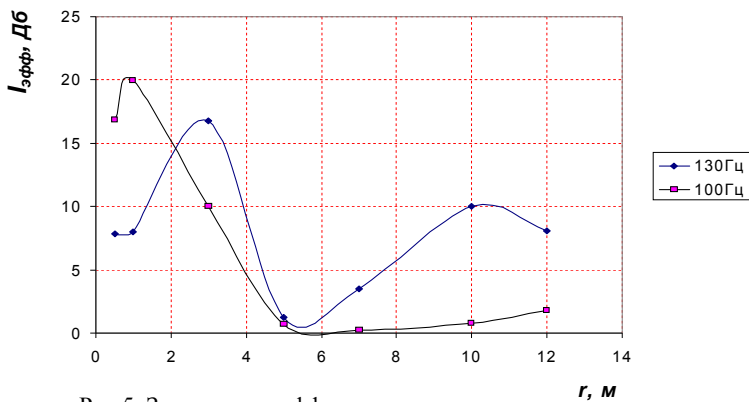


Рис.5. Зависимость эффективности экрана от расстояния

высота экрана  $H = 6$  м, его толщина - 0,2 м и расстоянии между источником и экраном  $R = 1$  м. На рис. 7 -  $H = 3$  м, его толщина - 0,2 м и расстоянии между источником и экраном  $R = 3$  м.

Рассмотрены два крайних случая из рассмотренных примеров изменения высот экранов и расстояний от источника до экрана, когда эффективность барьеров была минимальной и максимальной соответственно. Значения эффективности экранов усреднялись по всем рассмотренным расстояниям до приемника.

Из представленных данных на рис. 6 и рис. 7 следует, что с возрастанием частоты эффективность экрана увеличивается, что и следовало ожидать ввиду возрастания волновой высоты акустического экрана.

Из полученных результатов также видно, что эффективность акустического экрана на частотах, когда длина волны соизмерима с высотой экрана, имеют близкие значения для экрана высотой 3 м и высотой 6 м. Это говорит о том, что в этом диапазоне частот увеличение высоты экрана даже в 2 раза не приводит к заметному увеличению эффективности акустического экрана и, следовательно, для увеличения эффективности экрана надо выбирать другие параметры.

На рис. 8 представлена зависимость эффективности экрана от изменения его высоты, усредненная по всем частотам и расстояниям до приемника. Как и следовало ожидать, эффективность экрана существенно возрастает с увеличением его

высоты, так, например, увеличение высоты экрана в два раза приводит к увеличению средней его эффективности примерно на 3Дб.

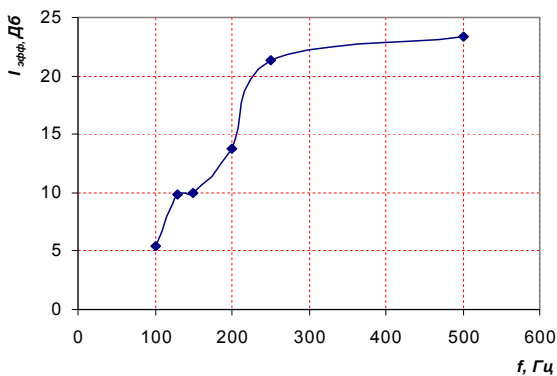


Рис.6. Эффективность экрана в функции частоты при расстоянии между источником и экраном  $R=1$  м.

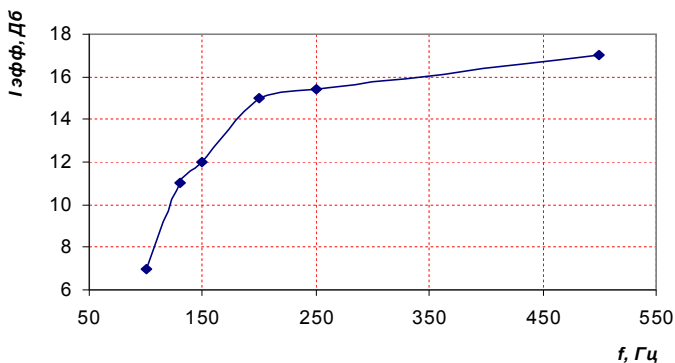


Рис.7. Эффективность экрана в функции частоты при расстоянии между источником и экраном  $R=3$  м.

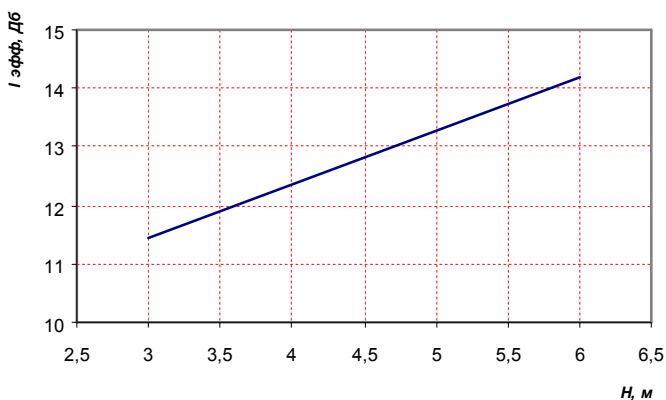


Рис. 8. Зависимость эффективности акустического экрана от его высоты

### Литература

1. *Gordinho L., Antonio J., Tadeu A.* 3D sound scattering by rigid barriers in the vicinity of tall buildings // *Applied Acoustics* 62, 2001, p. 1229-1248.
2. *Крышов С.И., Никольский А.И., Шубин И.Л.* Методика оценки акустической эффективности шумозащитных экранов в лабораторных условиях// XIII сессия РАО, секция архитектурная и строительная акустика, т.5 М, ГЕОС, 2003, с. 92-98.
3. *Аустов В.А., Никольский А. И., Шубин И.Л.* Анализ факторов, влияющих на расхождение значений акустической эффективности шумозащитных придорожных экранов, полученной при натурных измерениях и расчетным путем // XIII сессия РАО, секция архитектурная и строительная акустика, т.5 М.: ГЕОС, 2003, с. 39-45.
4. *Gordinho L., Antonio J., Tadeu A.* Sound propagation around rigid barriers laterally confined by tall buildings // *Applied Acoustics* 63, 2002, 595-609.
5. Ультразвук под редакцией *Голяминой И.П.* М., 1979г.

МОДЕЛИРОВАНИЕ БИОСФЕРНЫХ ПРОЦЕССОВ И ПРОГНОЗИРОВАНИЕ В  
ЭКОЛОГИИ С ПОЗИЦИЙ СИНЕРГЕТИКИВ.А. Гордиенко<sup>1</sup>, М.В. Старкова<sup>2</sup><sup>1</sup> МГУ им. М.В.Ломоносова, физический факультет<sup>2</sup> Ведущий НИИ химических технологий

*Исследователь постоянно находится между Сциллой и Хариподой недостоверности. С одной стороны, построенная им модель должна быть простой в математическом отношении, чтобы ее можно было бы исследовать имеющимися средствами. С другой стороны она не должна утрачивать и «рациональное зерно», существо проблемы.*

**А.А.Самарский**

*Чем сложнее система, тем менее мы способны дать точные и в то же время имеющие практическое значение суждения о ее поведении. Для систем, сложность которых превосходит некоторый пороговый уровень, точность и практический смысл становятся почти исключаяющими друг друга характеристиками.*

**Принцип несовместимости Лотфи Заде****Введение**

Сегодня большинство жителей нашей планеты понимают, что природа является местообитанием человека и источником всех благ, необходимых ему для жизни и производственной деятельности. Человек – часть природы, её порождение, он может производить, только используя её ресурсы, и жить только в тех природных условиях (температура, давление, влажность, состав атмосферы и др.), к которым он генетически приспособлен.

Биосфера, как и любой объект Природы, эволюционирует во времени. При этом направление эволюционных процессов определяется не только «комбинацией» составных частей, но прежде всего фундаментальными Законами Природы.

Появление человечества, несомненно, внесло свой вклад в эволюцию биосферы. Нельзя не согласиться с мнением В.И. Вернадского, что благодаря научно-техническому прогрессу воздействие человека на окружающую среду стало сравнимым с геологическими процессами, что, безусловно, сказалось на скорости эволюционных процессов. Труд поставил человека в качественно новое положение по отношению к Природе, а его активная деятельность не просто оставляет вполне заметный след в окружающем пространстве (*антропогенное воздействие*), но может спровоцировать и *необратимые процессы*, включая даже гибель человеческой цивилизации.

Для этого есть серьезные основания. Природа существует независимо от волеизъявления отдельных личностей. Как однажды заметил Август Лёш (Лёш, Август (Losch A.) – немецкий экономист середины XX столетия). *Природа действует в согласии со своими законами, а человек – в соответствии со своими представлениями о своем.*

В истории человечества уже можно выделить несколько таких необратимых процессов, получивших в экологии название **кризисов ресурсов собирательства, консументов, примитивного земледелия, продуцентов**. Кризис и ответ на него человечества – это смена экологической *парадигмы*, своеобразная *экологическая революция* (если использовать терминологию Куна). Суть такой революции в том, что она меняет взгляды людей на Природу и ее эксплуатацию. Обычно выделяют две таких экологически революции:

– **Сельскохозяйственная (неолитическая) революция** – как реакция на нехватку естественных природных продуктов, в результате чего возникли земледелие, скотоводство, оседлый образ жизни. Появился смысл в собственности на землю, накоплениях. Появились богатство, деньги, торговля, люди, которые смогли жить за счет других, города.

– **Промышленная революция** – как следствие роста численности населения в результате развития сельскохозяйственной деятельности. Древесину заменили углем, машины стали основным средством производства. Так цивилизация смогла осуществить необходимое жизнеобеспечение населения численностью 5 млрд. человек. Эксплуатация Природы приняла глобальный масштаб. Это привело к истощению способности окружающей среды поглощать загрязнения и, как следствие, – к возникновению следующего кризиса – кризиса продуцентов.

По мнению ряда специалистов, прогнозируемы еще два глобальных кризиса – **тепловой кризис и кризис надежности современных экологических систем**.

Поэтому люди должны думать не о том, чтобы победить Природу, а о том, чтобы работать в соответствии с законами Природы. Для такого нового пути эволюции необходим столь же новый социально-экономический механизм. Этим инструментом может быть лишь *правильная экономическая деятельность, подтвержденная соответствующими юридическими законами* и опирающаяся на *законы Природы* (физики).

*И, наконец, самое сложное.* На маленькой, конечной по размерам Земле не может существовать бесконечно растущее человечество, оснащенное огромным количеством технических средств, увеличивающих «мощь» его воздействия на окружающую природу. Этот рост может прекратиться по естественным экологическим причинам, так – как это свойственно Природе и ее законам. Это может случиться, если те законы, по которым человек строит свою частную и социальную жизнь, войдут в противоречие с закономерностями, определяющими эволюцию Природы и Космоса.

Как точно однажды подметил Ю.Андреев [2], единство Мира, от самого малого до самого великого, поражает, потому что вся Природа едина. Только наше слабое воображение поделило ее на Мега-, Макро- и Микромир. Но существует ли реальное различие между этими мирами?

На каком бы уровне ни подошли мы к Природе, везде обнаруживается критерий оптимальности в ее функционировании, т.е. минимальный расход энергии для достижения максимально возможного результата. Это касается и полета комара



(подлинного чуда – с позиций аэродинамики, пока недостижимого для нынешнего уровня человеческой техники), и локации звука кузнечиком, сверчком или тем же самым комаром [1], и организации внутренних процессов на любой звезде и Солнце в частности (от возгорания до превращения в белого карлика).

И лишь на одном из уровней между так называемыми Микромиром и Мегамиром, существует система, чрезвычайно далекая от оптимизации процессов, совершаемых в ней. Это – человек и человечество, на каком-то из этапов своей эволюции возмнившие себя «заглавными». Имеется всего лишь два исхода из такого положения вещей: жизнь в согласии с законами Природы, или автоматическая ликвидация подобного странного и чужеродного новообразования.

Возможно, именно поэтому сегодня приобретает такую актуальность прогнозирование биосферных процессов на основе их математического моделирования.

Однако насколько можно ожидать, что результаты такого прогнозирования будут отражать действительную картину эволюции биосферных процессов? В данной работе предпринята попытка краткого анализа этой ситуации.

## **2. Моделирование биосферных процессов как один из основных путей прогнозирования**

Понимая особое место человечества в биосфере, математики, физики и экологи, в первую очередь, уже в течение длительного времени предпринимают различные попытки прогнозирования характера эволюции биосферы.

Прогноз представляет собой специфический вид познания, где, прежде всего, исследуется не то, что есть, а то, что будет.

Прогнозирование – это совокупность действий, которые позволяют вынести суждения относительно поведения природных систем и определяются естественными процессами и воздействием на них человечества в будущем. Обычно прогнозирование отвечает на вопрос: «Что будет, если?.. ». Главной целью прогноза является оценка предполагаемой реакции окружающей природной среды на прямое или опосредованное воздействие человека, а также решение задач будущего рационального природопользования в связи с ожидаемыми состояниями окружающей природной среды.

Перспективным направлением изучения систем и процессов является математическое моделирование, когда модель создается при помощи языка математики. Во второй половине XX в. моделирование вышло на качественно новый этап своего развития в результате применения ЭВМ. Существенно возросли возможности совместного анализа систем уравнений с большим числом параметров и т.п. Однако успешность математического моделирования зависит не только от совершенства математического аппарата и используемых вычислительных возможностей, но и от того, насколько научно обоснованы исходные предпосылки.

Процесс познания всегда связан с абстрагированием и идеализацией. Однако модель явления идеальна только по определению, и лишь с некоей степенью приближения соответствует реальности. Модели, разумеется, можно практически бесконечно совершенствовать и находить более корректные основы их построения. В то же самое время должен существовать разумный предел такого уточнения, связанный с некой рациональностью или конструктивностью.

Модель, как правило, должна учитывать существенные эффекты и пренебрегать второстепенными. Однако чрезмерное упрощение модели может свести на нет все результаты. Тем не менее даже самые точные модели и формулы не всегда

приводят к более правильным результатам и выводам. Науке известны случаи, когда, казалось бы, парадоксальные (а может быть даже абсурдные) предпосылки приводили к правильным выводам, а иногда и к открытиям.

Говорят, что Дж. Максвелл, чтобы получить известные знаменитые уравнения, с помощью которых он предсказал существование в Природе теперь хорошо известных всем, электромагнитных волн (без которых сегодня мы с трудом представляем свое существование), мысленно заполнил пространство шестеренками...

Р. Фейнману же при разработке математического аппарата квантовой электродинамики, на одном из этапов научного творчества потребовалось объяснить, почему все электроны «на одно лицо». И он выдвинул на взгляд «человека разумного» совершенно абсурдное предположение, что в природе существует всего один электрон, который двигается во времени то туда, то обратно. Поэтому в каждый фиксированный момент времени мы и наблюдаем множество электронов (а на самом деле – единственный, но многократно) [3].

До сих пор до конца не ясно, каким образом Х.А. Лоренцу удалось получить формулы преобразования координат и времени для движущихся систем отсчета, которые в дальнейшем легли в основу специальной теории относительности (СТО) и впоследствии были действительно строго выведены исходя из постулатов СТО Эйнштейна.

В космологии начала 1900-х годов оптимизм Дж. Джинса, основанный, прежде всего, на интуиции (т.к. тогда ничего не было известно ни о физических условиях в протозвездной среде, ни о характере ядерных реакций в звездном веществе, ни о многих других процессах, происходящих в космосе), впервые позволил записать простые и наглядные уравнения газодинамики с учетом гравитации для обоснования теории гравитационной неустойчивости дозвездного вещества. Однако и сейчас, после обстоятельных и серьезных работ Е.М. Лифшица, Я.Б. Зельдовича, Дж. Силка и др., когда сформировалась, наконец, вполне детальная теория, учитывающая множество аспектов и параметров, точные формулы используются крайне редко. По-прежнему наиболее часто привлекают внимание простые формулы Джинса.

И таких примеров в истории развития науки можно привести множество.

Следует подчеркнуть, что в проблеме моделирования динамики биосферы сложилась любопытная ситуация: существует и все время растет число различных моделей, получаемых с использованием самых разнообразных математических подходов, причем выбор математического аппарата определяется в значительной мере вкусами исследователя.

Основная сложность при разработке экологических моделей – отсутствие достаточного количества измерений и знаний о механизмах экологических процессов и их изменениях под влиянием антропогенных воздействий. Поэтому в конкретных условиях необходимо определить, какие процессы в экосистемах являются определяющими и в наибольшей степени затрагиваются воздействиями, и в их отношении строить модели.

Отмеченное обстоятельство означает необходимость разработки каждый раз так называемой *минимальной модели*. Под минимальной моделью согласно Н.Н. Моисееву понимается следующее. Вблизи экспериментальных точек, представляющих динамические ряды наблюдений, можно провести траектории бесконечного числа моделей. Модель, удовлетворяющая заданной точности и имеющая

наиболее простую структуру, является минимальной. Чаще всего под наиболее простой структурой понимается модель с наименьшим количеством переменных. В результате минимальные модели одного объекта, разработанные для различных целей оказываются различными.

Таким образом, при построении каждой имитационной модели необходимо задаться целью моделирования, т.к. оказывается невозможным написать одну универсальную модель для решения экологических задач. Поэтому возникает необходимость создания системы моделей разной степени сложности. Имея такую систему моделей, можно при появлении новой задачи выбрать наиболее подходящую модель. В противном случае такую модель необходимо разработать, – и это будет еще одна модель для указанной системы. Моделирование экологических и, естественно, биосферных процессов – это разработка совершенствующейся, развивающейся системы моделей.

Как правило, в экологических моделях каждая из моделей позволяет решать задачи, которые невозможно (или сложно) решать с помощью других моделей.

Из сказанного следует, что системы моделей биосферных процессов, разрабатываемые различными авторами или коллективами авторов, оказываются различными. Различные у разных авторов системы моделей отличаются концепциями и гипотезами, которые лежат в основе моделей, а также математическими выражениями, принятыми в функциональных блоках для описания зависимостей, хотя в различных моделях можно выделить одинаковые и блоки, и математические выражения. Например, уравнения, описывающие модели глобального климата (общей циркуляции атмосферы и океана) или модели переноса загрязнений, различные у разных авторов, используют в своей основе одни и те же известные законы и системы уравнений, но различаются параметризацией, т.е. упрощениями, используемыми для задания отдельных блоков и их связей.

В результате математические описания большинства сложных динамических процессов, включая экологические, как правило, субъективны и зависят от выбора авторов. Однако в то же время, эти описания достоверно, с приемлемой для авторов точностью, воспроизводят *частные реальные процессы*.

Надежным критерием справедливости той или иной модели является соответствие эксперименту и возможность делать предсказания на ее основе. Важно также иметь в виду, что вследствие приближенности моделей к реальной действительности необходимо всегда делать оценку разумной точности, которая требуется от измеряемых величин. Таким образом, хотя не существует пределов уточнения моделей, всегда необходимо разумно ограничивать стремление более глубоко познать мир.

Для проверки правильности моделей обычно применяют *идентификацию* и *верификацию*. Однако есть модели, которые невозможно проверить. Обычно они требуются для количественного расчета динамики переменных и, по сути, являются экстраполяцией в будущее данных измерений, сделанных в настоящем. К последним, например, относятся модели, разработанные для оценки климатических и экологических последствий крупномасштабной ядерной войны [4].

В современной практике математического моделирования не редкостью являются «смешанные» модели. В таких моделях часть параметров уточняется экспериментально, подвергаясь процедурам идентификации и верификации, а остальные используются для прогноза состояния моделируемой системы в будущем.

Смешанными, например, являются многие климатические модели, например, общей циркуляции атмосферы и океана. Только часть их переменных (температура атмосферы в ячейках и средняя температура атмосферы и др.) могут быть достоверно идентифицированы.

Современные модели имеют десятки и сотни переменных и не могут быть исследованы классическими аналитическими методами. Обычно эти проблемы решаются на основании обоснованного опытом предположения, что новые траектории лежат вблизи рассчитанных ранее. Кроме того, во-первых, проверяют устойчивость упрощенного варианта модели, во-вторых, проводят исследование устойчивости решений полной модели количественно на нескольких вариантах.

Однако из-за малой скорости многих эволюционных процессов в биосфере (особенно «геологической» природы), порой проходит не одно десятилетие, прежде чем удается выяснить, что, несмотря на близость прогнозируемого и реального поведения системы в течение определенного времени, исходные посылки модели были не верны, и, начиная с некоторого момента времени, прогнозы начинают принципиально расходиться с реально возникшей ситуацией.

Одним из таких характерных примеров является прогноз относительно уровня воды в Каспийском море. В результате ошибочного истолкования причины данного природного явления для «стабилизации» уровня возник проект переброса вод северных рек и даже Черного моря в Каспийское море, требовавший колоссальных финансовых затрат, но которые, на самом деле, как выяснилось впоследствии, не могли принципиально изменить ситуацию. Понижение уровня Каспийского моря было связано с автоколебательным геологическим процессом. В результате и без переброски дополнительных вод в Каспийское море, его уровень в последнее время стал повышаться. Теперь на дагестанском побережье моря стоит другая задача – строительство дамб, чтобы сохранить уже освоенные участки суши.

Другой пример – до конца не оконченная история, связанная с озоновыми дырами (локальным падением концентрации озона в озоновом слое Земли).

По общепринятой сегодня в научной среде теории, процесс образования «озоновых дыр» в значительной мере естественный и не связанный исключительно с вредным воздействием человеческой цивилизации. Есть даже мнение, что природные источники галогенов, например вулканы или океаны, более значимы для процесса разрушения озона, чем произведенные человеком. Вместе с тем, не подвергая сомнению вклад природных источников в общий баланс галогенов, необходимо отметить, что, как оказалось, и они в основном не достигают стратосферы, а достаточно быстро вымываются из атмосферы, выпадая в виде дождей на Землю. Даже редкое по своей силе извержение вулкана Пинатубо в июне 1991 года вызвало падение уровня озона не за счёт высвобождаемых галогенов, а за счёт образования большой массы сернокислых аэрозолей, поверхность которых катализировала реакции разрушения озона. Однако уже через три года практически вся масса вулканических аэрозолей была удалена из атмосферы. Таким образом, даже мощные извержения вулканов являются сравнительно краткосрочными факторами воздействия на озоновый слой.

Вместе с тем, оказывается, что существуют вполне объективные причины того, что предсказания, казалось бы, самой лучшей модели, не оправдываются. Ниже обсуждаются три наиболее существенные причины.

Первая причина, как мы уже отмечали ранее [5], заключается в том, что в общем случае *варианты возможных путей эволюции определяются запрещающими законами* (т.е. законами сохранения), но не предписывающими (законами динамики). Поэтому для сложных систем могут возникнуть проблемы в предсказании путей эволюции.

Вторая причина связана с возможностью возникновения даже в относительно простой системе явления *динамического хаоса*.

Третья причина обусловлена принципом *Ле Шателье – Брауна* о возникновении в системе противодействия любому эволюционному процессу. И если последнее оказывается нелинейным, система может перейти в новое состояние через бифуркацию, т.е. реализуется состояние, не вытекающее однозначно из начальных условий, и, соответственно, которое нельзя предсказать однозначно.

### **3. Законы сохранения как определяющие законы вариантов возможных путей эволюции биосферы**

Современные научные представления позволяют сформулировать определенные правила «игры», которым должны подчиняться любые системы взаимодействующих между собой объектов, независимо от их внутреннего строения (как на уровне молекул, так и на уровне таких подсистем, как экологическая ниша, экосистема или даже биосфера в целом). Один из них гласит, что **варианты возможных путей эволюции** – определяются запрещающими, но не предписывающими законами, т.е. **законами сохранения** [3].

На протяжении многих столетий считалось, что фундаментальные законы, определяющие эволюцию системы, являются предписывающими. Например, 2-й закон Ньютона, Закон Всемирного тяготения и т.п. В условиях Макромира, в котором мы живем это во многом справедливо и мы пользуемся такими законами, например, чтобы обеспечить точность стрельбы, правильность запусков космических аппаратов и их стыковку на орбите, когда, исходя из известных начальных условий, мы можем предсказать конечный результат эволюционного процесса.

Однако развитие физики и квантовой механики, в частности, со всей очевидностью показали, что более существенными правильно описывающими эволюционное развитие, являются запрещающие законы, известные в науке как Законы сохранения. Основной смысл их формулировки: **«Системе дозволено все, кроме ...»**. Наиболее заметно это свойство Природы проявляется в физике элементарных частиц, когда одна и та же частица вследствие совершенно не предсказуемых порой причин может распадаться несколькими путями с образованием в результате различных «сумм» частиц распада.

**Фундаментальность законов сохранения означает, что у любой системы формально существует множество путей эволюционных процессов (в частном случае, конечно, может быть и один) при одних и тех же начальных (исходных) посылах.**

Предписывающие законы, к великому сожалению, описывают лишь малую толику всех процессов в Природе. Но по счастливой случайности, именно в Макромире результаты прогнозирования поведения системы тел с помощью «предписывающих» и «запрещающих» законов часто оказываются совпадающими.

### **4. Возникновение динамического хаоса в процессе эволюции**

Большинство из нас, со времен изучения школьной физики привыкли считать, что если мы знаем все исходные (начальные) условия, то можем точно пред-

сказать поведение тела или системы тел. В определенной степени это действительно так. Этим мы пользуемся в нашей повседневной жизни. Так классическая механика Ньютона дает все необходимые уравнения, позволяющие, например, рассчитывать траекторию движения тел.

В рамках классического подхода в физике, в частности, динамики Ньютона, в принципе, математическим способом можно строго доказать, что исходных условий достаточно для определения будущего поведения любой детерминированной системы с однозначной точностью. Под детерминированной системой, понимается система, выходы которой однозначно определяются оказанными на нее управляющими воздействиями. Непредсказуемость, как правило, связывают со случайными процессами, к которым, например, относят подбрасывание монет.

Благодаря такому взгляду на природу вещей, появилось известно изречение Лапласа: *«Дайте мне начальные условия, и я предскажу будущее мира»*. Эта уверенность в правоте Лапласа и предсказуемости поведения систем, описываемых классической механикой, сохранялась вплоть до самого последнего времени в сознании большинства естествоиспытателей.

Исследования последних десятилетий произвели настоящую революцию в этой области и показали, что не все так просто и даже детерминированная механическая система может вести себя совершенно непредсказуемо. И, наоборот, в основе нерегулярно, хаотического поведения часто лежит вполне детерминированное описание.

Конечно, обычно не вызывает сомнений, что одна из наиболее простых причин, из-за которой может появиться «непредсказуемость» как прошлого, так и будущего, это погрешность измерений (в том числе, задания начальных условий). Как правило, на практике мы не всегда можем узнать точное состояние системы в начале. Помимо этого, как бы ни были совершенны наши наблюдения, всегда существует вероятность некоторой ошибки. Более того, современная физика со всей определенностью показала, что существует конечный предел точности любого измерения.

В этом случае, остается лишь вопрос о том, как повлияет ошибка задания исходных условий на предсказания. Классический, хорошо известный всем пример Ньютоновой механической науки – определение планетарных орбит. Астрономы могут указать положения и скорости планет лишь с определенной степенью точности. При решении уравнений движения накапливаются ошибки, и с годами изначальное предсказание становится все менее и менее надежным. Однако число учитываемых взаимодействий относительно невелико. Поэтому в данном случае «степень точности» измерений редко имеет принципиальное значение, поскольку астрономы могут постоянно обновлять данные и делать новые расчеты, и эти расчеты всегда намного опережают события. Например, солнечные затмения надежно предсказаны на многие столетия вперед.

Как правило, число ошибок в обычных динамических системах растет пропорционально времени (т.е. линейно) и существенно зависит от числа учитываемых взаимодействий: чем сложнее система, тем быстрее во времени накапливается ошибка предсказаний. Более того, оказывается, что если число учитываемых взаимодействий превысит некоторый предел, – достаточно быстро во времени система начинает вести себя внешне как хаотическая, несмотря на строгий детерминизм исходных посылок.

Именно такая ситуация, к сожалению, реализуется для большинства моделей биосферных процессов. Поэтому вероятность ошибки предсказаний таких моделей обычно остается весьма заметной.

Однако и при отсутствии ошибок может возникнуть сложность предсказания, на первый взгляд противоречащая классическим представлениям динамики.

В качестве иллюстрации сказанного приведем лишь один, хорошо известный и многократно описанный в литературе пример анализа решений **логистического уравнения**, один из простейших с математической точки зрения вариантов записи которого можно представить в виде

$$x_{n+1} + 1 = ax_n (1 - x_n). \quad (1)$$

С помощью уравнения (1) можно, например, анализировать численности популяции  $N(t)$ , предположив для удобства, что определенный сезон размножения случается у таких видов один раз в год, и каждый год с номером  $(n+1)$  численность популяции  $N_{n+1}$  полностью определяется ее размерами  $N_n$  в предыдущем году  $n$ , т.е.  $N_{n+1} = \alpha N_n$ , а количество умерших особей равно  $\beta N_n^2$ , т.е. пропорционально численности всей популяции. Значение  $x_n$  в этом случае может представлять некоторую условную нормированную величину численности популяции, так что  $x_n$  и  $N_n$  являются функцией значений  $\alpha$ ,  $\beta$  и  $N_n$ .

Логистическое уравнение является вполне *детерминированным* алгоритмом для определения численности популяции для каждого следующего года, исходя из знания численности популяции на данный момент. С этими расчетами легко можно справиться даже без компьютера.

**Однако результаты таких расчетов оказываются далеко не такими простыми, как кажется на первый взгляд.**

Не вдаваясь в детали численного решения этого уравнения, описанного во многих учебниках, проанализируем лишь получаемые решения.

При малых значениях параметра получаются вполне детерминированные результаты. Так, если  $a$  меньше 1, то независимо от значения начальной величины  $x_0$ , численность популяция неуклонно сокращается и стремится к нулю (рис. 1,а). С биологической точки зрения это означает, например, что ресурсы местообитания популяции слишком скудны, и популяция вымирает.

При  $a$ , лежащем между 1 и 3, значение  $x_n$  изменяется до тех пор, пока не достигнет равновесного значения  $x_{\text{кон}} = (1 - 1/a)$ . Частный случай показан на рис. 1, б.

Но уже при значениях  $a$  больше 3 (вымирание слабое, ресурсов местообитания достаточно), небольшая исходная численность популяции сначала неуклонно растет, однако затем начинает колебаться, но весьма специфическим образом.

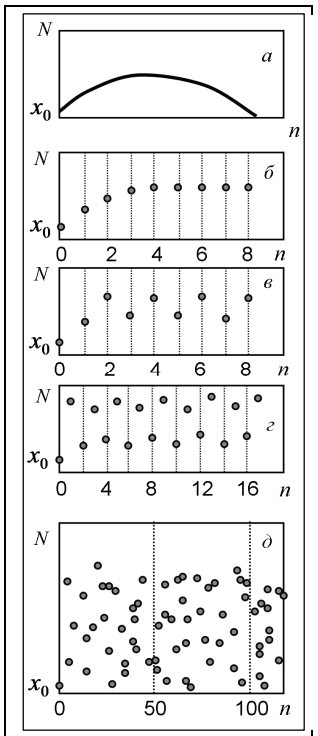


Рис. 1 [6]. Возможные изменения популяции, согласно логистическому уравнению:

$a - a < 1$ , последовательность чисел  $N$  приближается к 0 при любом начальном значении  $x_0$ . Это соответствует популяции, которой не избежать вымирания.

$\bar{b} - 1 < a < 3$ , постоянный рост до устойчивого равновесного уровня.

$\bar{e} - 3 < a < 1 + \sqrt{6}$ , численность популяции поднимается с исходно низкого значения, а затем проходит через двухлетние колебания,

$\bar{z} - 1 + \sqrt{6} < a < 3,6$ , четырехлетний цикл,

$\bar{d} - a > 4$ , популяция начинает меняться хаотически, и в целом ее состояние в следующем году становится непредсказуемым.

Если  $a$  лежит между 3 и  $(1 + \sqrt{6})$ , то появляется детерминированная последовательность значений  $x$ , колеблющихся с периодичностью около 2 лет между двумя относительно постоянными значениями  $x_a$  и  $x_b$  (рис. 1, в). При  $a$  немногим больше, чем  $1 + \sqrt{6} = 3,4495\dots$  колебания происходят между четырьмя неизменными величинами, с периодичностью в четыре года (рис. 1, г).

При еще более высоких значениях  $a$  период удваивается снова и снова, все быстрее и быстрее (рис.2), пока  $a$  не достигнет критического значения  $a_{кр} \sim 3,6$ , выше которого численность популяции не начнет меняться сложным и в высшей степени произвольным образом.

Значение  $x$  ( $a$  следовательно и  $N$ ) меняется, согласно строгой последовательности, между рядом диапазонов допустимых значений, однако точные позиции, посещенные переменной внутри каждого диапазона, выглядят полностью произвольными. При дальнейшем увеличении  $a$  диапазоны сливаются друг с другом попарно, а область значений, где  $N$  меняется произвольно, растет до тех пор, пока не образуется континуум, который при  $a > 4$  охватывает все значения  $x$ . Численность популяции колеблется полностью произвольным образом (рис. 1, д).



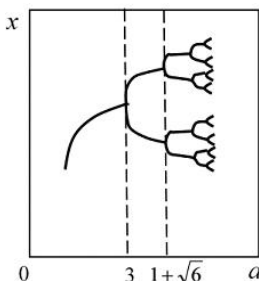


Рис. 2. «Дорога» к хаосу через последовательность бифуркаций

На сегодняшний день математически доказано, что в данном случае мы имеем дело действительно с полностью хаотическим процессом, напоминающим работу известной компьютерной функции RND (*randomize*), генерирующей последовательность случайных чисел.

Такой непредсказуемый вид поведения численности популяции при значении  $a > 4$  известен как **детерминированный хаос**. Такой тип хаоса возникает во многих динамических системах, причем характер перехода к хаосу не зависит от точных деталей исследуемых систем.

Таким образом, с позиций теории динамического хаоса, должны существовать как минимум два основных сценария развития событий, эволюция которых изображена на рис.3 и 4. Важным результатом такого подхода является то, что для нелинейных систем наблюдение за «настоящим» не позволяет однозначно предсказать не только поведение системы в будущем, но и восстановить «точную» историю эволюции. *Относительно однозначно можно говорить лишь об общих тенденциях эволюции.*

Именно детерминированный хаос, по-видимому, использует сама Природа, производя, например, новые виды биоразнообразия, или превратив косную материю в живую, или, пытаясь выяснить, как иммунная система тела опознает болезнетворные микроорганизмы.

Теоретически, Природа может быть и детерминированной, и произвольной. На практике, однако, детерминизм – это миф. Таков сокрушительный вывод современных представлений о свойствах сложных систем.

Можно сделать вывод, что, даже если Вселенная ведет себя как машина в строго математическом смысле этого слова, все же может произойти так, что возникнут новые и в принципе непредсказуемые явления. И даже если законы механики будут единственными, определяющими поведение Вселенной, то и тогда ее будущее окажется неизвестным. Никакой разум, как бы мощен он ни был, не способен предсказать, какие новые формы и системы могут получить существование в будущем. В этом смысле Вселенная открыта: невозможно узнать, какие еще уровни разнообразия и сложности могут скрываться у нее в запасе.

Известно, что открытые и нелинейные системы способны к самоорганизации. При этом открытость является необходимым, но не достаточным условием для самоорганизации [7].

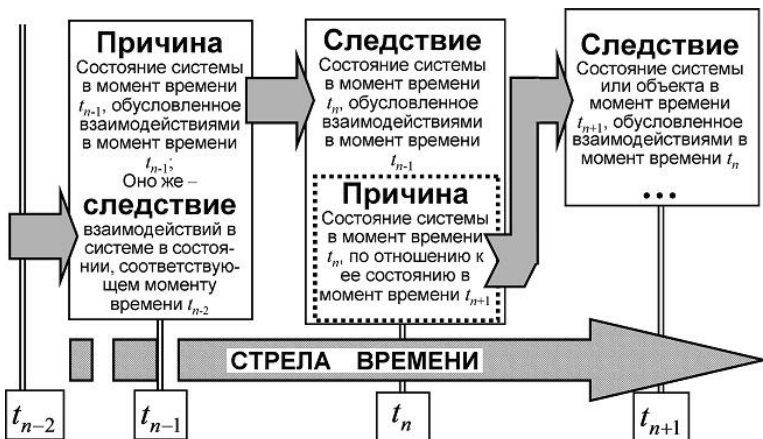


Рис.3. Характер причинно-следственных связей при эволюции в «добифуркационной» области: «причина» и «следствие» связаны однозначно друг с другом, и допускают правильные логические выводы о прошлом и будущем состояниях системы.

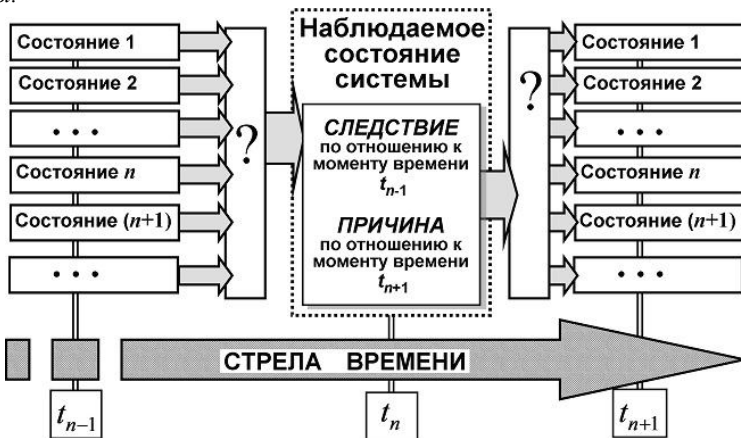


Рис.4. Характер типичных причинно-следственных связей в нелинейной системе: по результатам наблюдений в момент времени  $t_n$  нельзя сделать однозначный логический вывод не только о будущем состоянии системы, но и о причине, приводящей к возникновению этого состояния.

Открытость подразумевает наличие в системе источников и/или стоков и обмена веществом и/или энергией с окружающей средой. Нелинейность, наличие множества решений, которым соответствует множество путей развития системы.

Любую систему можно представить как бесконечный ряд гармоник с неким временным коэффициентом перед каждой из них. При этом в случае независимости гармоник друг от друга, система линейна, в противном случае, когда устанавливается определенная связь между гармониками, система становится нелинейной.

Представим себе, что каждой гармонике соответствует какая-либо структура (или процесс) в биосфере (как это, например, полагали древние греки). Сдвинутые во времени они существуют в одном пространстве, но на различных стадиях. В зависимости от стадии развития одна структура может служить фоном для развития другой или же они могут практически не взаимодействовать друг с другом. Но если эти гармоники провзаимодействовали, то обязательно должны появиться суммарные и разностные их частоты. Это означает, что в окружающем пространстве возникли новые процессы, которые не описываются только исходными гармониками. Такой процесс, например, легко проследить при исполнении музыкального произведения, когда певческая форманта певца или аккорд порождают мощный инфразвуковой фон произведения, который формально не был предусмотрен нотной записью [8].

Такое построение мира отражает его дискретность. Несмотря на многообразие видов, существующих в природе, симбиотические существа, как правило, не жизнеспособны.

Скорость протекания процессов в ходе эволюции может существенно различаться. В основе медленных процессов лежит отрицательная обратная связь, которая служит стабилизирующим фактором, позволяющим системе вернуться в положение равновесия. Такой путь эволюции считается тупиковой ветвью. Он приводит к возникновению видов, дальнейшее развитие которых практически останавливается. В целом система отрицательных обратных связей обеспечивает защиту биосферы от вредных воздействий.

Сверхбыстрые процессы происходят благодаря нелинейной положительной обратной связи. Это путь, который осуществляется посредством бифуркаций, в ходе которых происходит существенная перестройка биосферы. Вернадский считал, что именно в такие периоды наблюдается усиление вулканических процессов, ледниковых явлений, геологических процессов, которые охватывают большую часть биосферы. Однако в процессе таких катастрофических изменений не происходит разрушения биосферы, а лишь ее преобразование. Возможно благодаря именно этим процессам совершенствуются защитные механизмы биосферы.

### **5. Биосфера как система с внутренне присущей безопасностью.**

#### **Бифуркация – как способ противодействия мощному возмущению**

В начале прошлого века В.И.Вернадский отмечал, что «Биосфера является той единственной земной оболочкой, в которую непрерывно проникают космическая энергия, космические излучения и прежде всего лучеиспускание Солнца, поддерживающее динамическое равновесие, организованность: биосфера – живое вещество...» [9]. Для обеспечения своей жизнедеятельности биосфера использует внешние источники энергии, такие как солнечный свет, космические лучи и энергию радиоактивного распада внутри Земли радиоактивных элементов. Благодаря этому в течение длительного времени происходит не только поддержание её относительно устойчивого состояния, но и осуществляется и эволюция биосферы, сопровождающаяся изменением её видового разнообразия и т.п.

Вместе с тем, в ходе эволюции в биосфере были выработаны надежные механизмы ее защиты, как от внешних, так и внутренних факторов. Одним из таких механизмов способствующих стабилизации характеристик биосферы, как мы уже указывали ранее [5], является механизм противодействия причинам и различным факторам, «толкающим» биосферу к изменению её состояния. В философии этот механизм противодействия известен как *закон единства и борьбы противоположностей*, в экологии – как *закон Ле Шателье – Брауна*. Согласно принципу Ле Шателье – Брауна любое воздействие, в том числе, выводящее систему из равновесия, обязано вызывать и противодействие, т.е. процессы, направленные на ослабление результата воздействия. Биологи, например, считают, что относительно длительная стабильность биосферы основана на замкнутости регулируемых биотой круговоротов биохимических веществ, когда внешние воздействия вызывают внутренние возмущения круговоротов, которые компенсируют эти внешние воздействия.

Например, сформировался озоновый экран, обеспечивший защиту от жестких ультрафиолетовых лучей, и создавший условия для выхода живых существ из воды на сушу. Защита от чрезмерного увеличения численности какого-либо вида, происходит на основе мощных регуляционных механизмов типа конкуренции. Автотрофные организмы, являющиеся одним из важнейших элементов биосферы и способные осуществлять фотосинтез, используют солнечный свет (т.е. внешний источник энергии) для синтеза минеральных соединений и производства биохимической энергии, так необходимой для жизни. Этим достигается самообеспечение биосферы.

Согласно современным представлениям в ходе эволюции происходили как «медленные» изменения биосферы, так и крупные катастрофы, приводящие к существенным перестройкам биосферы. Но при этом всегда сохранялась живучесть биосферы как системы.

Реализация медленного (часто в литературе называемого «дарвиновским») канала эволюции по схеме *изменчивость – отбор* (для живых организмов называемая Де Фризовскими мутациями, рис. 5) приводила к относительно плавному отбору условий и вариантов, обеспечивающих в данных, условиях минимизацию опасности, уменьшение риска для существования живых организмов в течение длительного периода эволюции биосферы. Например, муравьи и термиты мало отличаются от своих предков, появившихся сотни миллионов лет назад (так называемая приближенная модель абсолютной безопасности).

Однако и этот медленный канал, по мнению И.Пригожина тоже представлял хотя и маленькие, но бифуркации. Просто мы их с позиций масштабов нашего макромира воспринимали как плавное изменение, и замечали лишь значительные бифуркации, обычно называемые в теории самоорганизации катастрофами. По мнению И. Пригожина *вся эволюция биосферы – это цепь последовательных бифуркаций*.

Катастрофические изменения биосферы согласно современным представлениям синергетики возникали тогда, когда по каким-либо причинам эволюционное изменение состояния биосферы приводило к возникновению мощного *нелинейного* противодействия процессу эволюции и возникновению точки бифуркации [10]. При бифуркационном алгоритме эволюционного процесса существенно увеличивается риск экологических катастроф, возможно даже уничтожение отдельных частей биосферы. Темнее менее, разрушения биосферы в целом при этом не про-

исходит. Возможно, что в эволюционном плане именно с изменениями бифуркационного типа может быть связано совершенствование механизмов защиты биосферы от чрезмерной опасности.

Несомненным историческим фактом является и то, что появление живого вещества и эволюция живых организмов во все времена способствовала и эволюции биосферы. Действительно, живое вещество воздействовало на все другие компоненты природной среды, частично изменяя их соотносительные параметры. Так, зеленые растения и фотосинтезирующие бактерии путем фотосинтеза поглощали из воздушной среды углекислый газ и воду, а выделяли из нее кислород, обогащая последним атмосферу. Современный состав атмосферы (азот – 78%, кислород – 21%, углекислый газ – 0,031%) – результат эволюционной деятельности органического мира.

Существует даже гипотеза, что *основной причиной смены видов*, описанных в эволюционной теории Ч. Дарвина, *было именно эволюционное изменение свойств биосферы через бифуркации*, обусловленное самой эволюцией жизни на Земле (рис.5,б).



Рис.5. Дерево эволюции: а) по Дарвину (континуальное представление); б) с позиций синергетики (через бифуркации).

Эта точка зрения согласуется и с выводами теории самоорганизации, развиваемой в настоящее время в рамках синергетики.

Заметим, что и основной источник энергии на Земле – Солнце, тоже эволюционирует со временем, и его воздействие на Землю изменяется. Согласно существующим теориям эволюции Солнечной системы, после «выгорания» основной массы ядерного топлива, температура Солнца (а, следовательно, и количество тепловой энергии, получаемой Землей) будет снижаться, и оно начнет уменьшаться в размерах. Однако за счет энергии гравитации Солнце снова «разогреется», и, расширяясь, достигнет размеров, сравнимых с размерами орбиты вращения Земли. Таким образом, рано или поздно встанет вопрос не только о возможности существ-

ования человеческой цивилизации, но и существовании Земли как планеты в целом. Но это произойдет еще не скоро.

Поэтому с позиций откровенного пессимиста, человечество всё равно обречено, и следует за время возможного существования нашей цивилизации наслаждаться жизнью в полном объеме, не очень задумываясь о последствиях и о будущих поколениях.

Оптимист же задумается о возможности более длительного сохранения, как ближайшего своего потомства, так и человеческой цивилизации в целом.

В определенном смысле это напоминает старую притчу о двух лягушках, попавших в банку с молочными сливками. Одна решила, что все равно утонет, так как не умеет плавать, – и утонула. Вторая начала интенсивно болтать лапами, сливки превратились в твердую массу сливочного масла, и лягушка осталась жива.

Справедливости ради отметим, что эта притча перекликается с другой, имеющей противоположные выводы (*обе вместе они своеобразно подтверждают идею дуализма в мире, в котором мы живем*) – о двух людях, попавших в трясины. Один сохранял спокойствие, и сумел дожидаться помощи. Другой – начал совершать интенсивные движения, пытаясь выбраться самостоятельно. И трясина его быстро «засосала» внутрь.

Заметим, что самообеспечение «безопасного» развития биосферы, сохранение ее живучести определяется рядом основополагающих факторов, среди которых выделяют, во-первых, что вещество в биосфере используется в основном в форме круговорота. Биогеохимические циклы элементов в процессе эволюции биосферы стали настолько совершенными, что не приводят к вредным отходам. Во-вторых, то, что в биосфере существует огромное многообразие структур, однако практически отсутствуют доминирующие виды с чрезмерной численностью. Это саморегулирование обеспечивает ее защиту от возможных крайне опасных ситуаций со стороны внутренних факторов. Так если, например, попытаться построить в двойном логарифмическом масштабе график «характерные размеры особей вида – их численность», то получается относительно гладкая зависимость, соответствующая учению биологии о трофических и пищевых пирамидах (рис.6). И только человек и его ближайшее окружение (скот и некоторых виды домашних животных), благодаря научно-техническому прогрессу, выбиваются из этой зависимости. Это, несомненно, вносит свой вклад в эволюцию биосферы, так что воздействие человека на окружающую среду безусловно, сказалось на скорости эволюционных процессов.

Поэтому с позиций откровенного пессимиста, человечество всё равно обречено, и следует за время возможного существования нашей цивилизации наслаждаться жизнью в полном объеме, не очень задумываясь о последствиях и о будущих поколениях.

Оптимист же задумается о возможности более длительного сохранения, как ближайшего своего потомства, так и человеческой цивилизации в целом.

В определенном смысле это напоминает старую притчу о двух лягушках, попавших в банку с молочными сливками. Одна решила, что все равно утонет, так как не умеет плавать, – и утонула. Вторая начала интенсивно болтать лапами, сливки превратились в твердую массу сливочного масла, и лягушка осталась жива.

Справедливости ради отметим, что эта притча перекликается с другой, имеющей противоположные выводы (*обе вместе они своеобразно подтверждают*

идею дуализма в мире, в котором мы живем) – о двух людях, попавших в трясину. Один сохранял спокойствие, и сумел дожидаться помощи. Другой – начал совершать интенсивные движения, пытаясь выбраться самостоятельно. И трясина его быстро «засосала» внутрь.

Заметим, что самообеспечение «безопасного» развития биосферы, сохранение ее живучести определяется рядом основополагающих факторов, среди которых выделяют, во-первых, что вещество в биосфере используется в основном в форме круговорота. Биогеохимические циклы элементов в процессе эволюции биосферы стали настолько совершенными, что не приводят к вредным отходам. Во-вторых, то, что в биосфере существует огромное многообразие структур, однако практически отсутствуют доминирующие виды с чрезмерной численностью. Это саморегулирование обеспечивает ее защиту от возможных крайне опасных ситуаций со стороны внутренних факторов. Так если, например, попытаться построить в двойном логарифмическом масштабе график «характерные размеры особей вида – их численность», то получается относительно гладкая зависимость, соответствующая учению биологии о трофических и пищевых пирамидах (рис.6). И только человек и его ближайшее окружение (скот и некоторых виды домашних животных), благодаря научно-техническому прогрессу, выбиваются из этой зависимости. Это, несомненно, вносит свой вклад в эволюцию биосферы, так что воздействие человека на окружающую среду безусловно, сказалось на скорости эволюционных процессов.

**Соотношение действия и противодействия вошли в новую стадию.** Поэтому, согласно законам синергетики, если противодействие при определенных условиях превысит некоторое критическое значение, может возникнуть *бифуркация*, последствия которой могут оказаться не только непредсказуемыми, но и приводят к гибели популяции человека как вида в целом, как уже случалось раньше по тем или иным причинам с другими популяциями или видами живых организмов.

Но, вместе с тем, нельзя забывать, что эволюция биосферы – это естественный процесс, который мы вряд ли сможем отменить, и что даже полный отказ от всех техногенных достижений человечества, не сможет остановить эту эволюцию (а, следовательно, и изменение физико-химических характеристик биосферы). Этот процесс будет продолжаться всегда (возможно с иной скоростью), причем, даже в том случае если человечество, как популяция, вообще исчезнет с лица Земли и антропогенное воздействие на окружающую среду прекратится. Исходя из вышесказанного, можно утверждать, что вопросы решения проблем, именуемых экологическими, на самом деле выходят далеко за рамки экологии в ее традиционной формулировке. Не случайно многие предложения, как экологов, так и представителей «зеленых» в настоящее время, начинают вызывать критическое отношение не только к возможностям экологии. Уже очевидно, что решение этих проблем требует и дополнительных новых знаний, и нового менталитета. Нужно искать новые пути не только решения, но и обоснования экологических проблем.

В целом, защита биосферы от «чрезмерной опасности» обеспечивается системой отрицательных обратных связей, действующих в рамках объективно существующих законов природы (II закона термодинамики, биогеохимических циклов, информационного многообразия и т.п. ), так что можно утверждать, что биосфера обладает свойством внутренне присущей безопасности [11].

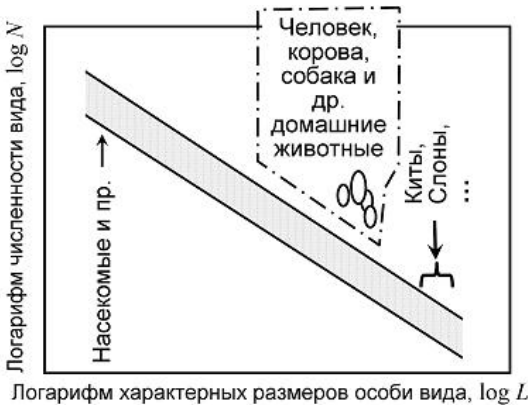


Рис.6. Примерное соотношение между численностью вида и характерными размерами его особей.

Приведем характерный пример. В конце позапрошлого, начале прошлого столетий уже началось систематическое отслеживание среднегодовой температуры на Земле. И вот тогда впервые биологи забили тревогу о надвигающемся глобальном потеплении, которое может привести к необратимым процессам в биосфере. Как же отреагировала на это сама биосфера? Происходит одно из самых мощных на Земле извержений вулкана. В атмосферу выбрасывается огромное количество пепла и углекислого газа, которые в верхних слоях атмосферы создают достаточно длительную по времени оболочку, защищающую Землю от прогревания ее солнечными лучами. Буквально за месяц средняя температура на Земле понижается более, чем на 100. Таким образом, проблема глобального потепления была решена без какого бы то ни было вмешательства человека. Именно этот случай, по-всей видимости, спровоцировал создание хорошо известной сегодня модели «Ядерной зимы». Возможность возникновения ядерной зимы предсказана Карлом Саганом в США и Г.С. Голицыным в СССР, затем эта гипотеза была подтверждена модельными расчётами на ЭВМ В.В.Александровым, работавшим в группе советских ученых под руководством академика Н.Н.Моисеева. Эти работы получили широкий общественный резонанс в массовой прессе разных стран. Впоследствии многие физики оспаривали достоверность и устойчивость полученных результатов, однако убедительного опровержения гипотеза не получила.

#### 6. Что же может дать моделирование?

Новые идеи и концепции современной нелинейной динамики существенно изменили наши представления о случайности в поведении сложных систем и биосферы в частности. Самое удивительное в поведении нелинейных систем то, что даже система, характеризуемая классическими законами динамики, может обладать хаотическими траекториями движения, несмотря на свою исходную детерминированность. Оказывается, что стохастическое поведение является всего лишь результатом простого механического повторения некоторой, часто достаточно простой алгоритмической процедуры. При этом строго детерминированное оказывается одновременно и случайным, и хаотическим.



В нелинейных системах число ошибок «предсказания» растет с увеличивающейся скоростью (экспоненциально со временем). Поэтому непредсказуемость «точного будущего» носит фундаментальный характер и не объясняется исключительно нашим неведением, или наличием погрешностей в задании начальных условий. Она не исчезнет, даже если мы соберем больше информации о системе. Тогда как в обычной, относительно простой системе, подобной солнечной (о которой шла речь выше), вычисления надолго опережают действие, в нелинейной системе требуется обрабатывать все больше и больше информации, чтобы поддерживать тот же уровень «конечной» точности, а сами вычисления едва успевают за действительными событиями. Другими словами, практически полностью теряется предсказательная сила. Как результат, мы ничего не предсказываем, а лишь описываем возможные сценарии эволюции системы с определенной ограниченной степенью точности, по мере того как она развивается в реальном времени.

Тем не менее, с математической точки зрения, нелинейные уравнения, описывающие эволюцию структур в открытых нелинейных средах, обладают инвариантно-групповыми решениями. Инвариантные решения в этом случае осуществляют связь пространства и времени. Это обстоятельство, в свою очередь, создает возможность находить элементы прошлого и будущего в реальных структурах нелинейного мира.

По определению инвариантные решения сохраняются в процессе эволюции. Следовательно, они содержат в себе информацию обо всех стадиях эволюции структур, а значит, если понять, как от инвариантных решений перейти к реальным переменным, то можно развернуть собранные в инварианты пространство, время и архитектуру структуры. В этом случае все стадии эволюции оказываются связанными определенными пространственно-временными преобразованиями.

С этих позиций пренебрегать математическим моделированием не стоит. Важно лишь понимать, что моделирование позволяет прогнозировать наиболее вероятные, возможные пути эволюции, но не обязательно реализованные или реализуемые в будущем. Значение экологического прогноза, особенно в природопользовании трудно переоценить. Главной целью прогноза является оценка предполагаемой реакции окружающей природной среды на прямое или опосредованное воздействие человека, а также решение задач будущего рационального природопользования.

В связи с этим следует привести интересное высказывание Силарда, касающееся модели ядерной зимы: «Если бы ядерная зима была невозможна, её следовало бы выдумать».

Принципиальная сущность современного экологического кризиса заключается в том, что потребляя органическое топливо в процессе хозяйственной деятельности человек вносит хаос в биосферу, разрушая при этом больше, чем создает [12]. Не зря Д.И. Менделеев говорил, что «нефть не топливо – топить можно и ассигнациями». Потребляя энергию угля, нефти, газа мы вносим хаос в биосферу, уничтожая ту упорядоченность, которая в ней сформировалась благодаря естественным биосферным процессам. Даже возобновляемые источники энергии не являются абсолютно экологически безвредными. Так, например, при эксплуатации ветроустановок возникают низкочастотные шумы, вибрации различной природы, электромагнитные излучения, производство солнечных батарей сопряжено с суще-

ственно большим количеством токсичных отходов, чем, например, ядерная энергетика.

Исходя из вышесказанного, при планировании использования тех или иных источников энергии необходимо учитывать не только суммарное экологическое воздействие техногенных факторов на окружающую среду, но и рассматривать обратные связи, разрушение которых может привести к потере устойчивости состояния биосферы, и как следствие к очередной бифуркации.

Отметим, что согласно [7] на асимптотической стадии процессы в бесконечномерной системе, удовлетворительно описываются сильно упрощенными конечномерными системами, т.е. возвращаясь к модели с гармониками, на поведение сложной нелинейной системы на асимптотической стадии существенное влияние оказывают лишь несколько гармоник. При этом нелинейность создает перекачку энергии от одной гармоники к некоторым другим, а диффузионные члены обуславливают затухание более высокочастотных гармоник.

### Литература

1. Гордиенко В.А. Векторно-фазовые методы в акустике.– М.: Физматлит, 2007. – 480 с.
2. Андреев Ю. А. Три кита здоровья. – М.: Феникс, 2009, 350 с.
3. Фейнман Р. Характер физических законов.– М.: Наука, 1987 г. – 230 с.
4. Моисеев Н.Н., Александров В.В., Тарко А.М. Человек и биосфера. Опыт системного анализа и эксперименты с моделями. – М.: «Наука», 1985. – 271 с.
5. Гордиенко В.А., Старкова М.В. Экология – synopsis XXI века// Физические проблемы экологии (Экологическая физика)// Сб. научн. трудов/ Под ред. В.И.Трухина и К.В.Показеева.– М.: МАКС Пресс, 2008. № 15. С.125-138.
6. Девис П. Проект Вселенной.– М.: ББИ, 2009.– 204 с.
7. Князева Е.Н., Курдюмов С.П. – Законы эволюции и самоорганизации сложных систем.– М.: Наука, 1994.– 236 с.
8. Гордиенко В.А., Гончаренко Б.И.,Гордиенко Т.В. Некоторые медико-физические аспекты воздействия инфразвука на организм и правил определения его уровней// Тез. докл. 3-й евразийский конгресс по медиц. физике и инженерии «Медицинская физика-2010». М.:МГУ, 2010.
9. Вернадский В.И. Научная мысль как планетарное явление. М.: Наука, 1991.
10. Алексеев В.В. Человек и биосфера.– М.: Издательство МГУ, 1973.– 26 с.
11. Крышев И.И., Рязанцев Е.П. Экологическая безопасность ядерно-энергетического комплекса России.– М.: ИзДАТ, 2010.– 460 с.
12. Алексеев В.В. Физика и экология.– М.: Знание, 1978. – 46 с.

ПРИБОР ДЛЯ ОПТИЧЕСКОГО СПЕКТРАЛЬНОГО АНАЛИЗА ЗАГРЯЗНЕНИЯ  
ВОДНЫХ СРЕДВ.С. Горелик<sup>2</sup>, К.В. Глаголев<sup>1</sup>, А.А. Есаков<sup>1</sup>, А.В. Кравцов<sup>1</sup>, Г.В. Козлова<sup>3</sup>А.Н. Морозов<sup>1</sup>, П.П. Свербиль<sup>2</sup>, С.Е. Табалин<sup>1</sup>*1. Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана**2. Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН**3. МГУПБ***Введение**

Присутствие токсических компонентов и микроорганизмов в воде является основополагающим фактором при оценке ее качества и возможности использования. Токсическими компонентами, присутствующими в воде, могут быть ароматические соединения: фенол, бензол, антрацен, флуорен, бензпирен, диоксины и другие вещества, в молекулярной структуре которых имеются ароматические кольца или гетероциклы, а также функциональные группы  $P = O$ ,  $C - S$ . Кроме того, в воде могут присутствовать тяжелые металлы и их соединения, тяжелая вода ( $D_2O$ ), цианиды и т. д.

Наличие в воде опасных для жизни микроорганизмов также является важным фактором при оценке ее качества. Известные к настоящему времени способы оценки присутствия в воде токсических компонентов и микроорганизмов являются весьма дорогостоящими и труднореализуемыми, особенно при анализе следовых количеств посторонних веществ.

Качество воды определяется также ее микроструктурой, зависящей от технологии ее приготовления и обработки.

Весьма информативными являются методы анализа микроструктуры воды, основанные на изучении характеристик вторичного излучения, возбуждаемого мощными полупроводниковыми светодиодами и лазерными источниками.

Основными физическими явлениями, наблюдаемыми при анализе вторичного излучения, возбуждаемого в химических соединениях источниками видимого и ультрафиолетового излучения, являются комбинационное рассеяние (КР) и фотолуминесценция (ФЛ).

В элементарном процессе КР происходит неупругое взаимодействие, в результате которого энергия фотонов рассеянного света отличается от энергии падающих на вещество фотонов возбуждающего излучения на величину энергии колебательных квантов вещества. Спектры комбинационного рассеяния являются характеристическими для каждого вещества и позволяют получать информацию о микроструктуре материальной среды.

В процессе ФЛ испускается излучение, обусловленное релаксацией возбужденных электронных состояний атомов и молекул вещества. Спектр ФЛ также является характеристикой данного вещества.

В настоящее время в качестве спектральных приборов используются автоматизированные монохроматоры и спектрографы. Фотоприемниками являются фотоэлектронные умножители (ФЭУ) и приборы с зарядовой связью

(ПЗС). Современная спектроскопическая установка является компьютеризированным измерительным комплексом.

Среди современных методов анализа лазерная спектроскопия комбинационного рассеяния выделяется высокой чувствительностью (уступая только масс-спектрометрии и радиофизическим методам), высокой степенью автоматизации, дистанционностью, неразрушаемостью образца. При дистанционном зондировании исчезает необходимость отбора и приготовления проб.

Для целей анализа состава водных сред важной задачей является формирование баз спектроскопических данных веществ и биологических объектов, потенциально содержащихся в воде. Формирование даже заведомо неполных баз спектроскопических данных является важной задачей по следующим причинам:

- чем больше справочных данных, тем надежнее результат анализа состава водной среды;

- спектры структурных аналогов различных веществ используются как материал для отнесения сигналов к определенным фрагментам структуры, т.е. для нахождения спектро-структурных корреляций. Далее эти фрагменты могут быть "опознаны" в молекулах неизвестных соединений;

В данной работе, продолжающей исследования [1-4], применялись методы регистрации спектров фотолуминесценции и комбинационного рассеяния света в водных средах для установления их молекулярного состава и структуры.

### **1. Описание лабораторной установки на базе импульсно-периодического лазера**

Для проведения лабораторных исследований в качестве источника возбуждения КР использовался импульсно-периодический лазер на парах меди, генерирующий излучение в видимой области спектра с длинами волн 510,6 и 578,2 нм. Средняя мощность излучения для приборов такого типа достигает 10 Вт. Излучение генерируется в импульсно-периодическом режиме с большой частотой следования ( $10^4$  Гц) коротких (20 нс) импульсов генерации с пиковой мощностью  $10^5$  Вт.

Высокая пиковая мощность лазерного излучения позволяет осуществить эффективное удвоение и сложение частот линий генерации лазера путем использования нелинейно-оптических кристаллов  $BaB_2O_4$ . Таким образом, на выходе лазерной установки было получено ультрафиолетовое излучение с длинами волн 255,3 нм, 271,2 нм, и 289,1 нм.

Использование селективного элемента в лазерном резонаторе позволило выделять только одну из линий возбуждения. 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 весьма эффективно 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).

Схема лабораторной установки с использованием импульсно-периодического

лазера на парах меди приводится на рисунке 1. Излучение от активного элемента (2) лазера на парах меди, работающего в режиме неустойчивого резонатора, фокусировалось длиннофокусной линзой в нелинейно-оптическом кристалле (4). Кристалл  $BaV_2O_4$  был вырезан таким образом, что условие синхронизма выполнялось для удвоения частот исходного лазерного излучения. Коэффициент преобразования видимого излучения в ультрафиолетовое составлял около 1%, т.е. ультрафиолетовое излучение на выходе лазера 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.

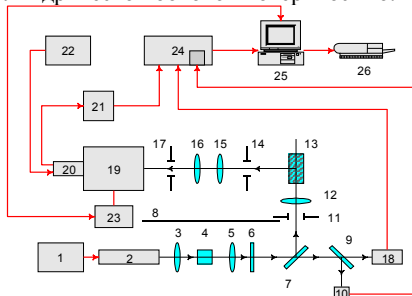


Рисунок 1. Схема лабораторной установки для наблюдения вторичного излучения в водных растворах ароматических соединений.

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 строб-импульса; 11, 14, 17 – диафрагмы; 13 – кювета с исследуемым веществом; 18 – фотодиод; 19 – монохроматор; 20 – фотоэлектронный умножитель; 21 – усилитель; 22 – блок питания ФЭУ; 23 – шаговый двигатель; 24 – система регистрации; 25 – компьютер; 26 – принтер.

Вторичное излучение, возникающее в кювете (13), собирается кварцевым конденсором под углом  $90^\circ$  к направлению возбуждающего луча; щель спектрометра (19) МСД-2 была расположена в фокальной плоскости второго кварцевого конденсора. Регистрация ультрафиолетового излучения осуществлялась с помощью фотоэлектронного умножителя (20) ФЭУ-106, работающего в режиме счета фотонов. За счет отвода малой доли возбуждающего излучения в блоке (10) формировался строб-импульс длительностью 30 нс. Этот импульс вводился в систему регистрации для временного сканирования. Строб-импульс позволял регистрировать спектры вторичного излучения при различных временах задержки в диапазоне 0 – 300 нс. Дифракционная решётка спектрометра поворачивалась с помощью шагового двигателя, управляемого с помощью компьютера. Время накопления сигнала при фиксированном положении дифракционной решетки изменялось в диапазоне 0,1 – 10 с в зависимости от интенсивности регистрируемого сигнала. Информация от регистрирующего устройства накапливалась в компьютере.

## 2. Устройство лабораторного образца малогабаритного молекулярного анализатора водных сред

Схема макета микроанализатора представлена на рисунке 2.

Управление лабораторным образцом и обработка результатов осуществляется с помощью персональной ЭВМ. Связь с внешними устройствами осуществляется через USB-порты. Сигнал на включение светодиодов и лазера от ПЭВМ поступает на плату управления, в состав которой входят микропроцессор и линейка аналого-цифровых и цифро-аналоговых преобразователей. Плата управления включает светодиоды и лазер по одному, попарно или одновременно. Такой набор режимов позволяет исследовать вторичное излучение, возбуждаемое в различных диапазонах, и использовать для анализа водных сред одновременно излучения КР и ФЛ.

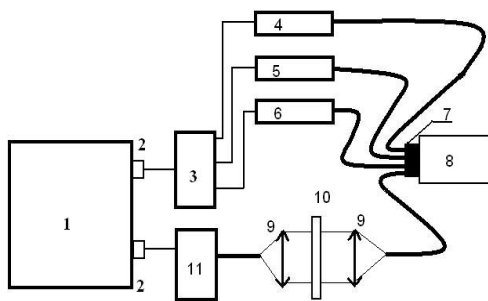


Рисунок 2. Схема макета микроанализатора.

1 - ПЭВМ. 2 – USB - порт. 3 – плата управления. 4 – светодиод  $\lambda = 280$  нм. 5 - светодиод  $\lambda = 365$  нм (или 527 нм). 6 – лазер  $\lambda = 532$  нм. 7 – световодный жгут. 8 – световодная головка. 9 – коллиматорные линзы. 10 – НОТЧ-фильтр. 11 – миниспектрометр.

Световодный жгут и его ответвления выполнены из кварца, что позволяет использовать их для работы как с ультрафиолетовым, так и с видимым излучением. Торцевое отверстие световодного жгута выполнено в виде световодной головки, куда подходят ответвления жгута, по которым передается излучение от светодиодов и одно ответвление, по которому вторичное излучение передается на миниспектрометр.

Приемное ответвление световодного жгута подводит принятое излучение к коллиматорной линзе, формирующей широкий параллельный пучок излучения. Этот пучок проходит через НОТЧ-фильтр, который является заграждающим голографическим фильтром. Он обеспечивает ослабление лазерного излучения на длине волны  $\lambda = 532$  нм на 6 порядков, имея ширину полосы заграждения 10 нм. Это позволяет исследовать вторичное излучение при больших значениях времени накопления сигнала. Фильтр размещен на стеклянной подложке, имеющей хорошее пропускание излучения в видимой и ультрафиолетовой области при  $\lambda > 350$  нм. Прошедшее через фильтр излучение фокусируется линзой на торцевое

световода и поступает в миниспектрометр FSD-8. Управление режимом работы спектрометра осуществляется от ПЭВМ.

Внешний вид миниспектрометра FSD-8 представлен на рисунке 3, технические характеристики миниспектрометра FSD-8 представлены в таблице 1.

Таблица 1. Технические характеристики миниспектрометра FSD-8.

№	Параметр	Значение
1.	Спектральный диапазон:	180 - 1080 нм
2.	Дифракционная решетка:	600 штрихов/мм
3.	Спектральное разрешение:	1,5 нм
4.	Чувствительность	0,1 – 0,2 нВт: (для длины волны 632,8 нм)
5.	Дисперсия по длине волны:	2 - 4 нм
6.	Оптический детектор:	TCD1304DG-X
7.	Число пикселей детектора:	3648
8.	Размер пикселя CCD:	0,008 мм x 0,2 мм
9.	Минимальное время экспозиции:	100 мкс
10.	Максимальное время экспозиции:	32 с
11.	Разрядность АЦП:	14 бит (16384 квантов)
12.	Время преобразования АЦП:	5 мкс/пиксел
13.	Время измерения одного полного спектра:	20 мс
14.	Оптический разъем:	SMA Адаптер (для SMA-905)
15.	Источник питания:	питание осуществляется через шину USB.
16.	Потребляемый ток:	не более 70 мА
17.	Габаритные размеры:	170 мм x 85 мм x 37 мм
18.	Масса:	не более 350 граммов

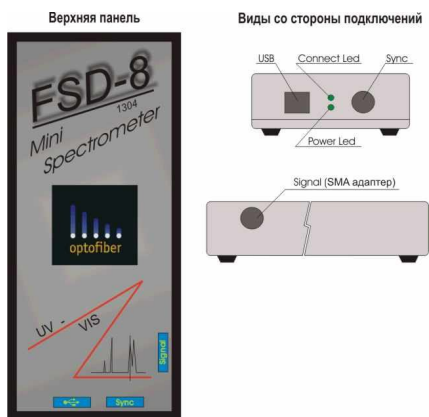


Рисунок 3. Внешний вид мини-спектрометра FSD-8.

Внешний вид лабораторного образца экспресс-анализатора приведен на рисунке 4.

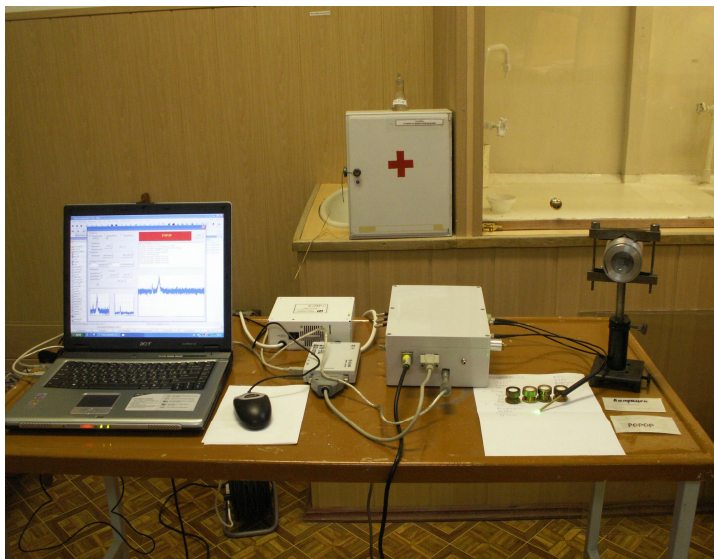


Рисунок 4. Внешний вид лабораторного образца экспресс-анализатора.

На рисунке 5 показан блок, в котором размещены излучатели, фильтр с коллиматорными линзами и мини-спектрометр, с подключенными к блоку ответвлениями световодного жгута.



Рисунок 5. Блок излучателей и приемника.



Для управления лабораторным образцом молекулярного анализатора была разработана специализированная программа для осуществления следующих функций:

- управление блоком излучателей;
- получение цифровых данных, сформированных миниспектрометром;
- вызов функции обработки спектральных данных;
- проведение анализа результатов работы;
- осуществление вывода на экран графической и текстовой информации о результатах анализа.

Разработанное программное обеспечение позволяло проводить автоматическое распознавание спектров вторичного излучения. На вход процедуры распознавания во всех случаях подается полный зарегистрированный спектр излучения в диапазоне 250 – 750 нм с указанием параметров эксперимента, в том числе количества и типа источников излучения, времени экспозиции и коэффициента, характеризующего интенсивность излучения. Пользователь имеет возможность регистрации вторичного излучения с применением НОТЧ-фильтра, используемого для подавления основного излучения от лазерного источника.

В зависимости от выбранных источников излучения для распознавания и идентификации спектров используются различные алгоритмы и диапазоны длин волн.

Для идентификации спектров используется сравнение их со спектрами известных веществ, которые предварительно измеряются и заносятся в базу данных. Для каждого типа используемого возбуждающего излучения составляется своя база данных; распознавание может вестись как отдельно по каждому типу излучения, так и совместно по совокупности спектров, полученных с различными источниками. Спектры базы данных должны перекрывать диапазон, используемый для распознавания.

### **3. Некоторые результаты исследований с помощью экспресс-анализатора для анализа молекулярного состава водных сред**

#### **3.1. Результаты исследований спектров экспресс-анализатором на базе импульсно-периодического лазера**

Известно, что в спектре комбинационного рассеяния воды присутствуют полосы, соответствующие трем фундаментальным типам колебаний молекулы  $H_2O$ :  $A_1$ -тип,  $\nu_1=3450\text{ см}^{-1}$  (валентное полносимметричное колебание);  $A_1$ -тип,  $\nu_2=1645\text{ см}^{-1}$  (деформационное полносимметричное колебание) и  $B_1$ -тип,  $\nu_3=3830\text{ см}^{-1}$  (валентное неполносимметричное колебание).

Для исследования спектров КР воды были подготовлены различные пробы, полученные путем очистки исходной воды с помощью фильтрующих систем, разработанных к настоящему времени промышленностью.

На рисунке 6 приводится сопоставление спектров флуоресценции 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. Как видно из этого рисунка, 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.

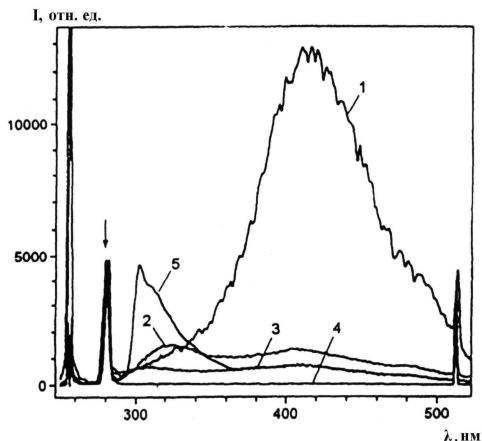


Рисунок 6. Спектры КР и флуоресценции водных проб: 1, 2 – вода из водопроводной сети г. Москвы, 3 – "чистая" вода из Подмосковья, 4 – вода, очищенная с помощью фильтра "Аквафор Модерн", 5 – водный раствор флуорена с концентрацией 1 мкг/л. Стрелка показывает положение линии КР полносимметричного колебания  $\nu_1 (A_1)$  молекулы воды.

На рисунке 7 приводятся спектры водного раствора антрацена с концентрацией 1 мкг/л, полученные без задержки (кривая 1) и с задержкой  $\tau = 50$  нс (кривая 2).

Важно отметить, что спектр "задержанной" флуоресценции (кривая 2) существенно отличается от "синхронного" спектра: резко ослаблены пики, обусловленные возбуждающим излучением ( $\lambda = 255,3$  нм) и комбинационного рассеяния, происходящим практически синхронно с импульсом возбуждающего излучения; ряд максимумов в "задержанном" спектре проявляется гораздо более отчетливо.

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  $10 - 10^6$  мл<sup>-1</sup>. Рисунки 8 и 9 иллюстрируют вид спектров флуоресценции водной взвеси такой бактерии для концентрации  $10^3$  мл<sup>-1</sup>. При этом спектр, представленный на рисунке 8, соответствует бактерии *in vivo*, а спектр на рисунке 9 – бактерии, предварительно подвергнутой облучению жестким ультрафиолетом (ксеноновой лампой) в течение 30 минут.

Как видно из сравнения рисунков 8 и 9, в результате облучения бактерий жестким ультрафиолетом происходит существенное изменение вида спектра флуоресценции. 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.

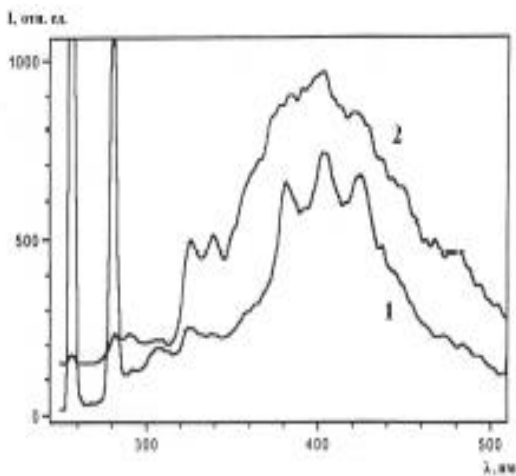


Рисунок 7. Спектры вторичного излучения водного раствора антрацена с концентрацией 1 мкг/л без задержки (кривая 1) и с задержкой  $\tau = 50$  нс (кривая 2, приведена с 7-кратным увеличением).

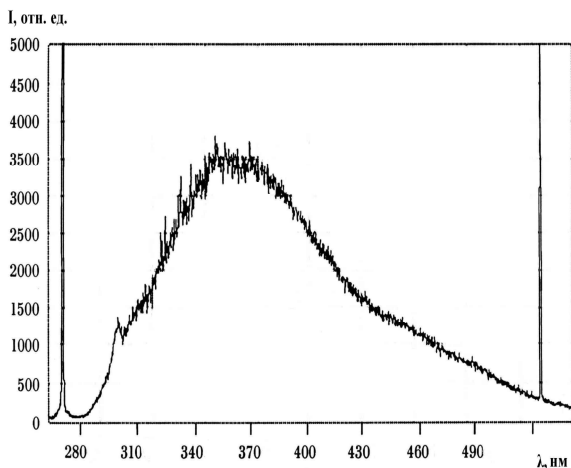


Рисунок 8. Спектр флуоресценции бактерии *Bacillus thuringiensis* in vivo при концентрации  $10^3$  мл<sup>-1</sup>.

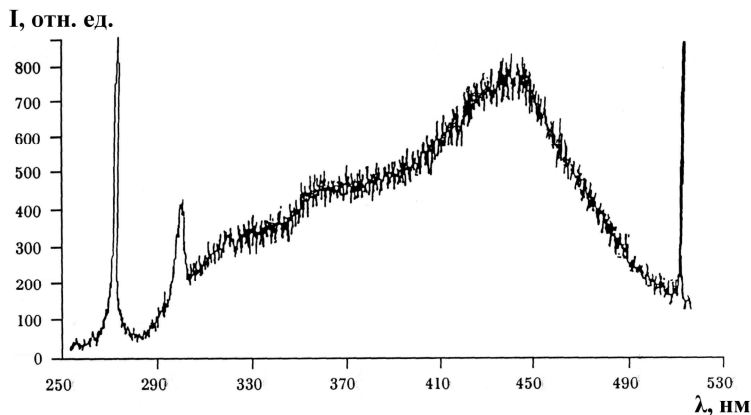


Рисунок 9. Спектр флуоресценции бактерии *Bacillus thuringiensis*, подвергнутой воздействию жесткого ультрафиолетового облучения в течение 30 мин. Концентрация бактерий в водной взвеси –  $10^3$  мл<sup>-1</sup>.

### 3.2. Результаты исследований спектров с помощью лабораторного образца малогабаритного молекулярного анализатора водных сред

На рисунке 10 представлены спектры вторичного излучения при возбуждении светодиодом с длиной волны 365 нм нескольких водных сред: писчей бумаги (1), пропитанной водой, воды из водопроводной сети (2), раствора  $10^{-6}$  г/л РОРОР в воде (3), раствора  $10^{-6}$  г/л R6G в воде (4). Спектры вторичного излучения различных типов молекулярного, как видно из рисунка 15, существенно различаются.

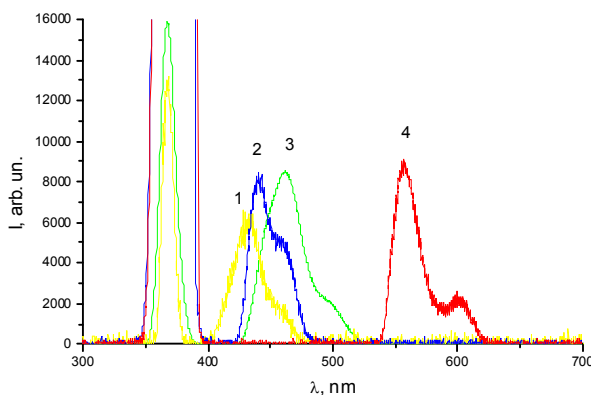


Рисунок 10. Спектры вторичного излучения различных веществ: 1 - бумага, 2 - водопроводная вода, 3 - раствор  $10^{-6}$  г/л РОРОР в воде, 4 - раствор  $10^{-6}$  г/л R6G в воде (при возбуждении светодиодом с длиной волны 365 нм).

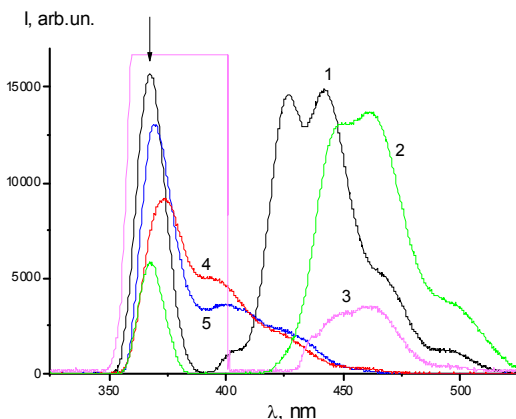


Рисунок 11. Спектры вторичного излучения различных водных взвесей, полученные при дистанционном зондировании: 1 – антрацен; 3 – РОРОР; 4 – РРО; 5 - стильбен при возбуждении светодиодом с длиной волны 365 нм (отмечена стрелкой). Кривая 2 соответствует спектру сухого порошка РОРОР при контактном зондировании.

Таблица 2. Результаты распознавания некоторых веществ

База данных Вещество	Альбу мин	Антра цен	Бумага	$K_2CrO_4$	$KIO_3$	РОРОР	РРО	Сера	Стиль бен
Альбумин	<b>1.00</b>	0.01	0.01	0.02	0.03	0.06	0.03	0.08	0.06
Антрацен	0.01	<b>1.00</b>	0.78	0.04	0.36	0.25	0.27	0.17	0.34
Бумага	0.01	0.78	<b>1.00</b>	0.02	0.32	0.28	0.31	0.14	0.41
$K_2CrO_4$	0.02	0.04	0.02	<b>1.00</b>	0.21	0.05	0.06	0.37	0.08
$KIO_3$	0.03	0.36	0.32	0.21	<b>1.00</b>	0.49	0.25	0.57	0.33
РОРОР	0.06	0.25	0.28	0.05	0.49	<b>1.00</b>	0.22	0.27	0.31
РРО	0.03	0.27	0.31	0.06	0.25	0.22	<b>1.00</b>	0.23	0.71
Сера	0.08	0.17	0.14	0.37	0.57	0.27	0.23	<b>1.00</b>	0.29
Стильбен	0.06	0.34	0.41	0.08	0.33	0.31	0.71	0.29	<b>1.00</b>

На рисунке 11 представлены спектры вторичного излучения нескольких веществ, полученные при дистанционном зондировании исследуемых водных взвесей светодиодом с длиной волны 365 нм: антрацена (1),  $10^{-6}$  г/л РОРОР в воде (3), РРО (4) и стильбена (5). Кривая 2 соответствует спектру сухого порошка РОРОР при контактном зондировании. Как видно из этого рисунка, спектр вторичного излучения (кривая 3), полученный при дистанционном зондировании, хорошо коррелирует с соответствующим спектром, полученным при контактном зондировании (кривая 2).

### 3.3. Некоторые результаты распознавания спектров вторичного излучения

В таблице 2 приведены некоторые результаты распознавания веществ.

В первой строке таблицы приведены названия веществ из рабочей базы спектральных данных (в последующих таблицах наименования веществ заменены их порядковыми номерами). В первом столбце приводятся наименования исследованных веществ.

В ячейках таблицы приведены значения функции сходства, вычисленные в процессе работы программы распознавания.

#### Заключение

В данной работе исследованы закономерности вторичного излучения в водных средах при возбуждении излучения в видимом и ультрафиолетовом диапазонах с применением малогабаритных мощных ультрафиолетовых светодиодов, а также малогабаритных лазеров – твердотельного лазера с диодной накачкой и лазера на парах меди.

Создан лабораторный образец малогабаритного молекулярного анализатора водных сред на основе использования излучения в видимом и ультрафиолетовом диапазонах малогабаритных ультрафиолетовых светодиодов и малогабаритного твердотельного лазера с диодной накачкой.

При помощи созданного лабораторного макета получены спектры спонтанного комбинационного рассеяния при импульсно-периодическом и непрерывном возбуждении воды, приготавливаемой в различных технологических условиях и типичных водных сред, включая растворы органических (бензол, толуол, ацетон, сахар, спирты, РРО, РОРОР) и неорганических (иод, иодат калия, нитрит натрия, нитрат цезия, хлористый аммоний и др.) соединений, а также суспензии биологических структур и микроорганизмов в воде.

Разработана и экспериментально проверена методика распознавания химических соединений в водных средах.

#### Литература

1. V. S. Gorelik, A. A. Esakov, A. N. Morozov, P. P. Sverbil' and S. D. Tyves Analysis of the composition and structure of aqueous media under excitation by lasers and light emitting diodes. – Journal of Russian Laser Research, 2008, V.28, №1, pp.71-89.
2. В.С. Горелик, А.А. Есаков, Л.И. Злобина, А.Н. Морозов, П.П. Свербил. – Молекулярный анализ водных сред при светодиодном и лазерном возбуждении. – Препринт № 2, М.: ФИ РАН, 2008. – 45 с.
3. А.П. Гончаров, В.С. Горелик, А.В. Кравцов. Комбинационное рассеяние света конденсированных веществ, помещенных в фотонные ловушки. – Труды 4 Всеросс. конф. "Необратимые процессы в природе и технике", ч. 2, М.: ФИАН, 2007. – с. 501 – 504.
4. В.С. Горелик, Г.В. Козлова – Ультрафиолетовая лазерная спектроскопия водных сред. – Физические проблемы экологии. №13, 2005, С.147-156.

УДК 535.372

## СПЕКТРАЛЬНО-ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЕ СВОЙСТВА ВОДНЫХ РАСТВОРОВ ГУМИНОВЫХ ПРЕПАРАТОВ

Гостева О.Ю.<sup>1</sup>, Изосимов А.А.<sup>2</sup>, Пацаева С.В.<sup>1</sup>, Южаков В.И.<sup>1</sup>, Якименко О.С.<sup>2</sup><sup>1</sup> *Физический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова*<sup>2</sup> *Факультет почвоведения МГУ им. М.В. Ломоносова*

Гуминовые вещества представляют собой природные высокомолекулярные полимеры нерегулярного строения, сформировавшихся в биосфере в результате преобразований отмершей биомассы. В настоящее время перспективным является использование гуминовых веществ в промышленности, сельском хозяйстве и при восстановлении нарушенной почвы. Однако разнообразие источников сырья и технологических приемов получения промышленных гуминовых препаратов (ГП) обуславливают большой диапазон различия в их свойствах. В связи с этим встает проблема поиска аналитических методов для классификации ГП. Одним из таких методов может быть молекулярная спектроскопия. В работе исследуются спектрально-люминесцентные характеристики водных растворов ГП производства РФ, США, Канады и Китая. Показано, что промышленные ГП из торфов и сапропеля близки по спектральным свойствам к гуминовым веществам природных вод или почв. Напротив, ГП из углефицированных материалов или органического отхода имеют спектральные характеристики (положение максимума флуоресценции, квантовый выход флуоресценции и их зависимость от длины волны возбуждения), отличающие их от природных гуминовых веществ.

**ВВЕДЕНИЕ**

В последние годы все более необходимым становится применение экологически чистых и безопасных природных веществ в сельском хозяйстве, промышленности и при восстановлении нарушенной почвы. Одним из перспективных направлений является использование гуминовых веществ (ГВ) - природных высокомолекулярных полимеров нерегулярного строения, сформировавшихся в биосфере (почвах, торфах, углях, природных водах) в результате преобразований отмершей биомассы. Биосферные функции гуминовых веществ общеизвестны [1-5]. В связи с этим, многие промышленные компании стали производить разнообразные коммерческие гуминовые препараты (ГП) из органического сырья по промышленным технологиям и предлагать их в качестве органических удобрений, стимуляторов роста растений, восстановителей нарушенных почв и сорбентов токсичных загрязнений, что привело к изобилию на рынке коммерческих продуктов на основе ГВ или солей гуминовых кислот – гуматов калия или натрия.

Несмотря на накопленный положительный опыт использования промышленных ГП [6-10], ряд вопросов еще остается нерешенным. Использование различных источников сырья и технологических приемов получения ГП обуславливают значительное разнообразие их свойств. Наряду с препаратами высокого качества, на рынке предлагается большое количество «гуминоподобных» продуктов, в которых

нет того комплекса свойств, который позволяет природным ГВ оптимизировать свойства почв и влиять на метаболические процессы в растениях. В связи с этим встает проблема поиска аналитических методов для стандартизации ГП, которые помимо характеристики их химических свойств дают информацию об их генезисе и в дальнейшем могут явиться основой для разработки системы показателей качества гуминовых продуктов.

Спектральные методы, обладающие такими неоспоримыми преимуществами как высокая чувствительность, оперативность и возможность реализации в бесконтактном режиме, давно применяются в экологических исследованиях, в том числе для диагностики гуминовых веществ природных вод [11-14]. Природные гуминовые вещества обладают способностью светиться под действием УФ или видимого излучения. Максимум их свечения приходится на синюю область видимого спектра и зависит от длины волны возбуждения. ГВ природных вод или почвенного происхождения имеют максимум флуоресценции около 450÷460 нм при возбуждении на 270 нм [13]. При изменении длины волны возбуждения от 270 до 310 нм максимум полосы испускания смещается в сторону более коротких длин волн. Такое смещение спектров испускания при увеличении длины волны возбуждения называют «синим сдвигом» [15,16].

Промышленные ГП в водном растворе также обладают способностью флуоресцировать, однако их спектрально-люминесцентные свойства пока еще мало изучены. Исследования промышленных гуматов показали, что анализ спектров флуоресценции может быть первым этапом в выявлении их структуры, поскольку особенности и характеристики полос флуоресценции несут информацию о составе, структурных особенностях и генезисе [17]. Так, спектры флуоресценции с лазерным возбуждением на длине волны 355 нм для промышленных гуматов из угля имеют характерный рисунок, совпадающий со спектром гуминовых кислот угля и максимумом испускания флуоресценции на 470-480 нм. В гуматах, полученных из лигнина и торфа, максимумы спектра поглощения сдвинуты в коротковолновую область на 20-30 нм.

Практически все описанные в литературе спектральные измерения проведены для коммерческих препаратов – стандартов гуминовых веществ Международного Гуминового Общества (IHSS), гуминовой кислоты фирмы Fluka или натриевой соли гуминовой кислоты фирмы Aldrich. Спектры флуоресценции гуминовых кислот IHSS имеют максимум свечения в области 500÷520 нм, а спектры флуоресценции фульвокислот IHSS – в области 445÷465 нм [18]. Показано, что по спектрам флуоресценции, измеренным при различных значениях pH, можно отличить гуминовые вещества IHSS, выделенные из воды или выделенные из почвы [19]. Типичные значения квантового выхода флуоресценции для гуминовых кислот IHSS составляют несколько процентов, для фульвокислот эти значения еще меньше [20]. Для гуминовой кислоты фирмы Fluka положение максимума в спектре флуоресценции изменяется в пределах 450÷540 нм в зависимости от pH и от концентрации раствора [21]. Изучение гуминовой кислоты фирмы Fluka и натриевой соли гуминовой кислоты фирмы Aldrich методом флуоресцентной спектроскопии с фазовым разрешением [22] позволило выделить два типа флуорофоров с максимумами свечения 460 и 520 нм, соотношение интенсивности флуоресценции которых зависит от концентрации и pH раствора.



Гуминовые препараты, полученные по индустриальным технологиям, по многим свойствам отличаются от природных ГВ, выделенных лабораторными методами [23]. Это находит отражение и в спектрально-люминесцентных свойствах. В противоположность гуминовым веществам природной воды растворы соли гуминовой кислоты Aldrich не проявляли заметного «синего сдвига» спектров испускания: положение максимума спектра флуоресценции при изменении длины волны возбуждения от 270 до 355 нм оставалось постоянным [14]. Кроме того, квантовый выход флуоресценции соли гуминовой кислоты Aldrich меньше типичных значений для природных гуминовых веществ, и, в отличие от квантового выхода природных ГВ, не зависит от длины волны возбуждения спектров в диапазоне 270-355 нм [13-14].

Несмотря на имеющиеся в литературе сведения о некоторых спектрально-люминесцентных свойствах ряда коммерческих гуминовых препаратов, систематическое исследование оптических свойств промышленных ГП и их сравнение со свойствами природных гуминовых веществ не проводилось. Настоящая работа посвящена этой проблеме. Были измерены и проанализированы спектры поглощения и флуоресценции водных растворов ряда промышленных ГП, полученных из различных источников сырья разными производителями, выявлены особенности спектральных характеристик в зависимости от генезиса органического вещества и состава препарата, а также оценены возможности применения спектральных методов для качественной характеристики гуминовых препаратов.

## ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

### Промышленные препараты гуминовых веществ

Гуматы калия и натрия, на основе которых производят ГП, чаще всего получают из углей различной степени зрелости и окисленности или торфа, реже - из озерных донных отложений (сапропелей) и промышленных органических отходов. Основной метод, которым выделяют гуминовые вещества, - щелочная экстракция растворами аммиака или гидроксидами калия или натрия. Альтернативный способ предполагает механическое измельчение бурого угля с твердой щелочью, в результате чего получается твердый, растворимый в воде гумат калия или натрия. Такие обработки переводят связанные гуминовые вещества в водорастворимые соли - гуматы калия или натрия, обладающие высокой биологической активностью.

Объектами исследования были ГП в виде солей гуминовой кислоты - гуматов натрия и калия, полученные отечественными и зарубежными фирмами-производителями из 7 различных групп сырьевых источников: углефицированных материалов (бурого угля, лигнита, леонардита, и гумалита), торффов, сапропеля и промышленного органического отхода (табл.1). Бурый уголь и лигнит относятся к наиболее молодым слабоуглефицированным ископаемым углям низкого сорта, леонардит и гумалит – окисленные формы таких углей. ГП из промышленного отхода синтезирован из лигносульфоната – отхода целлюлозно-бумажного комбината.

Табл. 1. Описание и состав изученных ГП.

<i>Сырьевой источник, страна-производитель</i>	<i>Название препарата</i>	<i>Сводн, % сухой массы препарата</i>	<i>Доля <math>C_{KРФ}</math> от Сводн, %</i>	<i>Доля <math>C_{ГК}</math> от Сводн, %</i>
Сапропель, РФ	Sa-Plod	18	48	52
Торф, РФ	Pe-IXP	7	61	40
Торф, РФ	Pe-Eda	24	17	83
Бурый уголь, РФ	BC-Hum	30	12	88
Лигнит, США	Li-Ion	18	35	65
Лигнит, США	Li-BGHa	19	95	5
Лигнит, Китай	Li-Sol80	30	9	91
Леонардит, РФ	Le-Sah	15	21	79
Леонардит, США	Le-HPA	22	29	71
Леонардит, США	Le-Sp100	26	23	77
Гумалит, США	Hu-Usa	16	15	86
Гумалит, Канада	Hu-Dsol	21	24	76
Гумалит, США	Hu-Bsol	12	45	55
Лигносульфат, РФ	OW-LhNa	25	91	9

В водных растворах ГП определяли состав органического вещества: общее содержание водорастворимого углерода (Сводн) и подвижных гуминовых веществ - углерода гуминовых кислот ( $C_{ГК}$ ) и углерода веществ кислоторастворимой фракции ( $C_{KРФ}$ ). Общее содержание углерода в водной вытяжке измеряли бихроматным методом Тюрина после выпаривания известного объема раствора; содержание углерода ГК – тем же методом после их осаждения серной кислотой при pH=2, центрифугирования и последующего растворения в щелочи; и содержание углерода веществ КРФ в кислом фильтрате после осаждения ГК [24]. Вещества кислоторастворимой фракции в водных растворах ГП представлены собственно фульвокислотами и неспецифическими органическими соединениями (низкомолекулярные органические кислоты, фенольные соединения, аминокислоты, углеводы). Состав исследованных гуминовых препаратов представлен в табл. 1.

#### **Спектральные измерения и расчет квантового выхода флуоресценции**

В работе использовали растворы гуминовых препаратов концентрации 0,02 г/л в дистиллированной воде, величины pH составляли 5,9 ÷ 6,2. Спектры поглощения в диапазоне от 200 до 700 нм измеряли на двулучевом спектрофотометре Unicо в кварцевых кюветках с длиной оптического хода 1 см. Спектры испускания флуоресценции регистрировали с шагом 1 нм на флуориметре Solar CM2203 в стандартных кварцевых кюветках для флуориметрии при возбуждении на длинах волн 270, 310 и 355 нм.

Расчет квантового выхода флуоресценции  $\Phi$  проводили методом эталонного соединения, примененному ранее для проб природной воды [14]. В качестве эталонного соединения использовался водный раствор сульфата хирина с добавлением серной кислоты, поскольку по форме спектральной линии и положению макси-

мума флуоресценции он близок к гуминовым веществам. Была выбрана следующая схема измерений:

1. Производится измерение спектров испускания флуоресценции и значений оптической плотности  $D(\lambda_{\text{ex}})$  на длине волны возбуждения  $\lambda_{\text{ex}}$  для растворов всех исследуемых соединений и для нескольких концентраций раствора эталонного соединения.

2. По спектрам испускания флуоресценции рассчитываются значения интегральной интенсивности флуоресценции  $I_{\text{флю}}(\lambda_{\text{ex}})$  как площадь под контуром спектра без учета пика комбинационного рассеяния (КР) света молекулами воды.

3. При наличии спектров флуоресценции и поглощения, измеренных для нескольких концентраций одного и того же образца, строится зависимость интегральной интенсивности флуоресценции  $I_{\text{флю}}$  от оптической плотности  $D(\lambda_{\text{ex}})$  на длине волны возбуждения;

4. Экспериментальные зависимости аппроксимируются проходящими через 0 прямыми; вычисляются коэффициенты наклона прямых  $K_x$  для каждого из исследуемых соединений и  $K_{\text{ет}}$  для эталонного соединения.

5. Искомый квантовый выход флуоресценции находится по формуле  $\Phi_x = \Phi_{\text{ет}} * K_x / K_{\text{ет}}$ .

6. Если для некоторых соединений были измерены спектры только для одной концентрации, то квантовый выход флуоресценции рассчитывается по формуле  $\Phi_x = \Phi_{\text{ет}} * I_{\text{флю}} / (K_{\text{ет}} D)$ .

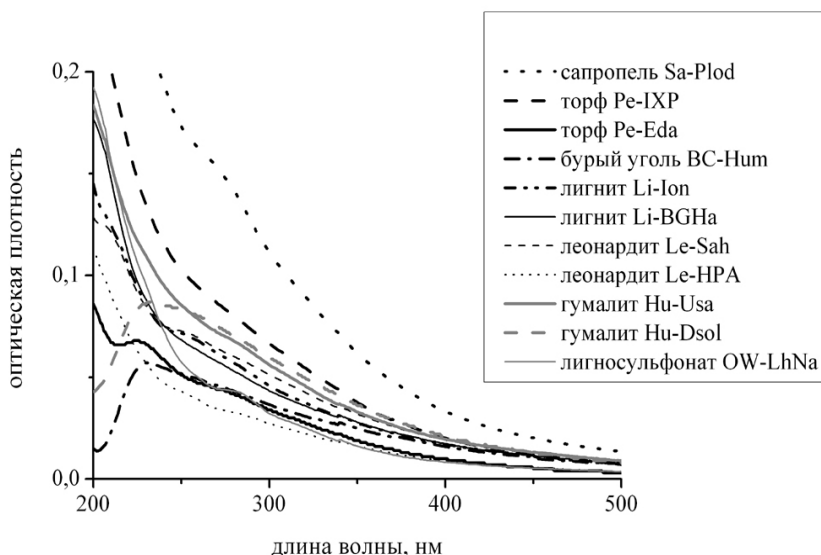
Квантовый выход флуоресценции может зависеть от длины волны возбуждения, поэтому рассчитывается по спектральным характеристикам, измеренным для одной и той же  $\lambda_{\text{ex}}$ . Так как эталонное соединение, как правило, имеет высокую эффективность свечения, измерение его спектров флуоресценции можно проводить при меньших спектральных щелях флуориметра, чем для слабо флуоресцирующих образцов. В таком случае при расчете квантового выхода флуоресценции необходимо произвести соответствующую коррекцию интенсивности. В наших экспериментах при измерении спектров испускания природных ГВ и промышленных ГП на флуориметре использовались спектральные щели 5 нм, а при измерении раствора сульфата хинина – 2 нм. Чтобы пересчитать интенсивность флуоресценции, измеренную для щелей 5 нм, вводились поправочные коэффициенты, полученные исходя из соотношений интенсивности полосы КР дистиллированной воды, измеренной при разных щелях монохроматора. Относительная погрешность определения квантового выхода флуоресценции описанным выше методом составила не более 10%.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

### Спектры поглощения водных растворов гуминовых препаратов

Гуминовые вещества поглощают УФ и видимый свет, их оптическая плотность монотонно убывает при увеличении длины волны. В видимой области спектра поглощение использованных ГП мало, поэтому на рис. 1 приведены спектры поглощения в диапазоне спектра 200÷500 нм. Спектры некоторых препаратов имеют особенности, заключающиеся в появлении слабых максимумов в диапазоне 225÷270 нм. В этой области поглощают многие низкомолекулярные фенольные соединения, продукты распада лигнина растительных тканей. Особенности в спек-

трах поглощения в этой области обнаружены только для ГП из наиболее молодых, не прошедших стадии углефикации органических материалов с высоким содержанием веществ кислоторастворимой фракции (табл.1). Это свидетельствует о том, что в технологическом процессе получения ГП из сырья, сохранившего фрагменты лигниновой структуры, в препарат переходят низкомолекулярные вещества фенольной природы. В сырье, прошедшем более глубокие стадии углефикации, эти фрагменты не сохраняются и спектры поглощения полученных из него ГП не имеют выраженных максимумов во всем диапазоне длин волн. Поэтому спектры поглощения водных растворов образцов в УФ области, возможно, могут быть характеристическим показателем для идентификации сырьевого источника ГП. Кроме того, поскольку многие фенолкарбоновые кислоты обладают высокой физиологической активностью, то наличие пиков поглощения в УФ области также может косвенно характеризовать потенциальную эффективность ГП в качестве стимулятора роста растений.

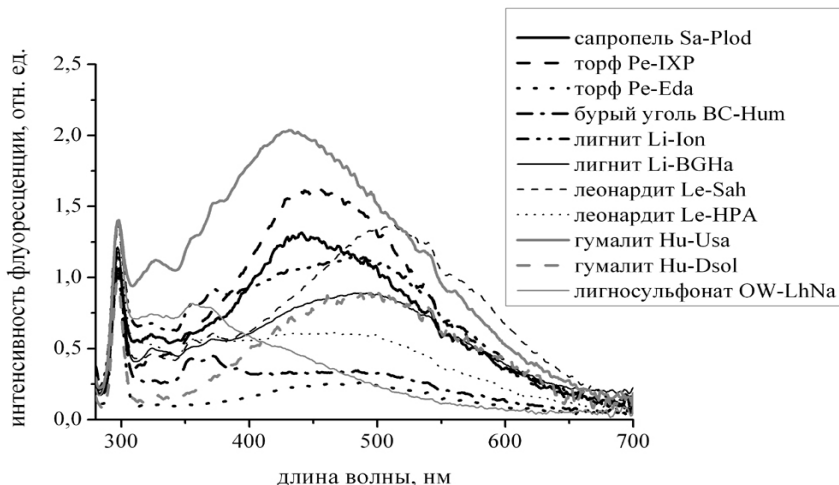


**Рис.1.** Спектры поглощения водных промышленных гуминовых препаратов.

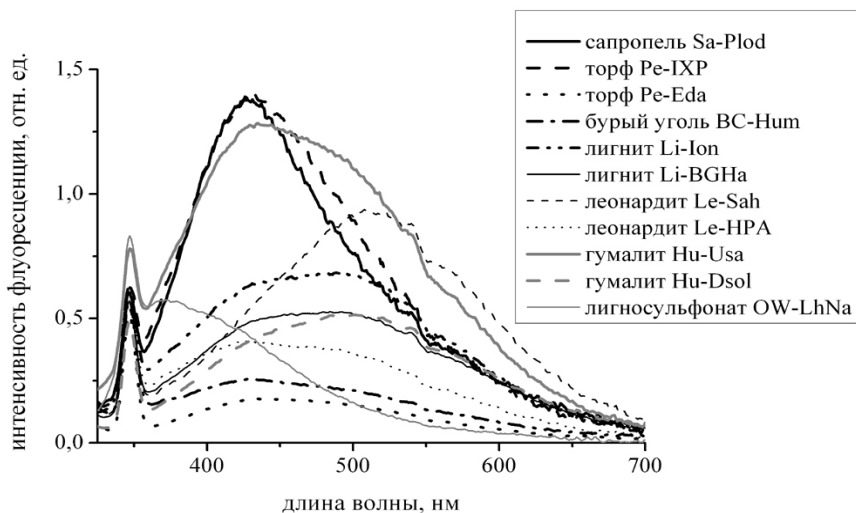
### Спектры флуоресценции водных растворов гуминовых препаратов

Гуминовые вещества обладают способностью флуоресцировать под действием излучения УФ и видимого света. Спектр испускания флуоресценции представляет собой широкую полосу от 350 до 600 нм с максимумом в районе 450-500 нм, в зависимости от происхождения гуминовых веществ. Положение максимума флуоресценции может также зависеть от длины волны возбуждающего света  $\lambda_{ex}$ , что будет свидетельствовать о наличии нескольких флуорофорных групп в составе вещества. Промышленные гуминовые препараты, полученные из разных источни-

ков, при возбуждении светом с  $\lambda_{ex} = 270, 310$  или  $355$  нм обладают спектрами флуоресценции, изображенными на рис.2-4.



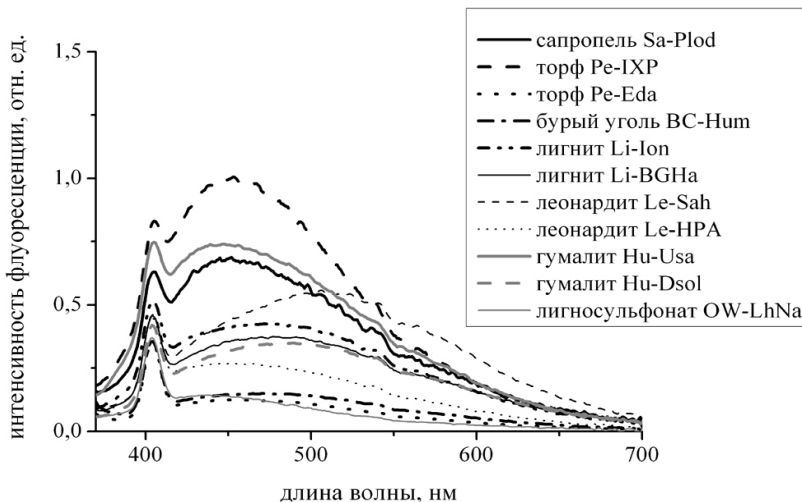
**Рис.2.** Спектры флуоресценции растворов промышленных гуминовых препаратов при возбуждении на длине волны 270 нм.



**Рис.3.** Спектры флуоресценции растворов промышленных гуминовых препаратов при возбуждении на длине волны 310 нм.

Как видно из рисунков, для большинства образцов ГП максимум флуоресценции ( $\lambda_{max}$ ) расположен в районе 500 нм (табл.2). Для растворов ГП из сапрпеле-

ля, торфа некоторых препаратов из гумалита максимум флуоресценции приходится на более коротковолновую область 430÷480 нм, а максимум флуоресценции ГП из лигносульфоната расположен в УФ диапазоне (360 нм). Помимо основного пика флуоресценции в видимой области, для большинства ГП характерны три небольших пика на 327, 355 и 371 нм при возбуждении на 270 нм.



**Рис.4. Спектры флуоресценции растворов промышленных гуминовых препаратов при возбуждении на длине волны 355 нм.**

Для ГП растительного происхождения, из торфов и сапропелей, а также для лигносульфоната характерно преобладание веществ кислоторастворимой фракции (см. табл.1): фульвокислот, а также низкомолекулярных карбоновых и фенолкарбоновых кислот, которые вносят существенный вклад в спектры испускания. Поэтому для таких ГП максимум флуоресценции смещается от длинноволновых значений, характерных для ароматических флуорофоров гуминовых кислот, к более коротковолновым, характерным для фульвокислот.

Определяющее значение, вероятно, имеет не только количество, но и качественный состав кислоторастворимой фракции. Так, в ГП из торфа Pe-Eda, несмотря на относительно низкую долю КРФ в его составе (14% по углероду) описанная закономерность прослеживается для  $\lambda_{ex}=310$  и 355 нм, в то время как в ГП из лигнита Li-BGHa с содержанием КРФ 91% она не выявлена. Этот факт свидетельствует о том, что, в отличие от ГП из торфа, в составе данного препарата отсутствуют вещества, способные флуоресцировать в коротковолновой области.

Гуминовые вещества природных вод или почв имеют максимум флуоресценции около 450÷460 нм при возбуждении на 270 нм [13]. По характеру спектров флуоресценции к ним наиболее близки ГП растительного происхождения, их максимумы флуоресценции приблизительно совпадают. Возможно, это связано со сходным составом органического вещества и довольно высоким содержанием фульвокислот и индивидуальных органических соединений. В отличие от них, у гуматов из углефицированных материалов (бурого угля, лигнита, леонардита и

некоторых препаратов из гумалита) максимум флуоресценции сдвинут относительно максимума флуоресценции растворенного органического вещества морского и почвенного происхождения в длинноволновую область на 40-50 нм и расположен около 500 нм.

**Табл.2. Положение максимума испускания флуоресценции и спектральные характеристики для растворов ГП в воде**

Название ГП	Источник ГП	Положение максимума флуоресценции $\lambda_{\text{max}}$ , нм			Квантовый выход Флуоресценции, %		
		$\lambda_{\text{ex}}=270$ нм	$\lambda_{\text{ex}}=310$ нм	$\lambda_{\text{ex}}=355$ нм	$\lambda_{\text{ex}}=270$ нм	$\lambda_{\text{ex}}=310$ нм	$\lambda_{\text{ex}}=355$ нм
Sa-Plod	сапропель	440	428	448	1,1	1,3	1,1
Pe-IXP	торф	452	431	452	2,0	2,1	2,4
Pe-Eda	торф	476	437	455	0,6	0,6	0,6
BC-Hum	бурый уголь	479	430	472	1,1	0,8	0,6
Li-Ion	лигнит	481	483	473	2,4	1,8	1,5
Li-BGHa	лигнит	489	487	478	1,9	1,5	1,4
Li-Sol80	лигнит	474	486	485	0,7	0,5	0,5
Le-Sah	леонардит	509	512	507	2,3	2,0	1,7
Le-HPA	леонардит	464	430	452	2,4	1,7	1,6
Le-Sp100	леонардит	492	499	478	1,4	1,4	1,4
Hu-Usa	гумалит	431	433	н/о *	3,2	2,6	2,0
Hu-Dsol	гумалит	493	499	485	1,2	1,0	1,0
Hu-Bsol	гумалит	411	416	н/о	3,3	2,5	2,6
OW-LhNa	лигносульфонат	361	371	н/о	1,5	1,4	0,7

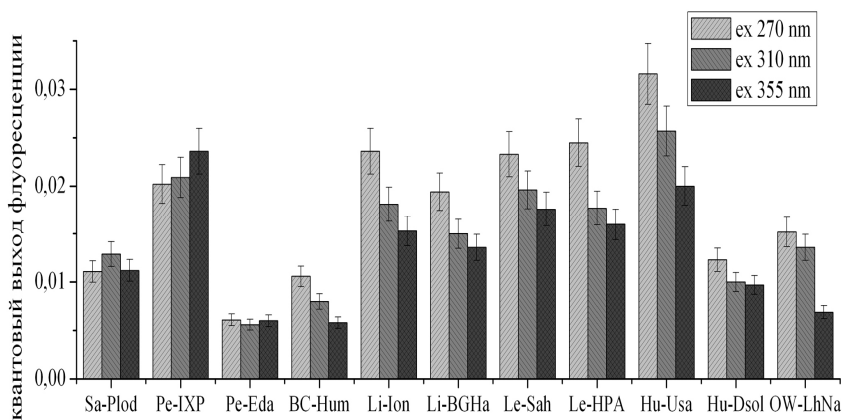
\*- положение максимума полосы трудно определить.

#### Квантовый выход флуоресценции

Одной из основных оптических характеристик вещества является квантовый выход флуоресценции, который определяется как отношение числа испущенных фотонов флуоресценции к числу поглощенных фотонов возбуждающего излучения. При отсутствии взаимодействия флуорофоров квантовый выход флуоресценции не зависит от концентрации вещества, поэтому, в отличие от интенсивности флуоресценции или оптической плотности, является индивидуальной характеристикой молекул, а не их концентрации. Для раствора невзаимодействующих одинаковых молекул с одним типом центра свечения квантовый выход флуоресценции не зависит от длины волны возбуждения, поэтому обнаружение в эксперименте нарушения этого правила говорит о гетерогенности состава флуоресцирующих центров.

Квантовый выход флуоресценции промышленных ГП не превышает нескольких процентов и составляет  $0,5 \div 3,2\%$  для возбуждения на длинах волн  $\lambda_{ex} = 270, 310$  или  $355$  нм (см. табл.2 и рис.5). Для сравнения: квантовый выход флуоресценции ГВ морской и речной природной воды составляет от 2 до 5%, ГВ почвенного происхождения - от 0,1 до 0,3% [13, 14] при возбуждении на тех же длинах волн УФ диапазона.

На рис.5 представлены величины квантового выхода флуоресценции для различных образцов гуминовых препаратов для трех разных длин волн возбуждения. Для большинства ГП квантовый выход флуоресценции убывает при возрастании  $\lambda_{ex}$  в УФ диапазоне. Исключение составляют ГП, источником которых являлись торф и сапрпель: квантовый выход для этих ГП практически не изменяется (препарат из сапрпеля Sa-Plod и из торфа Pe-Eda) или монотонно увеличивается с ростом  $\lambda_{ex}$  от 270 до 355 нм (препарат из торфа Pe-IXP).



**Рис.5. Квантовый выход флуоресценции гуминовых препаратов, измененный для длин волн возбуждения 270, 310 и 355 нм.**

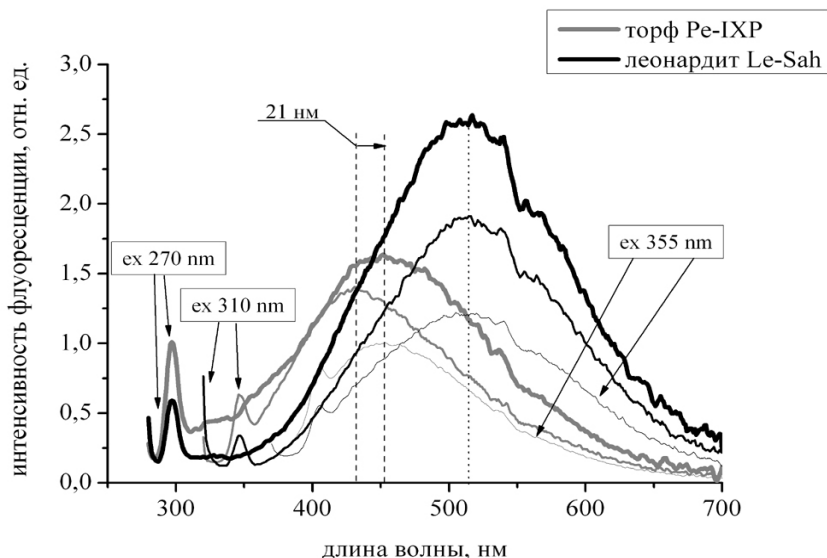
Для гуминовых веществ природных вод или почв наблюдается зависимость квантового выхода от длины волны возбуждения, противоположная той, что обнаружена для большинства промышленных ГП, а именно: квантовый выход флуоресценции с ростом  $\lambda_{ex}$  увеличивается, причем иногда весьма значительно [16]. Например, для ГВ природной воды из озера Беломорского региона квантовый выход увеличивается в 2 раза при изменении  $\lambda_{ex}$  от 270 до 355 нм. ГП из сырья растительного происхождения демонстрируют флуоресцентные свойства, близкие к свойствам природных гуминовых веществ: положение максимума испускания и зависимость квантового выхода флуоресценции от длины волны возбуждения.

#### «Синий сдвиг» спектров испускания при увеличении длины волны возбуждения

Для природных гуминовых веществ наблюдается так называемый «синий сдвиг» в спектрах флуоресценции [13-16]. Это означает, что максимум флуоресценции сдвигается в более коротковолновую область спектра при увеличении дли-



ны волны возбуждения в определенном интервале. Величина «синего сдвига» для природных гуминовых веществ может составлять до 40 нм при изменении  $\lambda_{\text{ex}}$  от 270 до 310 нм. При дальнейшем увеличении  $\lambda_{\text{ex}}$  до 355 нм длина волны максимума спектра испускания увеличивается, и ее значение может превысить длину волны максимума спектра флуоресценции при возбуждении длиной волны 270 нм. Явление «синего сдвига» спектров испускания было отмечено для проб природных гуминовых веществ морского, речного и почвенного происхождения [13,16], но не наблюдалось для большинства промышленных ГП. Иллюстрация этого явления дана на рис.6.



**Рис. 6.** Иллюстрация явления «синего сдвига» - сопоставление спектров флуоресценции гуминовых препаратов при возбуждении на длинах волн 270, 310 и 355 нм.

Из табл. 2 видно, что для большинства препаратов из углефицированных материалов (уголь, лигнит, леонардит) сдвиг максимума испускания в коротковолновую область не наблюдается, в то время как для препаратов из торфа и сапропеля этот эффект присутствует. Так, величина «синего сдвига» спектров испускания составляет  $21 \div 39$  нм для препаратов из торфа и  $12 \div 20$  нм – для препаратов из сапропеля при типичном значении величины «синего сдвига»  $20 \div 40$  нм для гуминового вещества природной воды.

Отметим, что сдвиг максимума флуоресценции в коротковолновую область при увеличении длины волны возбуждения от 270 до 310 нм наблюдается для тех же самых препаратов (ГП из торфа и сапропеля), для которых  $\lambda_{\text{max}}$  расположен в спектральном диапазоне 430–450 нм, характерном для максимума свечения при-

родных гуминовых веществ. В противоположность образцам из растительного сырья (торфа и сапропеля) у ГП из углей максимум флуоресценции находится в более длинноволновой области 480÷515 нм и не смещается при изменении длины волны возбуждения. Это экспериментальное наблюдение еще раз демонстрирует схожесть гуминовых препаратов из растительного сырья и природных гуминовых веществ. Оно может свидетельствовать о большей гетерогенности состава природного гуминового вещества и гуматов из растительного сырья (торфа и сапропеля) по сравнению с препаратами из угля.

### ВЫВОДЫ

Водные растворы ГП обладают сходным с природными гуминовыми веществами характером спектров поглощения в УФ и видимой области: монотонным уменьшением оптической плотности в диапазоне 270÷700 нм. Для некоторых препаратов из растительного сырья, сохранившего фрагменты лигниновой структуры, наблюдаются особенности, заключающиеся в появлении слабых максимумов в диапазоне 225÷270 нм. Спектры поглощения водных растворов ГП в УФ области могут быть характеристическим показателем для идентификации сырьевого источника ГП. А поскольку многие фенолкарбоновые кислоты обладают высокой физиологической активностью, то наличие особенностей поглощения в УФ области также может косвенно характеризовать потенциальную эффективность ГП в качестве стимулятора роста растений.

ГП из торфа и сапропеля обладают сходным видом спектров испускания флуоресценции с природными гуминовыми веществами (максимум флуоресценции 430 ÷ 440 нм при возбуждении на 310 нм), а максимум ГП из углефицированных материалов сдвинут относительно максимума природных гуминовых веществ в более длинноволновую область на 40÷50 нм. Синтезированный из органического отхода в процессе «искусственной гумификации» гуминовый препарат характеризуется отличным от других видом спектра с максимумом при 370 нм.

Значения квантового выхода флуоресценции для ГП и природных гуминовых веществ близки между собой и составляют несколько процентов. Однако поведение этой величины с изменением длины волны возбуждения в УФ диапазоне отличается для природных и коммерческих гуминовых веществ. Для препаратов из торфа или сапропеля квантовый выход флуоресценции увеличивается с ростом длины волны возбуждения, что наблюдается также и для природных гуминовых веществ, или остается постоянным. Для всех остальных промышленных ГП квантовый выход флуоресценции уменьшается при увеличении длины волны возбуждения.

Для промышленных ГП из торфа и сапропеля наблюдается явление «синего сдвига» спектров испускания при увеличении длины волны возбуждения от 270 до 310 нм, которое также наблюдается для гуминовых веществ природного происхождения. Для всех ГП из углефицированных материалов, кроме одного препарата из леонардита, положение максимума в спектре или не изменяется, или увеличивается при изменении длины волны возбуждения в указанном диапазоне.

Таким образом, промышленные гуминовые препараты из торфов и сапропеля близки по спектральным свойствам (положение максимума испускания, квантовый выход флуоресценции и их зависимость от длины волны возбуждения) к гуминовым веществам природной воды или почвы. Напротив, промышленные ГП из уг-

лефицированных материалов, а также органического отхода имеют спектральные характеристики, отличающие их от ГП из торфов, сапропелей и от природных гуминовых веществ. Следовательно, спектральные методы можно применять для классификации гуминовых препаратов.

### Литература

1. Орлов Д.С. Гумусовые кислоты почв и общая теория гумификации. М. Изд-во МГУ. 1990. 325 С.
2. Stevenson F.J. Humus chemistry: genesis, composition, reactions (2nd edition). NY: John Wiley&Sons. 1994. P. 496.
3. Горовая А.И., Орлов Д.С., Шербенко О.В. Гуминовые вещества. Строение, функции, механизм действия, протекторные свойства, экологическая роль. Киев: Наукова Думка. 1995.
4. Тан К.Н. Humic matter in soil and the environment: principles and controversies // CRC Press. 2003. P. 386.
5. Сайт Международного Гуминового Общества
6. <http://ihss.gatech.edu/ihss2/spectra.html>
7. Орлов Д.С. Химия и охрана почв. Соросовский образовательный журнал. 1996. №3. С. 65-74.
8. Перминова И.В. Гуминовые вещества — вызов химикам XXI века // Химия и жизнь. 2008. № 1. С. 50-55.
9. Куликова Н.А. Защитное действие гуминовых веществ по отношению к растениям в водной и почвенной средах в условиях абиотических стрессов // Дисс. доктора биологических наук. М. МГУ. 2008.
10. Якименко О.С. Промышленные гуминовые препараты: перспективы и ограничения использования. Материалы 2-й Международной научно-практической конференции «Дождевые черви и плодородие почв». 17-20 марта 2004. Владимир. Россия. С. 249-252.
11. Lobartini J.C., Tan K.H., Rema J.A., Gingle A.R., Pape C, Himmelsbach D.S.. The geochemical nature and agricultural importance of commercial humic matter. The Science of the Total Environment. 1992. V. 113. 1/3. P. 1-15.
12. Пацаева С.В., Фадеев В.В., Филиппова Е.М., Чубаров В.В., Южаков В.И. Влияние температуры и УФ излучения на спектрально-люминесцентные характеристики растворенного органического вещества. Вестник Московского университета. Сер. 3. Физика. Астрономия. 1991. Т.32. № 6. С.71-75.
13. Zsolnay Z A., Baigar E., Jimenez M., Steinweg B., Saccomandi F. Differentiating with fluorescence spectroscopy the sources of dissolved organic matter in soils subjected to drying. Chemosphere. 1999. Vol. 38. No 1. P.45-50
14. Горшкова О.М., Пацаева С.В., Федосеева Е.В., Шубина Д.М., Южаков В.И. Флуоресценция растворенного органического вещества природной воды. Вода: Химия и экология. 2009. №11. С.31-39.
15. Милоков А.С., Пацаева С.В., Южаков В.И., Горшкова О.М., Пращикина Е.М. Флуоресценция наночастиц растворенного органического вещества в природной воде. Вестник Московского университета. Сер. 3. Физика. Астрономия. 2007. № 6. С.34-38.

16. Donard O.F.X., Lamotte M., Belin C., Ewald M. High-sensitivity fluorescence spectroscopy of mediterranean waters using a conventional or a pulsed laser excitation source. *Marine Chemistry*. 1989. Vol. 27. No 1-2. P. 117-136.
17. Shubina D., Fedoseeva E., Gorshkova O., Patsaeva S., Terekhova V., Timofeev M., Yuzhakov V. The “blue shift” of emission maximum and the fluorescence quantum yield as quantitative spectral characteristics of dissolved humic substances. *EARSeL eProceedings*. V.9. N 1. P.13-21 (2010).
18. [http://www.eproceedings.org/static/vol09\\_1/09\\_1\\_shubina1.html](http://www.eproceedings.org/static/vol09_1/09_1_shubina1.html)
19. Якименко О.С., Волков П.А. Флуоресцентные свойства промышленных гуминовых препаратов. Труды IV Международной конференции “Гуминовые Вещества в Биосфере”. Изд. СПбГУ. 2007. С. 548-552.
20. Senesi N., Miano T.M., Provenzano M.R., Brunetti G. Characterization, differentiation, and classification of humic substances by fluorescence spectroscopy. *Soil Science*. 1991. Vol. 152. No 4. P. 259-271.
21. Mobed J.J., Hemmingsen S.L., Autry J.L., McGown L.B. Fluorescence characterization of IHSS humic substances: total luminescence spectra with absorbance correction. *Env. Sci.& Technol.* 1996. Vol. 30. No 10. P. 3061-3065.
22. Alberts J.J., Takács M.. Total luminescence spectra of IHSS standard and reference fulvic acids, humic acids and natural organic matter: comparison of aquatic and terrestrial source terms. *Organic Geochemistry*. 2004. Vol. 35. No 3. P.243-356.
23. Fu P., Wu F., Liu C.. Fluorescence excitation-emission matrix characterization of a commercial humic acid. *Chinese J. of Geochemistry*. 2004. Vol. 23. No. 4. P.309-318.
24. Hemmingsen S.L., McGown LB. Phase-Resolved Fluorescence Spectral and Lifetime Characterization of Commercial Humic Substances. *Applied Spectroscopy*. 1997. Vol. 51. No 7. P. 921-929.
25. Malcolm R.L., MacCarthy P. Limitations in the use of commercial HA in water and soil research. *Env. Sci.& Technol.* 1986. Vol. 20. P. 904-911.
26. Орлов Д.С., Гришина Л.А. Практикум по химии гумуса. М.:Изд-во МГУ. 1981. 271 С.