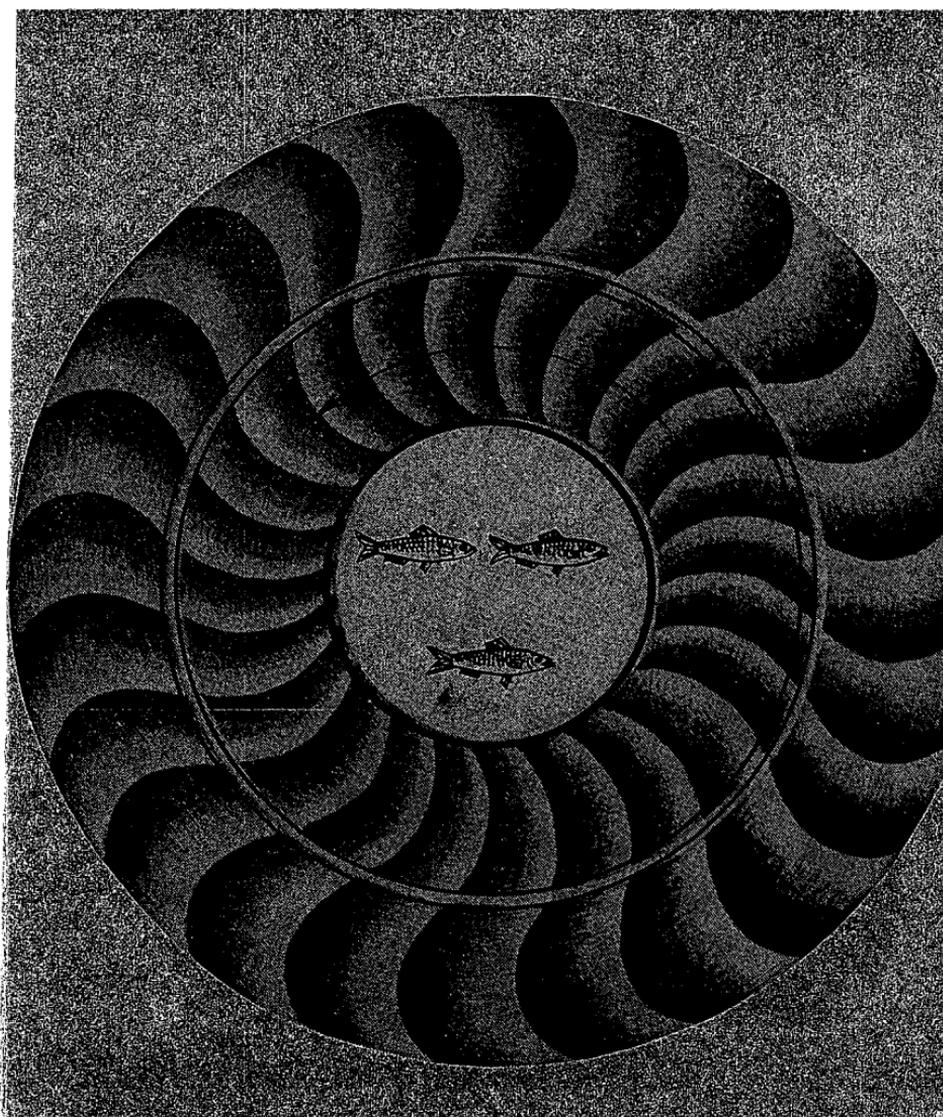


В.Л.Лебедев  
Т.А.Айзатуллин  
К.М.Хайлов

# ОКЕАН

как  
динамическая  
система



Тип. им. ...  
Цена 0 р. 56 в.

... 11-73 г. Арт. ЛГ-087

# КЕАН

как  
динамическая  
система

55446  
Л33

Ленинградский  
Гидрометеорологический ин-т  
**БИБЛИОТЕКА**  
Л-д 195196 Малоохтинский пр., 98

ГИДРОМЕТЕОИЗДАТ • ЛЕНИНГРАД, 1974

Ответственный редактор д-р геогр. наук А. Д. ДОБРОВОЛЬСКИЙ

Лебедев В. Л., Айзатуллин Т. А., Хайлов К. М.

Л33 Океан как динамическая система. Л., Гидрометеониздат, 1974. 208 с. с илл.

Предлагаемая читателю книга — одна из попыток сравнительно нового подхода к описанию океана. Главная мысль заключается в том, что Мировой океан представляет собой подобно живой клетке целостную динамическую систему с физическими, химическими и биологическими звеньями. Поэтому он требует и обращения к себе, как к единой живой системе, — при его изучении и при использовании.

Авторы говорят о работе этой сложной системы и о механизмах саморегулирования, поддерживающих ее равновесие и устойчивость к внешним воздействиям. Как оно нарушалось в прошлом и может ли нарушиться в наше время? Этим вопросам тоже уделено внимание на страницах книги.

Книга адресована тем, кто интересуется океаном и биосферой и связан с их изучением и эксплуатацией.

Л 20806-243 94-74  
069(02)-74

## ПРЕДИСЛОВИЕ

При первом знакомстве Океан производит впечатление огромной голубой массы инертной материи, приводимой в движение внешними силами и содержащей вкрапления живых организмов. Это правильно, но это — лишь одна сторона предмета. Открываемая Вами книга предлагает посмотреть на океан под другим углом зрения, как бы глазами конструктора — на объект, совершающий работу и в этом отношении напоминающий или машину с тепловыми, механическими, химическими и биохимическими блоками, или гигантскую живую клетку. Увидеть любой предмет под непривычным углом зрения трудно не только читателю, но и авторам, и поэтому мы надеемся, что нам простят многие возможные в таком деле неудачи.

Книга написана и для тех, кто впервые знакомится с океаном, и для тех, кто многое о нем знает. Обсуждение каждой темы, оставаясь в границах популярного изложения, проходит на нескольких уровнях сложности: от общих и самых простых положений к усложненным деталям и снова к простым заключениям. В самой доступной форме рассказывается о моделировании экологических систем.

Введение и глава I написаны кандидатом географических наук В. Л. Лебедевым; глава II — химиком Т. А. Айзатуллиным; разделы «Элементарный язык», «Легкая жизнь на границе фаз» главы III — совместно Т. А. Айзатуллиным и доктором биологических наук К. М. Хайловым, остальная часть главы III — К. М. Хайловым; глава IV — В. Л. Лебедевым и Т. А. Айзатуллиным; заключение — тремя авторами.

Авторы благодарят тех, кто стимулировал замысел работы или оказал ей благожелательное внимание на разных стадиях ее подготовки, — академика К. К. Маркова, академика Б. В. Гнеденко, кандидатов географических наук В. И. Бардина и А. В. Шумилова и заведующего кафедрой океанологии МГУ профессора А. Д. Добровольского.

## МОЖНО ЛИ РАССМАТРИВАТЬ ОКЕАН КАК СИСТЕМУ!

Часть Вселенной, которую мы выделяем для исследования, называется *системой*, а все остальное — *средой*<sup>1</sup>.

К. Залевски

Мы сооружаем кибернетические машины, однако природа в этом отношении давно превзошла нас.<sup>2</sup>

А. Дюкрок

Научные описания океана — не самое интересное чтение на свете. Да, в таком-то месте океан такой, а дальше немного иной. Перечислять эти различия можно с разной подробностью, как можно перечислять кварталы, или улицы, или дома города с севера к югу. При этом мы можем найти определенную закономерность и симметрию и заполнить описанием сотни страниц.

Но нельзя ли выразить всю эту систему фактов одной идеей, одним сравнением, которое много бы сказало уму и чувствам? Рискнем это сделать. Если мы отвлечемся от бесконечных просторов океана и всех частных многообразий его поверхности и берегов, если мы мысленно стянем океан до малых размеров, то сможем сказать, что океан имеет сходство с единой живой клеткой.

Это сравнение не такое уж странное, если учесть, что и клетка, и океан состоят прежде всего из воды, подчиняющейся одним и тем же законам физики и химии. Далеко не все стороны высказанной аналогии будут для нас интересны. Так, пока мы оставим без внимания то, что химический состав океанской воды близок к составу крови человека (все живое вышло из

---

<sup>1</sup> Залевски К. Феноменологическая и статистическая термодинамика. М., «Мир», 1973, с. 9.

<sup>2</sup> Дюкрок А. Физика кибернетики. — В сб.: Кибернетика ожидаемая и кибернетика неожиданная. М., «Наука», 1968, с. 109.

моря) и что поэтому отложения солей на дне океана и стенках кровеносных сосудов имеют общие черты — это мало растворимые в данной химической среде, но избыточные в речной воде карбонаты; нас не удивит и то, что под одной обложкой сборников «Гидромеханика» можно встретить такие работы, как «Гидродинамика крови» и «Динамика морских течений», а в этих работах найти общие формулы и ссылки на одни и те же имена. Все это, хотя и любопытно само по себе, вытекает из общности законов физики и химии для разных объектов природы.

Мы решились сравнить океан с клеткой по той причине, что, поглощая внешнюю энергию, океан непрерывно совершает некоторую закономерную работу, некоторые ритмичные циклы деятельности — механической, термодинамической, химической и биологической, что, находясь на разных широтах в условиях очень различных, он не теряет своего единства и имеет способы сохранять и поддерживать свои отличия от внешней среды.

Реакция океана на внешние воздействия, т. е. его «поведение», так же как и «поведение» клетки, может изучаться на электронных аналоговых моделях. И тот, и другой объект можно сравнить с машиной, но машиной, во-первых, очень сложной, а во-вторых, лишенной колес, приводов, электрических цепей и тому подобного. Иными словами, мы можем говорить об абстрактной кибернетической машине в том смысле, в каком ее рассматривал Эшби<sup>1</sup>. Мы можем говорить об океане как о единой системе, имея в виду, что многообразные проявления ее работы и многочисленные параметры, которые могут считаться «выходами» системы (например, скорость течения, температура воды, соленость, биомасса планктона), связаны друг с другом. Название «динамическая система» первоначально пришло из области механики, но в настоящее время означает любую материальную систему, которая при изменении внешних условий приходит в равновесие с ними не мгновенно, а путем протяженного во времени «переходного процесса».

---

<sup>1</sup> Эшби У. Р. Введение в кибернетику. М., Изд. иностр. лит-ры, 1959. 432 с.

Единая океаническая система должна обладать очень сложной структурой, включать крупные групповые блоки, средние и элементарные звенья. Начинать конструировать эту систему можно, вероятно, только по отдельным блокам и звеньям, в которых в свою очередь следует видеть частные динамические системы, или подсистемы. Мы будем рассматривать физические, химические и биологические системы океана сперва по отдельности, а затем как взаимодействующие звенья.

Первое знакомство с природой океана как будто создает впечатление о ее безграничном разнообразии, за которым трудно увидеть упорядоченность, черты единства, систему. Но разнообразие океана проявляется прежде всего у его поверхности, изменчивой не только в пространстве, но и в быстротечном времени, изменчивой прежде всего внешне. Океан не имеет постоянного цвета, «его цвет» — это смесь отраженного цвета неба и избирательным образом рассеянных в воде лучей солнца. Пропорции смеси непрерывно меняются с изменением крутизны волн. Также изменчива и форма поверхности — поддаваясь напору ветра, она может образовывать волны, достигающие высоты 30 м.

Отсюда создается впечатление, что океан ничем не защищен от внешних воздействий, что внешние обстоятельства могут как угодно изменять его свойства — течения, температуру, соленость, что если разные части океана и бывают похожи, то это результат похожих внешних условий. Но оказывается, что это не так. Податливость океана обманлива. Он обладает механизмами защиты своей температуры, химического состава и живых сообществ, его система циркуляции упорядочена.

Океан един по своему солевому составу. Среди его солей больше всего хлоридов (88,64%), затем сульфатов (10,80%) и потом карбонатов (0,34%). Те же соли входят в обратной пропорции в средний состав речных вод, стекающих в океан: хлориды — 5,2%, сульфаты — 9,9%, карбонаты — 60,1%. Соли находятся в воде океана в виде отдельных ионов. Пропорции между содержанием этих ионов настолько постоянны, что от Арктики до Антарктики общую массу солей в пробе морской воды, взятой с любой глубины океана, рассчитывают по содержанию одного иона — хлора. Возникающая при этом

ошибка лежит в пределах 0,02 г на 1 кг морской воды. Связь определяется формулой

$$S = 0,03 + 1,805 Cl, \quad (1)$$

где  $S$  — общее содержание солей в г на 1 кг раствора;  $Cl$  — содержание ионов хлора также в г на 1 кг воды.

При большом разнообразии животного и растительного мира, населяющего океан, его обитатели группируются в сообщества, связанные весьма строгими и устойчивыми соотношениями. Одной из «константных», по выражению Л. А. Зенкевича, характеристик океана оказывается концентрация растворенного органического вещества (РОВ), значение которой в глубинах океана постоянно, хотя поставщиком РОВ служит планктон, населяющий верхние горизонты.

Средняя температура всего океана от экватора до полюса и от поверхности до дна  $3,5^{\circ}\text{C}$ , а средняя температура воды на экваторе (также от поверхности до дна) равна  $4,9^{\circ}\text{C}$ . В полярных районах мощный слой глубинных вод с положительной температурой доходит на юге планеты до материкового склона Антарктиды, а на севере рассекает толщу холодных вод Северного Ледовитого океана. Таким образом, система течений перераспределяет тепло, которое образуется у поверхности океана из лучистой энергии Солнца. Приток солнечной энергии значительно уменьшается от экватора к полюсам, и длительное действие неравномерной подачи энергии могло бы привести к увеличению со временем разности температур поверхности океана на экваторе и полюсах. Однако эта разность стабильна.

Процессы, изменяющие уровень океана, также значительно различаются в пространстве. Разность испарения и осадков приводит к тому, что в 20-х широтах с поверхности океана ежегодно снимается 0,5—1,5 м воды, а в 50-х широтах и зоне экватора эта влага возвращается океану. Вместе с тем, исключая единовременные возмущения, а также сезонный и суточный ход, уровень океана стабилен во времени и имеет малые пространственные градиенты.

Противоречия между фактическим единством океана и теми различиями, которые стремятся создать в нем внешние воздействия, объясняются тем, что ответные

реакции океана целенаправленны и пропорциональны величине воздействий.

Среди механизмов защиты, или стабилизации, океанической среды можно выделить две группы: местные стабилизирующие процессы, или реакции системы, и процессы, протекающие за счет обмена вещества и энергии между различными районами океана.

Начнем с местных процессов и обратимся к поверхности океана. Поверхность океана, граничащая с воздухом, имеет свойства защитной пленки, препятствующей рассеиванию и переходу воды в атмосферу подобно развеванию песка. Мы подразумеваем поверхностное натяжение. Образующая им пленка не состоит из особых, или хотя бы постоянных, частиц воды, но имеет характер силового поля, в котором силы молекулярного притяжения оказываются неуравновешенными. Поверхностное натяжение выполняет роль барьера, преодолеть который в направлении вода — воздух могут лишь молекулы с большой кинетической энергией движения, т. е. молекулы, потеря которых будет понижать температуру воды. Сила поверхностного натяжения воды очень велика, для чистой воды при 0°C она равна 75,5 дин/см, а теплота испарения 596 кал/г — выше, чем у какого-либо другого вещества на Земле. Эти величины уменьшаются при повышении температуры. Теплая вода испаряется легче по трем причинам: во-первых, ее молекулы движутся в среднем быстрее и большее их число способно преодолеть поверхностное натяжение; во-вторых, величина поверхностного натяжения у теплой воды понижена; в-третьих, и это главное, с повышением температуры растет способность воздуха к поглощению водяного пара, а температура воздуха связана с температурой воды.

Испаряющиеся молекулы воды непосредственно не нагревают воздух, так как в процессе испарения они теряют свою скорость, двигаясь против силы молекулярного притяжения на поверхности воды. Их полет из воды в воздух можно в известной мере сравнить с полетом жюльверновского пушечного снаряда, который, покидая Землю, испытывает действие силы тяжести и теряет свою начальную скорость. Те же силы молекулярного притяжения, которые отнимают скорость и кинетическую энергию молекулы при испарении воды, возвращают их при конденсации водяного пара, разгоняя молекулу при

ее падении на поверхность водяных капель, пленок или поверхность моря. Таким образом, водяной пар содержит опромную потенциальную энергию, и его называют основным топливом атмосферы<sup>1</sup>.

В тепловом балансе океана испарение играет перво-степенную роль температурного стабилизатора и может быть уподоблено защитной реакции от нагревания. Предполагается, что в среднем потери тепла на испарение составляют 88% полного бюджета лучистой энергии на поверхности океана, иначе, от радиационного баланса этой поверхности. Однако расчеты величин испаряющейся воды очень неточны. Ошибочно думать, что вся испаряющаяся вода вызывает охлаждение поверхности. Если с гребня волны ветром сорваны капли воды, испарившиеся затем в воздухе, то температура поверхности океана не понизится, потому что это испарение не было процессом, избирательным к скорости движения молекул.

Испарение уменьшает нагревание океанических вод, а образование льда уменьшает скорость их охлаждения. Передача тепла в воде осуществляется турбулентным перемешиванием, а передача тепла через ледяной покров — только путем молекулярной теплопроводности. Последняя в несколько десятков тысяч раз меньше, чем турбулентная теплопроводность. Таким образом, ледяной покров образуется в ответ на охлаждение воды и, выполняя роль теплоизоляционного слоя, защищает ее толщу от дальнейшего выхолаживания.

Процесс перехода воды в лед имеет нечто общее с процессом конденсации. При образовании льда молекулы воды соединяются в определенные агрегаты молекул. Это связано с выделением тепла, которое должно непрерывно отводиться от замерзающей воды. Лед, образовавшийся из соленой воды, включает ячейки с рассолом, объем которых при всяком понижении температуры уменьшается за счет нарастания на стенках ячеек льда, а при повышении температуры увеличивается за счет его таяния. Если соленость льдины будет 15 г солей на 1 кг льда, а температура равна  $-1^{\circ}\text{C}$ , то при образовании

---

<sup>1</sup> Образные выражения «горючее» атмосферы, «сгорание» водяного пара введены Джоан С. Малкус — см., например, сборник «Море» (Л., Гидрометеиздат, 1965).

льда отнято 17 кал от 1 г воды. При понижении температуры того же льда до  $-2^{\circ}\text{C}$  общее количество отнятого тепла достигнет уже 48 кал. Те же величины для пресного льда будут 80 и 81 кал. Только достигая температуры  $-15^{\circ}\text{C}$ , соленый лед теряет 85 кал тепла на 1 г, т. е. количество, уже близкое к пресному льду. Легко видеть, что благодаря такому растянутому во времени процессу замерзания морской лед подвергается меньшим температурным колебаниям, чем помещенный в те же условия лед пресный.

Образование волн, в котором мы сперва увидели лишь признак податливости морской поверхности внешним воздействиям, имеет регулирующее значение для сохранения циркуляции океана на некотором устойчивом уровне. Волны принимают на себя основную энергию ветра, и скорость ветровых течений на поверхности моря на один-два порядка меньше скорости ветра. Надо иметь в виду, что быстрое движение формы волны, исчисляемое, как и скорость ветра, метрами в секунду, выражает возмущение поверхности, а не перенос воды. Таким образом, в образовании волны мы можем видеть защиту от механического воздействия атмосферы. Казалось бы, взволнованная поверхность воды должна значительно увеличивать трение на границе океан — атмосфера. Но наблюдения показывают, что при небольшом ветре трение уменьшается в присутствии волн и делается меньшим, чем трение ветра о гладкое стекло. Это объясняется тем, что волны изменяют структуру воздушного потока. Как известно, дельфины умеют уменьшать трение своего тела о воду, образуя на коже движущиеся волны.

Сложные химические и биологические процессы поддерживают постоянство солевого состава воды, ее газовое равновесие и устойчивость концентрации растворенного органического вещества. 60% солей, поступающих в океан из рек, относятся к карбонатам — в основном это карбонат кальция. Однако это вещество плохо растворимо в морской воде. Почти во всех районах в верхних слоях океана оно находится в перенасыщенном состоянии. Вблизи экватора перенасыщение достигает 300%. Среди процессов удаления карбонатов в осадок важное место занимают биологические процессы — поглощение солей при создании неорганических карбонатных скеле-

тов и фотосинтез органического вещества, уменьшающий содержание в воде растворенного углекислого газа, без которого соли угольной кислоты не могут находиться в растворе. Кстати, за время своего существования океан выделил в осадки в несколько раз больше различных солей, чем то количество, которое растворено в нем.

Как известно, углекислый газ в атмосфере вызывает парниковый эффект, задерживая часть длинноволнового излучения Земли. Считается, что промышленная деятельность человека уже привела к выделению в атмосферу такого количества углекислоты, которое могло бы удвоить ее содержание. Это вызвало бы повышение средней температуры Земли на несколько градусов, если бы содержание атмосферной углекислоты не регулировалось океаном. Регуляция эта связана с тем, что океан при равновесии газообмена с атмосферой способен поглотить приблизительно в 100 раз больше углекислого газа (который переходит в воде преимущественно в связанные соединения), чем его может удержать атмосфера. Таким образом, допускается, что из каждых 100 объемов углекислого газа, выброшенных в атмосферу, в ней остается около одного объема, а остальное попадает в океан. Потребление углекислого газа в океане связано в конечном счете с двумя процессами — фотосинтезом и растворением карбонатных пород. Количество углекислого газа, поступившего в атмосферу в результате промышленной деятельности и, как предполагается, преимущественно затраченное в океане, превышает  $23 \cdot 10^{11}$  т.

Чем больше оказывается углекислого газа в океане, тем быстрее он поглощается планктонными организмами. В процессе жизнедеятельности и в результате отмирания планктона в морскую воду попадает растворенное органическое вещество. Его концентрация на разных глубинах океана, определявшаяся по содержанию углерода, оказалась равной 2—6 мг/л.

Органическое вещество потребляется на биохимические процессы в море пропорционально своему количеству. Это способствует стабильности его содержания: если по какой-либо причине его концентрация стала выше обычной, то она и расходуется со скоростью, во столько же раз большей. И наоборот, если концентрация упала во сколько-то раз, во столько же замедлится

и потребление. В первом приближении принято считать, что реакция потребления передается уравнением

$$\frac{dC}{dt} = -kC, \quad (2)$$

что можно выразить словами так: «скорость потребления органического вещества ( $dC/dt$ ) пропорциональна его концентрации  $-kC$ , где  $k$  — коэффициент пропорциональности».

Решением этого уравнения будет

$$C(t) = C(0)e^{-kt}, \quad (3)$$

где  $C(t)$  — количество органического вещества в момент времени  $t$ ;  $C(0)$  — начальное количество органического вещества. Если в множителе  $e^{-kt}$  придавать времени  $t$  целые значения  $(0, 1, 2, \dots)$ , уравнение (3) выразит геометрическую прогрессию со знаменателем, равным  $e^{-k}$ , т. е. последовательность чисел, из которых каждое последующее число получается из предыдущего умножением на  $e^{-k}$  ( $e^{-1} \cong 0,37$ ). Таким образом, путем соответствующего подбора значения  $k$  с помощью экспоненты можно выразить любую геометрическую прогрессию.

Очень многие явления, происходящие в океане, изменяются во времени или пространстве по закону геометрической прогрессии и их математические описания содержат знак экспоненты ( $e$  или  $e^{\text{хр}}$ ). В системах управления эти процессы соответствуют апериодическим звеньям первого порядка.

При всем разнообразии процессов, вызванных в системе внешним воздействием, теория управления выделяет в них один существенный момент — воздействие процесса на самого себя, называемое **обратным воздействием**. Обратное воздействие может протекать в двух направлениях: положительном и отрицательном. Положительное обратное воздействие служит источником **развития** системы, а отрицательное — источником **стабилизации**. Особенно хорошо это различие видно в замкнутой системе. Примеры процессов с отрицательным обратным воздействием мы рассмотрели выше. Классический пример противоположного направления обратного воздействия — горение пороха. При этом горении выделяется кислород и повышается температура, таким

путем процесс сам себя ускоряет. Он проходит по схеме взрыва и описывается законом экспоненциального роста, когда экспонента имеет положительную степень.

Аналогом взрывного процесса в океане может служить развитие тропического урагана, или тайфуна. События при этом развиваются по следующей схеме. Над участком океана, где возникло повышенное испарение (например, благодаря ветру), в атмосферу поступает повышенное количество водяного пара. Влажный воздух легче сухого и потому образует восходящий поток. При подъеме воздух в связи с уменьшением давления охлаждается. Это вызывает конденсацию пара. При конденсации выделяется теплота, равная теплоте, ушедшей на испарение. Происходит местное нагревание атмосферы, расширение воздуха и повышение высоты воздушного столба, создающего то же самое давление. Начинается отток воздуха на больших высотах. Масса воздушного столба над районом испарения уменьшается и приземное давление падает. Вблизи морской поверхности воздушные потоки устремляются к центру низкого давления. Ветер и перемешивание воздуха усиливаются — испарение увеличивается и весь процесс развивается с нарастающей скоростью, принимая катастрофический характер. Он исчерпывается лишь с изменением окружающей обстановки, обычно связанной с движением урагана, например, выходом его на материк.

В рассмотренном примере участвуют два процесса, а не один. Обратное воздействие первого на самого себя осуществляется не непосредственно, а через второй процесс. Таким образом, мы встречаемся с **положительной обратной связью** двух процессов.

Если система не замкнута и в ней действуют силы, стремящиеся затормозить процесс, то положительная обратная связь может стать источником стабилизации. То же горение пороха может поддерживать постоянную скорость полета ракеты. Та же связь испарения и ветра может поддерживать существование умеренного циклона средних широт. Вторжение вод, родившихся в Гольфстриме, в Арктику связано с существованием исландского минимума атмосферного давления, а развитие этого минимума — с тем теплом, которое приносит Гольфстрим. Обратная положительная связь в этом примере поддерживает постоянные климатические условия.

Обратим внимание, однако, на то, что условия эти аномальны.

Положительное обратное воздействие имеет большое значение в развитии биологических систем океана, придавая их динамике особенную напряженность. Равновесие и само существование отдельных звеньев системы здесь иной раз зависят от воздействия нескольких процессов, развивающихся по схеме взрыва. Пример такого взаимодействия, притом пример, полный еще не до конца понятых и разъясненных загадок, нам может дать весеннее развитие жизни в каком-нибудь водоеме.

Развитие это начинается вспышкой фитопланктона. Известно, что одна диатомовая одноклеточная водоросль, размножаясь путем деления, может за четыре дня дать потомство численностью 140 миллиардов особей. Вспышка вызывает быстрое истощение питательных веществ в поверхностном слое вод. Планктон поглощает растворенные в воде биогенные элементы (минеральные соединения азота, фосфора, кремния, выполняющие роль морских удобрений), а отмирая и падая вниз, уносит их из поверхностного слоя моря. Воды природных водоемов часто сравнивают с почвой и относят вместе с ней к особой группе «биокосных тел» (В. В. Вернадский). Интересно не только сходство, но и различие двух сред. Оно, в частности, заключается в том, что с развитием планктона в воде происходит мощный процесс выноса питательных веществ. При математическом моделировании названных событий сразу же возникает вопрос: почему развивающийся взрывообразно планктон не уничтожит однажды запасы растворенных питательных веществ полностью и не погибнет немедленно за этим сам от недостатка пищи?

Одним из ответов будет тот, что океанская почва не только истощается, но и непрерывно, хотя бы в малой степени, сама обогащается за счет процессов перемешивания воды. Таким образом, условия для минимального поддержания жизни в ней всегда остаются. Второй ответ — в том, что бесконтрольное и неудержимое развитие фитопланктона вызывает следом за собой развитие зоопланктона, которое также происходит по закону экспоненциального роста, т. е. по схеме взрыва. Таким образом, вторая взрывная волна настигает и гасит первую. Перед нами встает новая загадка — почему зоопланктон

в своем бесконтрольном развитии не уничтожит полностью популяцию фитопланктона? Если его останавливает третья волна жизни — взрывное развитие хищного планктона, то загадка не исчезает, а только переносится дальше по каскаду питательной цепи.

Подобные проблемы регулируются на суше тем, что животные борются с конкурентами за определенную площадь, на которой они добывают пищу. Таким образом, регуляция здесь связана с наличием определенных сложных процессов нервной деятельности — инстинктов. Не обладая такими возможностями, как животные суши, простейшие водные организмы должны вырабатывать какие-то химические механизмы регуляции своей численности и состава.

Динамизм биологических систем океана и тесные связи между отдельными звеньями этих систем имеют важнейшие последствия для хозяйственной деятельности человека.

Большинство внешних природных воздействий на океан носит в той или иной мере периодический характер, связанный с суточным и годовым циклами поступления солнечной энергии. Ответные реакции океана также периодичны, но их периоды могут значительно отличаться от периода внешних воздействий. Примером может служить то же развитие фитопланктона. Фотосинтез нарастает с увеличением весенней освещенности верхних слоев воды. Ход освещенности имеет четко выраженный годовой цикл и может быть передан синусоидальной кривой с периодом, равным году. В то же время развитие фитопланктона во всех широтах океана (кроме самых высоких и самых низких широт) происходит в виде двух ярко выраженных волн — весенней и осенней (рис. 1).

Эта сложная, двойная реакция на единое воздействие — одна из черт биологического лица океана. Система, реакции которой имеют иной период, чем внешние воздействия, относится к нелинейным, и здесь мы имеем дело именно с таким случаем.

Приведенные выше примеры почти без исключения относятся к той группе реакций системы на внешнее воздействие, которую мы назвали местной. Посмотрим, наконец, и на реакции, выражающиеся в обмене вещества и энергии между различными районами океана.

Океан, как всякая механическая система, стремится к минимуму потенциальной энергии. Этот минимум будет достигнут в том случае, если океан приобретет максимальную однородность в горизонтальном направлении и максимально устойчивую стратификацию в вертикальном. Действительно, в однородном по горизонтали океане без участия ветра и приливов не возникнут никакие течения, а в устойчиво стратифицированной жидкости прекратятся вертикальные токи. Внешние воздействия на океан,

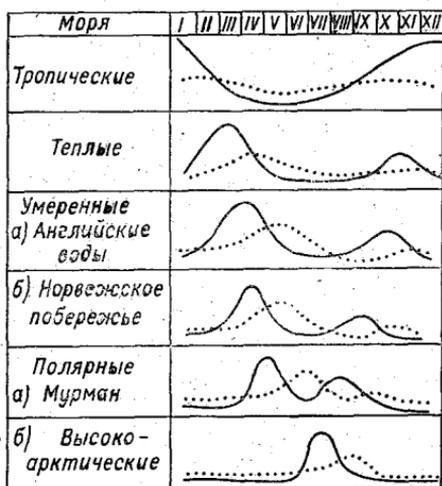


Рис. 1. Циклы развития океанического планктона на разных широтах (по В. Г. Богорову, 1939).

Сплошная линия — фитопланктон, пунктирная — зоопланктон.

проявляющиеся в зональном или локальном изменении солености, температуры и уровня, ведут к накоплению потенциальной энергии. Равновесие достигается в результате отрицательной обратной связи. Чем больше в океане накапливается потенциальной энергии, тем быстрее осуществляется ее расход в виде преобразования в кинетическую энергию движения. Например, если идеализировать океан и допустить, что его течения не подвержены отклоняющему действию вращения

Земли и трению, то легко подсчитать, что перепад уровней в один метр вызовет течение со скоростью 3 м/с и даст расход более 100 км<sup>3</sup>/ч на каждый квадратный километр сечения. В таком океане горизонтальные градиенты уровня, температуры и солености будут иметь минимальную величину. Здесь осуществляется высокая степень обратной связи и вызываемая этим эффективная стабилизация исходных параметров системы (уровня, солености, температуры). Океаническая планета с такими условиями обладала бы идеальным по однородности климатом без слишком жарких и слишком холодных мест.

Представим теперь другие условия — океан, течения которого контролируются кориолисовым ускорением<sup>1</sup>. Пусть внешние воздействия на океан тем или иным образом привели к резким зональным различиям его уровня, температуры и солености. Океанические течения под действием наклона уровня и градиента давления устремятся первоначально в направлении меридианов. Но очень скоро (через несколько километров пути) кориолисово ускорение повернет их вдоль параллелей, перпендикулярно наклону уровня и градиенту давления. Создается зональная циркуляция, поддерживающая климатические контрасты между экватором и полюсами. Значит ли это, что на представленной нами планете зональных контрастов обратные связи вообще отсутствуют и градиенты уровня, температуры и солености могут неограниченно возрастать во времени? По многим причинам оказывается, что это не так. В той или иной степени обратные связи сохраняются и приводят к новому динамическому равновесию системы. Это равновесие подвижно. При усилении внешних воздействий оно может сдвигаться в сторону большей контрастности океанических характеристик, а при ослаблении — к их выравниванию. Эти воздействия на языке кибернетики называются управлением системы. Задача заключается в том, чтобы описать механизм управления и его количественные законы, насколько это возможно при нашем уровне знаний.

В системном подходе к изучению природных объектов можно видеть один из многих шагов науки от метафизики к диалектике. Составляя систему, мы оживляем объект, находим черты его организации и функционирования, определяем реакции и, наконец, моделируем его поведение при любом диапазоне воздействий. При этом за внешней неподвижностью характеристик нам открываются напряженные связи динамического равновесия — круговороты материи и энергии.

---

<sup>1</sup> Кориолисово, или поворотное, ускорение возникает из-за точного вращения Земли. Мы объясним его подробнее в главе I.

**ФИЗИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ ОКЕАНА**

География — наука о законах развития динамических пространственных систем, формирующихся на земной поверхности в процессе взаимодействия природы и общества, и об управлении этими системами.<sup>1</sup>

Ю. Г. Саушкин

**Чем океан приводится в движение?**

Сравнение океана с живой клеткой, сделанное в предисловии, будет иметь смысл в том случае, если оно позволит увидеть что-то новое в природе океана. В этой главе мы будем касаться только физической стороны вопроса.

Известный физик Э. Шредингер дал следующее определение жизни: «Организация, поддерживаемая извлечением «упорядоченности» из окружающей среды»<sup>2</sup>. К этому выводу его привел следующий ход рассуждений. Основной закон физики — естественное стремление материи приближаться к хаотическому состоянию, термодинамическому равновесию, максимальной энтропии как к некоторому эквиваленту неупорядоченности. Живой организм каким-то образом замедляет этот переход к максимальной энтропии, т. е. смерти. Причину такой способности сохранять упорядоченность видели в обмене веществ. «Но, — пишет Шредингер, — представляется нелепостью, чтобы главным был именно обмен веществ. Любой атом азота, кислорода, серы и т. п. так же хорош, как любой другой атом того же элемента. Что же достигается их обменом? Одно время наше любопытство удовлетворялось утверждением, что мы питаемся энер-

<sup>1</sup> Саушкин Ю. Г. От метагеографии к теоретической географии. — Acta Universitatis Carolinae, Geographica, 1968, № 2, с. 8.

<sup>2</sup> Шредингер Э. Что такое жизнь? Сточки зрения физика. Пер. с англ. М., Атомиздат, 1972, с. 75.

гией. В ресторанах некоторых стран вы могли бы найти карточки — меню, указывающие цену каждого блюда и содержание в нем энергии (калорий). Нечего и говорить, что это нелепость, ибо во взрослом организме содержание энергии так же постоянно, как и содержание материи. Каждая калория, конечно, имеет ту же ценность, что и любая другая, поэтому нельзя понять, чему может помочь простой обмен этих калорий.

Что же составляет то драгоценное нечто, содержащееся в нашей пище, что предохраняет нас от смерти? На это легко ответить. Каждый процесс, явление, событие (назовите его как хотите), короче говоря, все, что происходит в Природе, означает увеличение энтропии в той части Вселенной, где это имеет место. Так и живой организм непрерывно увеличивает свою энтропию, или, иначе, производит положительную энтропию, таким образом, приближается к опасному состоянию максимальной энтропии, представляющему собой смерть. Он может избежать этого состояния, то есть остаться живым, только постоянно извлекая из окружающей его среды отрицательную энтропию»<sup>1</sup>.

Согласно статистической концепции упорядоченности и неупорядоченности энтропия выражается уравнением Больцмана

$$\text{Энтропия} = k \lg D, \quad (4)$$

где  $k$  — постоянный множитель, связывающий энергию и температуру;  $D$  — количественная мера неупорядоченности.

Отрицательную, или негэнтропию Шредингер выражает уравнением

$$- (\text{Энтропия}) = k \lg (1/D), \quad (5)$$

подчеркивая, что она «есть сама по себе мера упорядоченности», так же как мерой упорядоченности можно рассматривать величину  $1/D$ .

Попробуем отсюда извлечь что-то существенное для океана. Мы привыкли считать, что важнейшие процессы, составляющие «жизнь» океана — движение его вод, их перемешивание, как и другие процессы, происходящие

---

<sup>1</sup> Шредингер Э. Что такое жизнь? С точки зрения физика, с. 73—74.

в географической оболочке Земли, развиваются за счет поступления солнечной энергии.

Высказывания Шредингера о клетке дают нам повод задуматься над этим. Поставим мысленный опыт. Освободим лучистую энергию, поглощаемую океаном, от упорядоченности, используя количественную оценку этой величины. Соотношения (4) — (5), основанные на атомных моделях тел, для этой цели неудобны. Но в теории информации количество энтропии может быть выражено с помощью суммы вероятностей. При этом вероятность какой-то характеристики находится по ее повторяемости или по ее площади. Например, пусть имеется пространство площадью  $N_1$  и одна десятая этого пространства имеет температуру  $T_1$ , а девять десятых — температуру  $T_2$ . Информационная энтропия этого пространства будет равна

$$H(N_1) = -(0,1 \log_2 0,1 + 0,9 \log_2 0,9) = 0,47,$$

где 0,1 — вероятность встретить температуру  $T_1$ , а 0,9 — вероятность встретить температуру  $T_2$ .

В другом пространстве  $N_2$  две десятых площади имеют температуру  $T_1$  и восемь десятых температуру  $T_2$ . Информационная энтропия будет

$$H(N_2) = -(0,2 \log_2 0,2 + 0,8 \log_2 0,8) = 0,72.$$

Пространство, включающее десять равных участков с разной температурой, будет иметь информационную энтропию

$$H(N_3) = -10(0,1 \log_2 0,1) = 3,3,$$

а пространство, разделенное на сто таких же участков, —

$$H(N_4) = -100(0,01 \log_2 0,01) = 6,6.$$

Таким образом, общая формула, определяющая информационную энтропию, имеет вид

$$H = - \sum_{i=1}^n p_i \log_2 p_i, \quad (6)$$

где  $p$  — вероятность. Входящий сюда логарифм имеет основание два. Это связано с тем, что за единицу информационной энтропии выбрана информационная энтропия

пространства, поровну разделенного между двумя величинами:

$$H(N_5) = -(0,5 \log_2 0,5 + 0,5 \log_2 0,5) = 1.$$

Информационная энтропия однородного пространства равна нулю. Состояние однородности соответствует полной неупорядоченности, перемешанности, хаосу.

Предположим, что поступление лучистой энергии на поверхность планеты во всех точках одинаково, т. е. лишено упорядоченности. Тогда океан станет поглощать эту энергию одинаково во всех широтах, одинаковыми будут испарение и осадки, если они вообще будут в привычном нам понимании. Сохранятся только приливные течения, но собственные движения океана и конвективные токи перемешивания прекратятся. Ветер почти затухнет и будет поддерживаться лишь благодаря неустранимым еще в нашем опыте контрастам между суши и океаном. Наступит термодинамическое состояние, о котором Шредингер писал: «Система в целом угасает, превращается в мертвую инертную массу материи. Достигается состояние, при котором не происходит никаких заметных событий».

Таким образом, не само по себе количество поглощенной энергии определяет напряженность океанических процессов, а именно упорядоченность этого поглощения, которая в самых крупных масштабах вызвана движением и кривизной земной поверхности, а в самых мелких — молекулярными свойствами воды.

### Планетарный вихрь и движение вод

На поверхности воды трудно представить холмы или впадины. Если прекратятся усилия, которыми поддерживаются неровности водного рельефа (например, центробежное ускорение), то поверхность будет быстро выравниваться токами воды. Однако эти представления оказываются несостоятельными, если перенести их из лаборатории на морскую поверхность большой протяженности. Допустим, что морская поверхность понижается к центру какого-нибудь района. Наклон поверхности вызовет градиент давления, который будет стремиться переместить воду и заполнить понижение.

Если плотность воды однородна, величина градиента давления зависит только от наклона поверхности  $\gamma$  и выражается формулой

$$F_d = \sigma g \operatorname{tg} \gamma, \quad (7)$$

где  $\sigma$  — плотность воды;  $g$  — ускорение свободного падения. Под действием градиентной силы единичный объем воды будет приобретать секунда за секундой все большую скорость, и если бы не было помех, впадина быстро заполнилась бы водой.

Однако, благодаря суточному вращению Земли, на всякое тело, движущееся по земной поверхности, действует поворотная кориолисова, или геострофическая<sup>1</sup>, сила. Эта сила направлена перпендикулярно движению — вправо в северном полушарии и влево в южном. В нашем полушарии она вызывает подмыв правых берегов рек и ускоряет износ правых колес поездов. Ее величина пропорциональна скорости движения относительно земной поверхности и синусу географической широты места:

$$F_{\pi} = u \sigma 2\omega \sin \varphi = u \sigma \Omega, \quad (8)$$

где  $\omega$  — угловая скорость вращения Земли;  $\varphi$  — географическая широта места;  $u$  — вектор скорости течения;  $\Omega$  — планетарный вихрь.

Действие поворотной силы приводит к тому, что траектория частицы воды будет не прямолинейной, а примет форму петли, показанную на рис. 2а. В вершинах петель частица движется перпендикулярно к наклону уровня и вызванной наклоном градиентной силе  $F_d$ . Продолжая петлеобразное движение по циклоиде, частица воды (если ее движению не мешает трение) будет уходить все дальше в направлении, перпендикулярном наклону уровня, не изменяя своего среднего положения ни вверх, ни вниз по наклону. Если мы вмешаемся в процесс движения и заставим наклон уровня увеличиваться во времени, то среднее положение частиц начнет смещаться вниз, противодействуя увеличению наклона. Если мы начнем уменьшать наклон, то среднее положение частиц станет сдвигаться

<sup>1</sup> Гео — земля, строфа — поворот (греч.).

вверх, против наклона, и будет препятствовать его уменьшению. Конечно, такие вмешательства или опыты можно осуществлять только на математических моделях движения.

Присутствующее во всяком движении поворотное ускорение Земли стремится стабилизировать неровно-

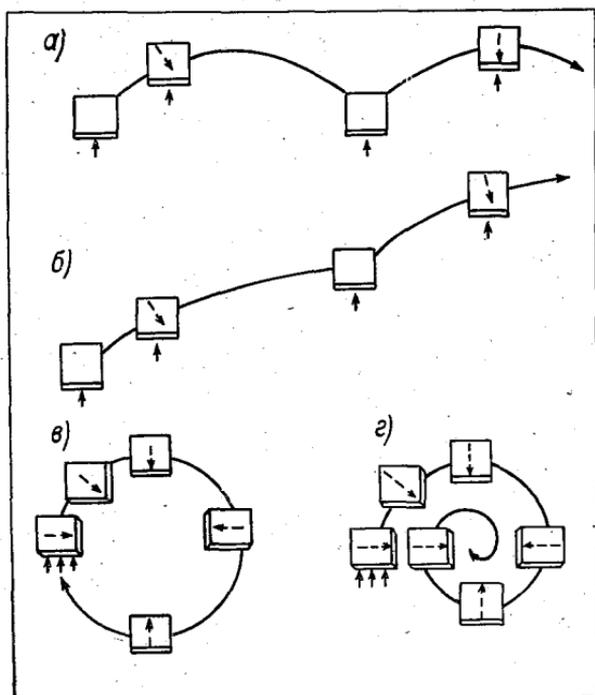


Рис. 2. Влияние силы Кориолиса на траекторию частицы (по Р. Стюарту, 1969).

Пунктирные стрелки показывают направление силы Кориолиса; одиночные стрелки — направление постоянной движущей силы; тройные стрелки — направление кратковременного толчка.

сти уровневной поверхности океана. Этот эффект нельзя наблюдать в лабораториях, а тем более предвидеть из повседневного опыта, поскольку размеры петель, описываемых частицами воды, выражаются в километрах.

В табл. 1 приведены размеры петель: их ширина  $L$  в направлении, перпендикулярном к действующей силе,

Таблица 1

Параметры колебательных движений при действии  
постоянной силы  $10^{-3}$  дин

$\varphi^\circ$	$U_x$ см/с	$U_y$ см/с	$D$ км	$L$ км	$T$ ч
90	6,9	13,8	0,94	2,94	12,0
80	7,0	14,0	0,96	3,01	12,1
70	7,3	14,6	1,06	3,33	12,7
60	7,9	15,8	1,26	3,96	13,8
50	8,0	16,0	1,78	5,60	15,7
40	10,7	21,4	2,28	7,16	18,7
30	13,7	27,4	3,76	11,8	24,0
20	20,0	40,0	8,04	25,2	35,0
10	39,5	79,0	31,2	98,0	69,1

глубина  $D$  в направлении действующей силы, максимальная скорость в направлении силы  $U_x$  и поперек нее  $U_y$ , а кроме того, время движения вдоль одной петли  $T$  для разной географической широты  $\varphi$  и при постоянной действующей на воду силе, равной  $10^{-3}$  дин. Это такая сила, которая соответствует градиенту давления при возвышении уровня моря в 2 мм на расстоянии 1 мили (1852 м).

При использовании таблицы надо иметь в виду, что скорость движения и размеры петель зависят от величины силы линейно, поэтому при изменении силы в произвольное число  $m$  раз нужно величины  $L$ ,  $D$ ,  $U_x$ ,  $U_y$  умножить на  $m$ . В то же время величина  $T$  при изменении силы меняться не будет.

На рис. 2 в дополнение к петлеобразным движениям воды, которые возникают при действии на частицы постоянной силы, приведены траектории инерционного движения, которое длится после прекращения действия движущей силы. При отсутствии трения (рис. 2в) это движение идет по кругу инерции. Радиус круга инерции зависит от скорости течения и географической широты места. При скорости 100 см/с на широте  $40^\circ$  радиус будет равен 10 км. Сплошные стрелки на рисунке обозначают движущую силу течения, а пунктирные стрелки — поворотную.

Может показаться странным, что мы говорили о движении морских вод, не принимая во внимание

силу трения. В повседневном опыте эта сила всегда сопровождает движение воды, но в океане во многих случаях можно ею пренебрегать. Дело в том, что сила трения возникает за счет разности скоростей соседних слоев жидкости. Такая разность обычно проявляется благодаря тому, что на границах потока жидкость как бы прилипает ко дну и стенкам. Прилипание существует и в океане, однако там расстояния до границ потока могут быть очень значительны, а разность скоростей мала. Возможность не учитывать силу трения в потоках, не вызванных ветром и удаленных от дна, подтверждают проверки, сделанные и прямым измерением скоростей, и расчетами. Если же силу трения ввести в вычисления траекторий частиц, что необходимо, например, на мелководье, то получим движения, показанные на рис. 2 б и 2 г.

Чтобы понять происхождение поворотной силы, предельно мысленный опыт. На рис. 3 показана проекция земных меридианов и параллелей на плоскость, касательную к земной поверхности в точке Северного полюса. Если пустить из точки полюса вдоль меридиана какое-то тело, не связанное трением с земной поверхностью, то под действием начального толчка это тело станет скользить по поверхности, сохраняя направление своего движения в перпендикулярной чертежу плоскости начального меридиана.

В то же время поверхность Земли, не связанная трением с движущимся телом, будет равномерно вращаться под ним со скоростью  $360^\circ$  за 24 ч, или 1440 мин, и поэтому через каждые 4 мин ( $1440 \text{ мин} : 360^\circ$ ) под телом пройдет новый меридиан, допустим  $1^\circ$  з. д.,  $2^\circ$  з. д. и т. д.

Таким образом, движение тела будет отклоняться от земных ориентиров вправо. Двигаясь по инерции, тело (допустим, ракета) через равные интервалы времени попадает в точки земной поверхности, показанные на рисунке.

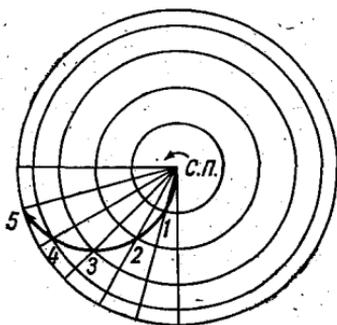


Рис. 3. Искривление прямой траектории за счет вращения Земли.

цифрами 1, 2, 3, 4, 5. Расстояния между параллелями, на которых лежат точки, — неодинаковы ввиду того, что движение по инерции прямолинейно, а земная поверхность искривлена.

Очевидно, что как бы мы ни увеличили массу ракеты, при неизменной скорости движения к югу ракета пройдет над одними и теми же пунктами земной поверхности. Действие силы Кориолиса останется неизменным, а значит, величина силы возрастет во столько же раз, во сколько возросла масса тела. Таким образом, так же как и сила тяжести, сила Кориолиса относится к массовым силам. Однако если для силы тяжести мы можем назвать взаимодействующие тела, причем с массами, пропорциональными величине взаимодействия, то сила Кориолиса, как видно из нашего примера, возникает без взаимодействия с каким-либо телом, иными словами «неизвестно откуда». За это неподчинение третьему закону Ньютона силу Кориолиса относят к числу сил фиктивных.

Внимательный читатель, возможно, вспомнил круг инерции, показанный на рис. 26, и удивился, что ракета не возвратилась в точку запуска по этому кругу. Причина здесь та, что круг инерции справедлив для случая, когда величина поворотного ускорения останется в процессе движения постоянной. Это должно быть, если географическая широта не изменилась. Такой случай, конечно, до некоторой степени условен, но при радиусе круга 10 км изменения широты так незначительны, что почти не влияют на траекторию. Движения, близкие к кругам инерции, но менее правильные, удавалось наблюдать в океане.

Наконец, может возникнуть и такой вопрос: почему планетарный вихрь уменьшается к экватору, если угловая скорость вращения планеты одинакова для всех ее точек? Причина в том, что течение отклоняет не вся угловая скорость, а лишь ее проекция на перпендикуляр к площадке, касательной к земной поверхности в данной точке. Величина проекции равна  $\omega \sin \varphi$ . Именно с такой угловой скоростью площадка поворачивается вокруг своего центра в процессе суточного вращения Земли (вспомните опыты с маятником Фуко). Значит, эффективность влияния силы Кориолиса на движение воздуха и воды меняется на Земле в очень

широких пределах. Поскольку на экваторе эта сила равна нулю, частица, направленная от экватора к полюсу, может пройти значительное расстояние, прежде чем она будет повернута на восток. Примером тому служит антипассат в атмосфере (см. рис. 13).

Поворотное ускорение имеет очень большое значение в развитии геофизических явлений; оно было впервые открыто при решении географических задач. За 17 лет до рождения Гюстава Кориолиса это ускорение вводилось в уравнения приливной волны Лапласом.

### Невидимые каналы

В предисловии мы говорили, что сила Кориолиса препятствует равномерному распределению тепла на Земле, ограничивая обмен воды и воздуха между полярными и тропическими широтами. Мы представили тогда читателю две планеты, движение на одной из них контролировалось силой Кориолиса — ее мы назвали «планетой зональных контрастов», другую, где сила Кориолиса не могла направить движение вдоль параллелей, мы описали как планету однородного климата. Но возможно ли вообще существование такого благоприятного варианта? Ведь невращающиеся планеты будут неравномерно освещаться Солнцем и иметь теневую сторону. Это должно вызывать сильнейшие температурные контрасты и стремительные движения воды и воздуха.

Однако действие силы Кориолиса можно нейтрализовать, не прекращая вращение Земли. Представим, что океан рассечен плотинами или берегами на узкие длинные каналы, идущие вдоль меридианов от экватора к полюсам. Тогда сила Кориолиса не смогла бы повернуть на восток течение, идущее к Северному полюсу. Все действие этой силы свелось бы единственно к тому, что в каналах поддерживался бы нагон и высокий уровень воды у правого, если смотреть по течению, берега. Это в действительности происходит в морских проливах и подтверждается нивелирными измерениями.

Представим морское течение, по левую сторону которого расположен берег, а по правую — открытое море. Будем наблюдать за возникновением течения. В начальный момент времени вода неподвижна. Но вот какая-то сила, например ветер, приводит прибрежные воды в

движение на север. Немедленно, с началом движения в действие вступает и сила Кориолиса, стремящаяся повернуть течение направо, т. е. на восток. Если бы движущая сила — ветер — охватила весь океан, то вода отошла бы от берега подобно отливу. Но в нашем примере ветер полосой простирается вдоль берега, а дальше, в открытом море, он затухает. Сила Кориолиса пытается оторвать воду от берега. Действуя на частицы воды в течении, она их все увлекает в открытое море. Происходит следующее: частицы прибрежной полосы, как солдаты в строю, «все вдруг» поворачиваются направо и, упираясь друг в друга, надавливают на неподвижные воды открытого моря. Эти воды могут расступиться и дать место потоку, если поток движется на них своей головной частью, а он наступает флангом, подобным стене или длинной плотине. В результате создается такая же картина, как в канале: уровень воды прибрежного течения повышается слева направо, и в правой половине течения по направлению к неподвижным водам открытого моря образуется нагон.

Этот нагон будет нарастать до тех пор, пока сила Кориолиса не уравновесится противодействующей силой, вызванной наклоном уровня. Эта встречная сила представляет собой градиент давления. Она направлена вдоль наклона уровня и пропорциональна величине тангенса угла наклона. Теперь, когда сила Кориолиса нейтрализована, вода движется на север так же, как если бы она находилась в канале. Канал и в действительности создается в процессе движения. Левый край канала твердый, правый — жидкий. Можно сказать, что это «канал с одним берегом». А если единственный берег окажется справа? Это тоже возможно. Твердый берег будет противодействовать силе Кориолиса, в северном полушарии действующей направо, и течение будет продвигаться вдоль этого берега. Пример — воды Гольфстрима у берегов Скандинавии (Норвежское течение).

Между каналом с одним берегом и обычным каналом есть важное различие, используемое живыми организмами. Оно состоит в том, что в ветровом течении без одного или двух берегов обязательно создается поперечная циркуляция и возникают вертикальные движения, которые в обычном канале могут быть подавлены плотностной стратификацией воды.

Рисунок 4 поясняет наиболее простой случай «канала» с левым твердым берегом. На рисунке буквой А показан созданный силой Кориолиса водяной вал, образующий правый берег «канала». Этот вал с мористой, правой стороны медленно рассасывается и выравнивается, а потому оседает и перестает выдерживать напор, создаваемый силой Кориолиса. Последняя нагоняет направо новые воды и восстанавливает исходную высоту вала.

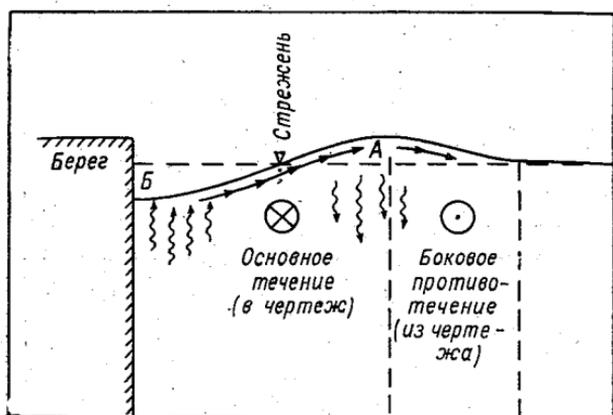


Рис. 4. «Канал» с левым твердым и правым жидким берегом.

Стрелками показаны вертикальные и поперечные составляющие течения.

ту вала. Процесс этот длится непрерывно, и воды, необходимые для восстановления вала, забираются от берега. Вследствие этого у берега и вообще в левой половине течения возникает вертикальный подток воды к поверхности, чтобы компенсировать там ее убыль.

Выше для наглядности мы сказали, что сила Кориолиса поворачивает пришедшие в движение частицы «все вдруг». Это, как видно из табл. 1, не совсем точно. Для полного поворота частиц направо требуется 6 ч и более в зависимости от географической широты места.

На рис. 4 вдоль основного течения показано боковое противотечение. Оно возникает за счет того, что воды растекающегося вала отклоняются направо той же силой Кориолиса. Если представить, что у канала оба берега жидкие, то противотечение появится не только

справа, но и слева, где оно возникнет за счет воды, которая стремится заполнить впадину Б. Пример тому — заток лабрадорских вод слева от Гольфстрима вдоль американского берега.

Итак, на Земле функционируют меридиональные невидимые каналы. Они расположены вдоль берегов океана. Наиболее крупный из них — Гольфстрим, имеющий на широте Нью-Йорка расход 75 млн. м<sup>3</sup>/с, ширину около 100 км, толщину около 1 км, максимальную скорость 2,5 м/с.

Вдоль правого, мористого края Гольфстрима существует противотечение со скоростью 0,5 м/с, на горизонтах около 1300 м отмечается глубинное противотечение со скоростью до 0,2 м/с. Большая часть Гольфстрима переходит в замкнутый круговорот Северной Атлантики. Только 10 млн. м<sup>3</sup>/с составляют его ветвь, уходящую на север к Исландии и Скандинавии (Северо-Атлантическое течение), и только 3 млн. м<sup>3</sup>/с попадает в Северный Ледовитый океан.

Аналогичное течение Тихого океана — Куроисио — имеет на той же широте расход 65 млн. м<sup>3</sup>/с, ширину около 200 км, толщину около 500 м, максимальную скорость 1,7 м/с. В нем также отмечено противотечение.

### Системы океанической циркуляции

На рис. 5 показана схематическая картина течений на поверхности океана, полученная в главных чертах по судовым наблюдениям с начала нашего столетия. Этот рисунок может служить моделью Атлантического или Тихого океана. Из рисунка видно, что циркуляция образует несколько колец. Центры движений обозначены буквами А (антициклонические кольца) и Ц (циклоническое кольцо).

Эти названия связаны с областями высокого атмосферного давления — антициклон и низкого — циклон. Воздух в антициклоне под действием градиента давления устремляется из центра области к ее окраинам и, подчиняясь силе Кориолиса, отклоняется в северном полушарии вправо (в южном — влево), образуя циркуляцию по часовой стрелке (в южном полушарии — против часовой стрелки). В циклоне картина движения противо-

положна. В центре области давление понижено, и поэтому градиент давления направляет воздушные потоки к центру, а сила Кориолиса поворачивает их против часовой стрелки (северное полушарие).

Казалось бы, этими обстоятельствами и объясняется схема движения океана. Однако здесь скрыты противоречия, остававшиеся загадкой до недавнего времени. Из рисунка видно, что центры океанических колец смещены к западным берегам океана. У этих берегов развиты мощные течения, наиболее сильно влияющие на климат Земли. Это Гольфстрим в Атлантическом океане, Куроисио — в Тихом и менее известные течения южного полушария. У противоположного восточного берега течения имеют небольшие скорости и размытые очертания. Предполагается, что даже масса переносимой ими воды не может компенсировать расход стремительного, но узкого Гольфстрима. Следовательно, западные течения должны иметь дополнительный источник вод.

Второе противоречие состоит в том, что центры океанических колец циркуляции не совпадают с центрами атмосферного давления. Более того, высокое давление атмосферы вблизи 30-й параллели составляет почти сплошную антициклоническую зону, опоясывающую весь земной шар. О происхождении этой зоны мы расскажем в разделе «Как работает механизм циркуляции».

Пока только отметим, что пояс высокого давления у 30° широты создает такую систему приземных ветров, какая показана на рис. 6. Рисунок составлен по среднегодовым данным для Тихого океана. По его вертикальной оси отложена географическая широта места, а по горизонтальной — характеристика ветра, но не скорости его, а величина касательного напряжения  $\tau$  на поверхности океана. Направление  $\tau$  показано на рисунке стрелками. К северу от 30-й широты оно восточное; а к югу — западное. Смена направлений происходит потому, что градиент давления направляет воздух от 30-й

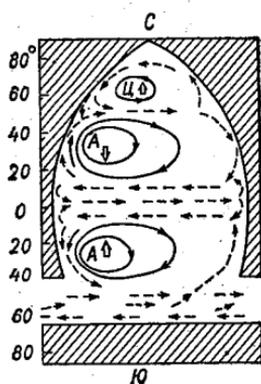


Рис. 5. Схема океанической циркуляции.

параллели к югу и к северу, а сила Кориолиса отклоняет это движение вправо.

Итак, картина приземного ветра не может полностью объяснить характер океанических «колес» циркуляции. Поставленные выше вопросы остались пока без объяснений. Чтобы дать на них ответ, рассмотрим несколько теорем. Первая теорема, доказанная геометрическим путем английским океанографом Дж. Праудменом, говорит о том, что антициклонические системы движения океана и в северном, и в южном полушарии должны

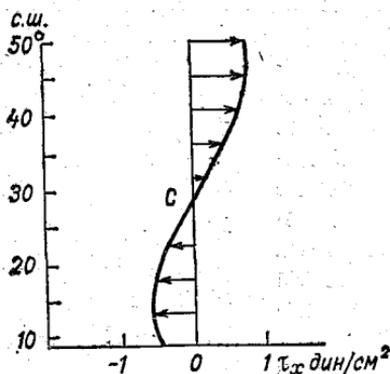


Рис. 6. Трение ветра о воду в зоне антициклонической циркуляции. Среднегодовые данные по Тихому океану, северное полушарие (по Г. Стомелу, 1963).

смещаться к экватору. Нетрудно угадать следствия такого явления. Сближение систем циркуляции создаст избыток вод в зоне экватора, и этот избыток должен компенсироваться усиленным по сравнению с остальными течениями системы оттоком воды к полюсу. В северном полушарии такой компенсационный отток осуществляется Гольфстримом.

Согласно этой теореме, циклонические системы циркуляции будут вести себя противоположно антициклоническим, т. е. смещаться к полюсам. В результате между верхним (циклоническим) кольцом на рис. 5 и примыкающим к нему с юга антициклоническим кольцом будет создаваться расхождение вод и возникать их недостаток, который восполнится тем же Гольфстримом.

Вторая теорема Праудмена доказывает, что для равновесия «колес» циркуляции их центры должны быть смещены к западным берегам, где и возникнут наиболее сильные течения (снова пример — Гольфстрим).

Перейдем к доказательству теорем. Пусть на рис. 7 ось  $y$  означает земной меридиан, а ось  $x$  — параллель (или, при более строгом доказательстве, дугу большого круга). Пусть вокруг центра  $A$  проходит трубка тока, симметричная относительно оси  $x$ . Рассмотрим четыре малых элемента трубки, расположенных симметрично относительно осей  $x$  и  $y$  и имеющих одинаковую длину  $l$ . Объем воды в каждом элементе будет зависеть от площади поперечного сечения трубки  $f$  и равняться  $lf$ . Расход воды через любое поперечное сечение трубки тока одинаков и равен произведению скорости  $u$  на площадь сечения трубки. Таким образом,  $uf = \text{const}$ . Но если длина рассматриваемых элементов трубки ( $l$ ) и плотность воды ( $\sigma$ ) в них одинаковы, то мы получаем, что для всех четырех объемов произведение скорости воды на ее массу также одинаково. Вспомним теперь, что величина силы Кориолиса пропорциональна скорости и массе движущегося объема воды, а также синусу широты места:

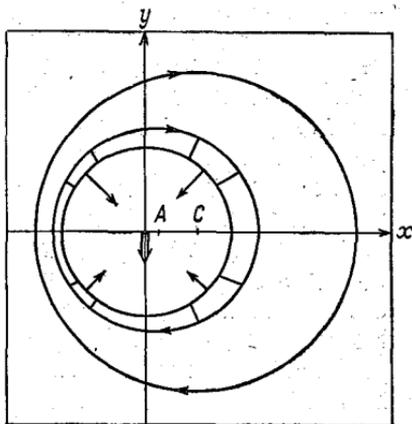


Рис. 7. К доказательству двух теорем Праудмена о смещении систем циркуляции (по Дж. Праудмену, 1957).

$$F_{\text{К}} = ulf\sigma \cdot 2\omega \sin \varphi. \quad (9)$$

Эта сила направлена по нормали к движению. Отложим на рис. 7 ее векторы для каждого из четырех элементов трубки и спроектируем их на ось  $y$ . Величина векторов будет тем больше, чем они дальше расположены от экватора. Поэтому равнодействующая верхних векторов на нашем рисунке будет превышать равнодействующую нижних векторов, и возникнет результирующая сила, направленная к экватору при антициклоническом движении в трубке. Если мы заполним подобными трубками весь объем пространства, охваченный циркуляцией, то получим, что вся система течений имеет тенденцию смещаться к экватору. В циклоническом кольце

течений возникнет противоположное смещение — к полюсу. Таким образом доказывается первая теорема.

Рассмотрим вторую теорему. Пусть на том же рис. 7 точка  $C$  обозначает центр океанического района, охваченного циркуляцией. Напряжения ветра вокруг этого центра показаны на рис. 6. Эти напряжения создают моменты силы относительно вертикальной оси, проходящей через точку  $C$  к центру Земли.

Напомним, что моментом силы относительно оси, перпендикулярной к плоскости, в которой лежит вектор силы, называется произведение величины вектора на кратчайшее расстояние между осью и прямой, по которой действует сила. Отсюда следует, что если прямая, по которой действует сила, проходит через ось, то момент силы относительно этой оси равен нулю. Вернемся теперь к рис. 7. Предположим, что все трубки тока расположены вокруг общего центра  $C$ . В этом случае действующая на трубки сила Кориолиса не будет создавать момента относительно оси  $C$ . Моменты силы трения ветра окажутся неуравновешенными и создадут ускорение во вращении системы.

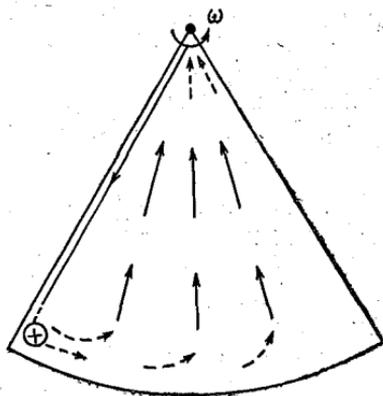
Мы не принимаем во внимание силы трения о дно и берега океана, поскольку их действие распространяется на незначительные по сравнению с масштабами океана пограничные слои. Итак, если трубки тока имеют центр в точке  $C$ , то поверхностная ветровая циркуляция будет, по Праудмену, ускоряться. Если мы сдвинем центр трубок к восточному берегу океана, то ускорение станет еще большим, так как моменты вращения, вызванные силой трения и Кориолиса, совпадут по знаку. Таким образом, система может находиться в равновесии только в том случае, когда общий центр трубок тока, помеченный буквой  $A$ , расположен у западного берега океана. В этом случае момент силы Кориолиса создает относительно оси  $C$  движение против часовой стрелки, а моменты силы трения ветра — по часовой стрелке. Таким образом, способом от противного доказывается вторая теорема. Может быть, строгость проведенных доказательств удовлетворит не всех. Но теоремы обладают достоинством простоты и вводят в круг важных океанологических проблем.

Мы объяснили, правда, пока лишь с качественной стороны, динамику колец, циркуляции и причины воз-

никовения Гольфстрима. Мы оставили Гольфстрим в том месте, где он, оторвавшись от берегов Северной Америки, устремился вдоль параллели к берегам Западной Европы. Рассмотрим теперь механизм, который заставляет продолжение Гольфстрима отклоняться далее к северу и вторгаться в Ледовитый океан. На первый взгляд, мы можем ограничиться тем же ходом рассуждений, который уже использовали, т. е. исходить из касательного напряжения ветра. Однако ветер этих широт изменчив, область же низкого давления атмосферы — это ограниченный район, очертания и положение

Рис. 8. Вращающаяся модель Г. Стоммела, А. Аронса, А. Фэллера (1958).

⊕ — гидродинамический источник,  $\omega$  — угловая скорость вращения модели (соответствует с учетом масштаба угловой скорости Земли).



которого изменяются по сезонам года. Вместе с тем воды Гольфстрима не изменяют своего пути в Арктику, а их поток только ослабевает летом и усиливается зимой.

Помочь объяснению этой устойчивости может физическая модель циркуляции, построенная американским океанографом Г. Стоммелом. На рис. 8 показан вращающийся сектор, заполненный водой и ограниченный твердыми стенками. Пусть левая стенка сектора имитирует восточный берег Гренландии и остров Ньюфаундленд, правая — побережье Европы. Опыты с подкрашенной жидкостью показали, что если в левый угол сектора ввести источник дополнительной воды, то во вращающемся секторе создастся циркуляция, показанная на рисунке стрелками. Рисунок сделан по фотографии модели. Сплошными стрелками на нем нанесены те течения, которые не только видны на модели, но и получены по уравнениям, описывающим модель. Пунктиром

показаны звенья циркуляции, связывающие потоки воды в замкнутую систему движения.

Рисунок 8 хорошо передает главные черты течений между Европой и Гренландией. Вдоль восточного берега Гренландии проходит с севера на юг узкое и быстрое Восточно-Гренландское течение. Воды же Гольфстрима устремляются к северу широким фронтом от Англии до Исландии и очень значительная их часть проходит в Арктику западнее Исландии, прижимая встречное течение из Арктики к берегу Гренландии. Теплые атлантические воды, окружая Исландию, создают вокруг нее положительную аномалию температуры воздуха. Эта аномалия особенно значительна в зимнее время, когда над окружающими материками развиваются холодные антициклоны. Теплый воздух аномалии, поднимаясь вверх и растекаясь, создает исландский минимум давления с циклоническим направлением ветра, усиливающий Гольфстрим. Таким образом, между двумя явлениями создается положительная обратная связь, возрастающая в зимнее время года.

Нам осталось найти, откуда в реальном океане может появиться источник, помеченный кружком в левом нижнем углу сектора. Очевидно, его образует схождение вод, пришедших с Гольфстримом и вынесенных к острову Ньюфаундленд из Арктики.

До сих пор нам удавалось почти целиком обходиться без уравнений движения. Однако, если мы говорим о динамической системе, то должны, конечно, найти количественные связи между отдельными звеньями этой системы, а для этого мы перейдем к рассмотрению математических моделей течений.

### Математические модели течений

**Физические основы уравнений.** Из школьного курса известно уравнение второго закона Ньютона:

$$am = F, \quad (10)$$

где  $a$  — ускорение, получаемое телом;  $m$  — масса тела;  $F$  — сила, действующая на тело.

подавляющее большинство уравнений, служащих для нахождения скорости (воды, ледников, воздуха), как

бы сложно эти уравнения ни были записаны, не что иное, как расшифровка уравнения (10) в конкретных физических или географических условиях. Это — уравнения динамики.

Итак, уравнение (10) будет исходным для дальнейших рассуждений. Запишем (10) в дифференциальных обозначениях:

$$\frac{d(\mathbf{um})}{dt} = \mathbf{F}, \quad (11)$$

где  $\mathbf{u}$  — скорость;  $m$  — масса тела;  $\mathbf{F}$  — действующая сила;  $t$  — время;  $dt$  — бесконечно малое приращение времени;  $\mathbf{um}$  — количество движения;  $d(\mathbf{um})$  — изменение количества движения за время  $dt$ .

Особое написание букв, обозначающих скорость и силу, показывает, что речь идет о векторах, т. е. в данном случае, о величинах, имеющих переменное направление. Под знаком  $\mathbf{F}$  в уравнении (11) может подразумеваться не только одна сила, но и результат геометрического сложения нескольких сил — результирующая сила. Чтобы подчеркнуть это обстоятельство, закон Ньютона можно переписать в виде

$$\frac{d(\mathbf{um})}{dt} = \Sigma \mathbf{F}, \quad (12)$$

где  $\Sigma$  — знак суммы.

Сложение сил производится по правилу параллелограмма. Это означает, в частности, что если к телу приложено одновременно несколько сил, то каждая из них сообщает телу определяемое вторым законом ускорение так, как если бы других сил не было. Напомним еще, что действие силы сказывается независимо от того, пребывало ли ранее тело в покое или же двигалось.

**Упрощение уравнения Ньютона.** Уравнение (12) вмещает в себя столь большое содержание, что служит основой не только уравнений течений, но и движения космических ракет с переменной массой. В динамике сплошных сред (вода, материковые льды, воздух) это уравнение применяется в упрощенном виде. Поскольку интересующим нас телом является кубик воды (льда,

воздуха), вырезанный из потока, его массу можно записать так:

$$m = \sigma V, \quad (13)$$

где  $\sigma$  — плотность воды;  $V$  — объем кубика.

Если допустить, что для воды, как и для идеального газа, произведение плотности на объем величина постоянная, то массу в уравнении (12) можно вынести из-под знака дифференциала:

$$\sigma V \frac{du}{dt} = \Sigma F. \quad (14)$$

Упрощенная форма записи (14) вошла в гидродинамику после работ Эйлера и Даламбера (1750-е годы). Она основана на постулате, получившем название «закона сохранения массы для элемента движущейся жидкой среды»:

$$\sigma V = \text{const.} \quad (15)$$

Очевидно, что уравнение (15) не учитывает изменение массы выбранного нами кубика за счет диффузии солей, испарения, нарастания льда и тому подобного, а поэтому будет строгим лишь для бесконечно малого по размерам кубика, который ведет себя относительно названных превращений как единое целое.

**Неожиданные трудности — неразрывность среды.** До сих пор нам могло казаться, что описание движения частиц жидкости не более трудная задача, чем описание движения твердого тела. Однако в первом случае мы сталкиваемся с неожиданной проблемой — в процессе движения жидкости должно выполняться условие неразрывности, или сплошности, ее среды. Иными словами, в потоке не может возникать ни пустот, ни таких пространств, которые заняты сразу несколькими объемами жидкости.

Чтобы не войти в противоречие с этим требованием, часто приходится использовать упрощенные или «идеализированные» условия движения. Допустим, мы хотим получить траекторию какой-то частицы. Построим модель движения так, чтобы силы, действующие на эту частицу, и частицы, лежащие на ее пути, были в каждый момент времени одинаковы. Тогда соседние частицы бу-

дут двигаться с равными скоростями, и это предотвратит их «столкновение» или «разрыв». Именно при таких условиях были получены траектории на рис. 2, именно поэтому в расчетах траекторий предполагалось, что планетарный вихрь не изменяется на пути частиц.

Проблема, возникающая из-за неразрывности жидкости, была рассмотрена в 1755 г. Леонардом Эйлером. Среди полученных Эйлером результатов был новый подход к изучению движения жидкости. Раньше мы говорили о движении индивидуальной частицы жидкости, и применение к ней второго закона Ньютона было вполне очевидно. Теперь же зададимся другой целью. Будем искать скорости в каком-то неподвижном маленьком объеме пространства. Пусть через этот объем непрерывно проходят новые частицы воды. Можно ли применить для этого случая ньютоновский закон в записи (14) — уже далеко не очевидно. Действительно, новый объект исследования — объем пространства — содержит в каждый момент времени новые частицы материи. Эйлер разрешил это противоречие, показав, что в новой постановке задачи изменение скорости в точке зависит от дополнительного обстоятельства — инерции приходящих сюда частиц. Например, если частицы потока имеют за секунду до подхода к точке скорость на 1 см/с большую, чем была в точке, они создадут ускорение 1 см/с<sup>2</sup>. Поясним это более подробно.

Пусть в потоке, идущем по оси  $x$ , скорость в момент времени  $t$  в точке  $x_2$  равна  $u_2$ , а скорость на расстоянии  $\Delta x$  до подхода к точке равна  $u_1$ . Положим для определенности  $\Delta x = 10$  см,  $u_2 = 9$  см/с,  $u_1 = 10$  см/с. Таким образом, изменение скорости на расстоянии  $\Delta x$  будет  $\Delta u = -1$  см/с. Изменение скорости потока в точке  $x_2$  за секунду составит

$$\frac{\Delta u_2}{\Delta t} = -u_1 \frac{\Delta u}{\Delta x} = 1 \text{ см/с}^2.$$

Переходя к пределу и трехмерному движению, мы можем записать значение инерционных ускорений:

$$\mathbf{j} = -u_x \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial x} - u_y \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial y} - u_z \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial z}. \quad (16)$$

Значит, полная сумма ускорений в точке равна

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \frac{1}{\sigma V} \sum F - u_x \frac{\partial u}{\partial x} - u_y \frac{\partial u}{\partial y} - u_z \frac{\partial u}{\partial z}. \quad (17)$$

Если описание движения строится по форме (14), т. е. для индивидуальной частицы, то говорят, что движение рассматривается методом Лагранжа, если по форме (17) — методом Эйлера. В методе Эйлера условие неразрывности имеет простую форму записи:

$$\frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_y}{\partial y} + \frac{\partial u_z}{\partial z} = 0. \quad (18)$$

Порассуждаем немного об этом уравнении. Пусть имеется неподвижный кубический объем пространства. Две грани куба перпендикулярны оси  $x$ , две — оси  $y$ , две — оси  $z$ . За счет движения по оси  $x$  в кубе может образоваться прибыль воды, равная  $\Delta u_x \Delta y \Delta z$ , по оси  $y$  —  $\Delta u_y \Delta x \Delta z$ , по оси  $z$  —  $\Delta u_z \Delta x \Delta y$ , где  $\Delta u$  — изменение скорости воды при ее движении через куб;  $\Delta x$ ,  $\Delta y$ ,  $\Delta z$  — ребра куба.

Если вода несжимаема, суммарная прибыль равна нулю:

$$\Delta u_x \Delta y \Delta z + \Delta u_y \Delta x \Delta z + \Delta u_z \Delta x \Delta y = 0.$$

Разделим уравнение на величину объема —  $\Delta x \Delta y \Delta z$ :

$$\frac{\Delta u_x}{\Delta x} + \frac{\Delta u_y}{\Delta y} + \frac{\Delta u_z}{\Delta z} = 0.$$

Переходя к пределу, имеем (18).

Это уравнение в задачах морских течений обычно удовлетворяется с помощью специального приема. Мы допускаем, что горизонтальное движение (составляющие  $u_x$ ,  $u_y$ ) целиком определяется действующими силами и никак не ограничивается условием неразрывности. Одновременно мы полагаем, что вертикальное движение ( $u_z$ ) не зависит от действующих сил, а целиком подчиняется одной задаче — устранить противоречия горизонтального движения с условием неразрывности. Например, если горизонтальное движение стремится вместить несколько объемов жидкости в один и тот же объ-

ем пространства, то противоречие с условием неразрывности устраняется вертикальным оттоком жидкости из этого же пространства. Если горизонтальное движение создает пустоту в каком-то объеме пространства, этот объем заполняется вертикальным движением воды.

Математически такое согласование с условием неразрывности достигается тем, что рассчитывается горизонтальное расхождение скорости (дивергенция):

$$\frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_y}{\partial y} = \text{div } \mathbf{u}_{x, y}, \quad (19)$$

а найденная величина подставляется в уравнение (18), откуда и получают вертикальную скорость. Таким образом, во многих задачах морских течений горизонтальное движение воды вычисляется так, как будто бы условие неразрывности и не существует, а вертикальное так, как будто бы никакие силы в вертикальном направлении не действуют.

**Силы, вызывающие течения.** Посмотрим, какие силы могут действовать на морские воды. Мы уже говорили о поворотной и градиентной силе. Добавим к сказанному ранее, что горизонтальный градиент давления возникает в толще воды не только за счет наклона уровня, но и за счет изменения температуры или солености, а значит, и плотности воды. Различия в плотности и наклон уровня создают различия в массе соседних столбов воды, а следовательно, и в давлении.

Если на расстоянии  $dx$  давление меняется на величину  $dp$ , то по оси  $x$  возникает движущая сила давления  $(F_D)_x = -dp dx dy$ , действующая на объем воды  $V$  ( $V = dx dy dz$ ). Отнеся эту силу к единичному объему, получим

$$\frac{1}{V} (F_D)_x = - \frac{\partial p}{\partial x}. \quad (20)$$

Те же условия на оси  $y$  создадут движущую силу давления:

$$\frac{1}{V} (F_D)_y = - \frac{\partial p}{\partial y}. \quad (21)$$

Знак минус мы ставим потому, что сила направлена от большего давления к меньшему. Горизонтальный

градиент давления есть геометрическая сумма двух сил (20) и (21). Градиент показывает направление, вдоль которого под действием разности давлений движется жидкость.

Вторая сила, вызывающая течения, — это трение ветра о водную поверхность. Сила трения, отнесенная к единице поверхности, называется напряжением трения и обозначается буквой  $\tau$ . Согласно ньютонову закону трения значение  $\tau$  равно (ось  $z$  направлена вниз)

$$\tau = -A \frac{\partial u}{\partial z}, \quad (22)$$

где  $A$  — коэффициент внутренней вязкости воды.

Если мы выделим в толще воды отдельный слой, то очевидно, что в процессе движения он будет испытывать напряжение  $\tau$  со стороны своих верхней и нижней поверхностей. Если скорость в потоке уменьшается сверху вниз, то трение о слой, приложенное сверху, будет его ускорять, а трение, приложенное снизу, — тормозить. Результирующий эффект от этих двух воздействий мы найдем, если геометрическую разность между двумя  $\tau$  отнесем к толщине нашего слоя. Переходя к пределу, получим величину силы трения, действующую на объем  $V$ . Запишем ее значения по осям  $x$ ,  $y$ , имея в виду случай, когда составляющие вектора скорости меняются только по оси  $z$ :

$$\frac{1}{V} (F_\tau)_x = -\frac{\partial}{\partial z} \left( A \frac{\partial u_x}{\partial z} \right) = -\frac{\partial \tau_x}{\partial z}, \quad (23)$$

$$\frac{1}{V} (F_\tau)_y = -\frac{\partial}{\partial z} \left( A \frac{\partial u_y}{\partial z} \right) = -\frac{\partial \tau_y}{\partial z}. \quad (24)$$

Читатель может заметить, что наше рассуждение подразумевает слоистую (ламинарную) модель течений, и вправе удивиться — неужели такая модель применяется к океану? Да, уравнения океанических течений обычно строятся именно так, и океанографы моделируют ими осредненное турбулентное движение путем подбора численных значений величины  $A$ , называемой коэффициентом виртуальной (т. е. эквивалентной) вязкости. Имеется в виду, что коэффициент делает ламинарную модель эквивалентной турбулентному движению. Иногда о лами-

нарном характере модели забывают и говорят просто «турбулентная вязкость».

**Модель Экмана.** В 1902 г. шведским ученым В. Экманом (в то время студентом) была опубликована ставшая знаменитой модель ветровых течений. Эта математическая модель смогла объяснить непонятное раньше отклонение дрейфа льдов вправо от направления ветра. Такое отклонение наблюдал Ф. Нансен в Северном Ледовитом океане на судне «Фрам».

«Это отклонение вправо, — писал Нансен, — очевидно, вызвано отклоняющей силой вращения Земли. Странно, что очень мало авторов достаточно осознали факт, что поверхностное течение, созданное ветром, не может следовать в направлении ветра, но должно отклоняться вправо; вследствие этого они, говоря о действии ветра на поверхность моря, приходили к неверным результатам.

Еще меньше обращалось внимание на то обстоятельство, что поверхностное течение, созданное ветром, не может увлекать лежащую ниже воду в своем собственном направлении, но вода будет стремиться отклониться вправо и, таким образом, угол отклонения слоев воды будет увеличиваться с глубиной»<sup>1</sup>.

Уравнение установившегося ветрового течения Экман записал в виде равновесия по каждой из горизонтальных осей координат ( $x$ ,  $y$ ) двух сил: силы трения, вызванной ветром, и силы Кориолиса, вызванной вращением Земли. Направим ось  $x$  к востоку, а ось  $y$  — к северу. Предположим, что величина виртуальной вязкости, входящей в формулы силы трения (23) и (24), постоянна. Отнеся силы к единичному объему, получим

$$-A \frac{d^2 u_x}{dz^2} = u_y \sigma 2\omega \sin \varphi, \quad (25)$$

$$-A \frac{d^2 u_y}{dz^2} = -u_x \sigma 2\omega \sin \varphi. \quad (26)$$

Два написанных уравнения сводятся к одному с помощью комплексной переменной. При решении появляются две постоянные интегрирования, которые

---

<sup>1</sup> Цит. по кн.: Зубов Н. Н. Динамическая океанология. М., Гидрометеониздат, 1947, с. 286.

определяются через граничные условия задачи. Эти условия приняты в модели такими: на глубине  $z = \infty$  скорость течения обращается в нуль; на поверхности ( $z = 0$ ) выполняется ньютонов закон трения, т. е. касательное напряжение трения ветра о поверхность воды принимается пропорциональным сдвигу скорости. Если трение ветра направлено по оси  $x$ , то из формулы (22) получим

$$\tau_x = -A \left( \frac{du_x}{dz} \right)_{z=0}, \quad \tau_y = 0. \quad (27)$$

Читатель, возможно, обратил внимание на то, что в последних уравнениях мы перешли от частных производных к полным. Это означает лишь то, что в данной задаче искомые величины  $u_x$ ,  $u_y$  считаются функциями одной независимой переменной  $z$ . Таким образом, сама форма записи уравнений (25) — (27) показывает, что движение не изменяется в горизонтальном направлении и во времени. Значит, мы рассматриваем действие однородного и неизменного по скорости и направлению ветра над безграничным по площади океаном. То что мы вводим граничное условие при  $z = \infty$ , подразумевает безграничную глубину этого условного океана.

Аналитическое решение уравнений показывает, что скорость с глубиной уменьшается и ее вектор поворачивает все более вправо (северное полушарие). При этом линия, соединяющая концы векторов скорости, образует логарифмическую спираль. Уменьшение скорости не связано с переходом кинетической энергии движения в тепло. Оно целиком вызвано силой Кориолиса. На рис. 9а показана спираль ветрового течения, называемая спиралью Экмана.

Поскольку движение в модели Экмана не имеет ускорений, то сумма сил, действующих на любую частицу жидкости, равна нулю. Основываясь на этом положении, мы можем построить конечно-разностным методом собственный вариант спирали, исходя из других граничных условий. Такое построение позволит нам лучше понять физический смысл решения Экмана.

Итак, приступим к построению спирали. Предположим, что на глубине  $h$  происходит скачкообразное увеличение плотности воды. Это затрудняет турбулентное перемешивание по вертикали. Коэффициент вязкости уменьшается, приближаясь к молекулярному значению.

Допуская некоторую идеализацию условий, положим, что  $A=0$  при  $z=h$ .

На рис. 9 б цифрой 1 обозначен вектор скорости в самом нижнем слое течения на глубине  $h$ . Пусть объем воды, для которого мы хотим построить равновесие сил, расположен на правом конце вектора, там, где помечена стрелка.

Поскольку этот объем движется, то на него будет действовать сила Кориолиса, направленная перпенди-

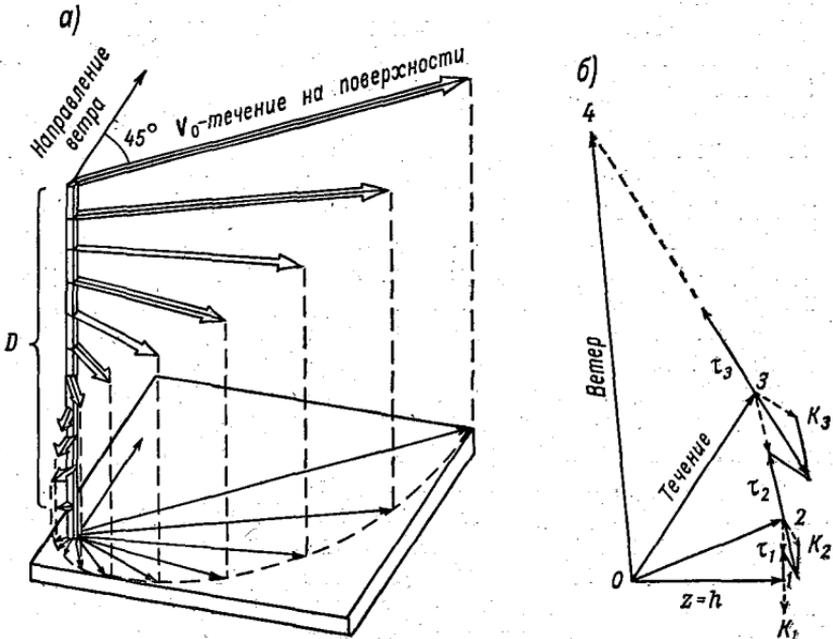


Рис. 9. Ветровые течения.

а — модель Экмана, 1902; б — течение, срезанное на глубине  $h$  скачком плотности.

кулярно скорости и пропорциональная ее величине и массе воды в объеме. Обозначим эту силу  $K_1$ .

Так как объем не имеет ускорений, сила  $K_1$  должна быть уравновешена противоположно направленной силой  $\tau_1$ . Эта сила, очевидно, вызвана трением о вышележащий слой воды. Согласно гипотезе Ньютона о внутреннем трении в жидкости: «сопротивление, происходя-

щее от недостатка скользкости жидкости при прочих одинаковых условиях, предполагается пропорциональным скорости, с которой частицы жидкости разъединяются друг от друга».<sup>1</sup>

Векторы скорости 1, 2, 3 показывают путь частиц воды, а вектор 4 — путь частицы воздуха за единицу времени, поэтому скорость разъединения частиц будет равна расстояниям 1—2, 2—3, 3—4. Пропорциональность этих расстояний величине трения зависит от величины вязкости  $A$ . Допустим, что в нашем случае величины отрезков 1—2, 2—3 относятся к величине трения как 2 : 1. Это трение внутри воды. Пусть сцепление между воздухом и водой имеет меньшую величину и, в соответствии с этим, длина отрезка 3—4 относится к величине касательного напряжения ветра как 3 : 1.

Основываясь на условно взятых пропорциях (мы могли бы их вычислить, зная величину  $A$ ), восстановим из точки 1 перпендикуляр 1—2. Его длина будет вдвое превышать длину вектора трения  $\tau_1$ . Соединив точку 2 и 0, получим вектор скорости второго снизу слоя воды.

Частица воды, расположенная в точке 2, также должна находиться в условии равновесия сил. Эти силы будут  $K_2$ ,  $\tau_1$ ,  $\tau_2$ . Нанеся их на рисунок, найдем конец следующего вектора (точка 3) и, продолжая построение, получим величину и направление скорости ветра (вектор 0—4), а также величину и направление вектора трения ветра о воду (касательное напряжение ветра  $\tau_3$ ).

Как бы ни строились спирали ветрового течения, они обладают тем общим свойством, что результирующий по вертикали перенос вод направлен под прямым углом вправо от вектора трения ветра о воду.<sup>2</sup> Воздействие силы Кориолиса приводит к тому, что чисто ветровые течения быстро затухают с глубиной. Их толщина имеет порядок 100 м.

**Геострофическая модель.** Глубина, до которой проникает ветровое течение, называется слоем трения, или экмановским слоем трения. Ниже этого слоя движение вод вызывается только градиентом давления. Если по-

<sup>1</sup> Цит. по кн.: Фабрикант Н. Я. Аэродинамика. Ч. 1. М.—Л., Гостехтеориздат, 1949, с. 437.

<sup>2</sup> Как видно из рисунка, направление вектора трения ветра о воду не вполне совпадает с направлением ветра.

ток не имеет ускорений, то в каждой его точке существует равновесие сил, которое можно записать для единичного объема пространства так:

$$\frac{\partial p}{\partial x} = u_y \sigma 2\omega \sin \varphi, \quad (28)$$

$$\frac{\partial p}{\partial y} = -u_x \sigma 2\omega \sin \varphi. \quad (29)$$

Согласно уравнениям (28) и (29), геострофический поток всегда направлен строго перпендикулярно к движущей силе (в северном полушарии вправо от нее, а в южном — влево). Например, если течение вызвано наклоном уровня, то частицы будут двигаться не по уклону, а перпендикулярно к нему. Название «геострофическая модель» показывает, что движение целиком контролируется поворотным ускорением Земли. Модель предполагает, что вода лишена инерции, если не считать силы Кориолиса, поэтому петли, показанные на рис. 2 а, в геострофическом течении не возникают. Безынерционность воды противоречит ее физической природе. Например, лишенная инерции вода, вылетая из брандсбойта, должна была бы падать вертикально вниз. Поэтому уравнения (28)—(29) принято называть геострофическим приближением. В связи с тем, что скорости морских течений изменяются от точки к точке очень постепенно, величина членов уравнения, выражающих силы инерции, невелика. Напомним вид этих членов:

$u_x \frac{\partial u_x}{\partial x} + u_y \frac{\partial u_x}{\partial y}$  — инерционные ускорения по оси  $x$ ,

$u_x \frac{\partial u_y}{\partial x} + u_y \frac{\partial u_y}{\partial y}$  — инерционные ускорения по оси  $y$ .

Измерения показывают, что в большинстве районов океана геострофическое приближение оправдано и оно служит основным способом расчета течений, вызванных градиентами давления, иными словами — градиентных течений.

Все течения океана можно разделить в соответствии с вызывающими их силами на ветровые, градиентные и приливные. В реальных условиях эти виды течений могут существовать в одной и той же точке одновременно.

## Две теоремы о течениях и их применение к Гольфстриму

В тексте этой главы мы пока редко встречаем отечественные имена, хотя нашими учеными созданы важные и принципиально новые модели крупномасштабных океанических процессов. Первыми из них были модели: взаимодействия океана, суши и атмосферы — В. В. Шулейкина; взаимодействия океана и льдов — Н. Н. Зубова; воздействия атмосферы на океан — В. Б. Штокмана. Мы обратимся к некоторым из последних отечественных моделей, но раньше расскажем о двух открытиях норвежского геофизика Х. Свердрупа, полученных самым простым математическим путем и оказавшим значительное влияние на дальнейшие пути океанологической мысли. Изложим эти открытия в виде двух теорем.

**Теорема 1.** Между изменением вертикальных размеров элементарных объемов воды геострофического течения и направлением движения этих объемов существует такая связь, что объемы, движущиеся к полюсу, растягиваются по вертикали, а движущиеся к экватору — сжимаются.

Важным следствием этой теоремы будет то, что меридиональные движения в океане многослойны. Действительно, если поток занимает всю толщу океана от поверхности до дна, то он не может двигаться к полюсу, так как, растягиваясь по вертикали, будет повышать уровень моря в направлении своего движения.

Наблюдения показывают, что и в Арктике, и в Антарктике смещения океанических вод в направлении экватор—полюс имеют многослойный характер. Слабое противотечение обнаружено также под Гольфстримом у берегов Америки и в других меридионально направленных океанических потоках.

Теорема доказывается аналитически. Направим ось  $x$  на восток и ось  $y$  на север. Перепишем уравнения геострофического движения:

$$\frac{1}{\sigma} \frac{\partial p}{\partial x} = u_y \Omega, \quad (30)$$

$$\frac{1}{\sigma} \frac{\partial p}{\partial y} = -u_x \Omega, \quad (31)$$

где  $\Omega = 2\omega \sin \varphi$  — планетарный вихрь.

Перекрестно продифференцируем уравнения:

$$\frac{1}{\sigma} \frac{\partial^2 p}{\partial x \partial y} = u_y \frac{\partial \Omega}{\partial y} + \Omega \frac{\partial u_y}{\partial y}, \quad (32)$$

$$\frac{1}{\sigma} \frac{\partial^2 p}{\partial x \partial y} = -\Omega \frac{\partial u_x}{\partial x}. \quad (33)$$

В правой части уравнения (33) стоит только один член, так как величина  $\Omega$  не изменяется по оси  $x$ . Вычтем уравнение (33) из уравнения (32):

$$\frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_y}{\partial y} = -\frac{u_y}{\Omega} \frac{\partial \Omega}{\partial y}. \quad (34)$$

Вспомним теперь уравнение неразрывности из раздела «Математические модели течений». Это уравнение имеет вид

$$\frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_y}{\partial y} = -\frac{\partial u_z}{\partial z}. \quad (35)$$

Приравнявая друг к другу (34) и (35), получим

$$u_y = \Omega \left( -\frac{\partial \Omega}{\partial y} \right)^{-1} \frac{\partial u_z}{\partial z} = M \frac{\partial u_z}{\partial z}, \quad (36)$$

где множитель  $M$  — величина безусловно положительная.

Таким образом, теорема доказана для случая, когда плотность воды  $\sigma$  не изменяется по осям  $x$  и  $y$ . Уравнение (36) выражает связь между двумя величинами: скоростью вдоль меридиана ( $u_y$ ) и вертикальным растяжением ( $\partial u_z / \partial z$ ) элементарного объема воды в потоке. Если правая часть уравнения положительна, то объем растягивается по вертикали, но тогда положительной оказывается и левая часть уравнения, а это означает, что меридиональная скорость течения направлена к полюсу. Если правая часть уравнения отрицательна, то объем сжимается по вертикали и его движение направлено к экватору. Эта связь широко используется для вычислений вертикального движения воды.

На рис. 10 показана схема трехслойного течения в океане в произвольно взятой точке. Попробуйте продолжить границы между потоками, учитывая, что движение стационарно. Вы столкнетесь с физическим

противоречием. Возможно, вы найдете ему объяснение или обнаружите противоречия в выводе теоремы. Вывод этот сделан формальным путем, но у него существует и физическое толкование.

При вращении Земли вокруг своей оси произвольный объем, вырезанный из тела планеты, в том числе из ее атмосферы или океана, совершает сложное движение. Из физики нам известно, что любое движение может быть представлено как результат совмещения двух элементарных движений: поступательного, при котором любая линия, мысленно проведенная внутри тела и связанная

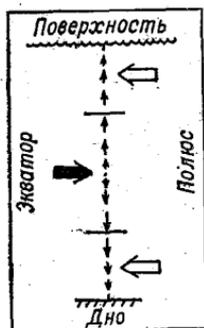


Рис. 10. Трех-  
слойное дви-  
жение в океане.

с его частицами, перемещается параллельно самой себе, и вращательного вокруг некоторой оси. Если спроектировать вектор вращательного движения на перпендикуляр к площадке, касательной к поверхности Земли, получится:  $\omega \sin \varphi = \frac{1}{2} \Omega$ . Это значение равно угловой скорости, с которой элементарный объем вращается вокруг оси, проходящей через него и направленной к центру Земли. При этом объем остается неподвижным относительно земных ориентиров, хотя и обладает реальным моментом количества движения. При изменении формы объема он стремится сохранить свой момент количества движения. Для этого объем,

растягиваемый по вертикали, должен увеличить скорость вращательного движения, а объем сплющиваемый — замедлить ее (сравните это с изменением скорости вращения конькобежца-фигуриста, то раскидывающего, то соединяющего свои руки).

Объем, изменивший скорость вращения, приходит в противоречие со скоростью вращения подстилающей поверхности Земли, и это вызывает его движение относительно земных ориентиров. Он может начать видимое земному наблюдателю вращение или сместиться вдоль меридиана на ту широту, где его новая скорость вращения будет соответствовать планетарному вихрю и таким образом станет невидимой для земного наблюдателя. Оказывается, что выполнить второе условие легче, хотя физические причины этого оставляют место для размышлений.

Океанологами они пока не разъяснены, и хочется призвать читателя подумать над этим.

Во всяком случае, если сжатие слоя есть не следствие, а причина его движения к экватору, то можно вслед за американским океанографом Р. Стюартом дать дополнительное объяснение схождению вод у экватора. На рис. 11 сплошными стрелками показано направление ветра над Северной Атлантикой, а пунктирными — ветровой перенос воды по модели Экмана (см. выше). Этот

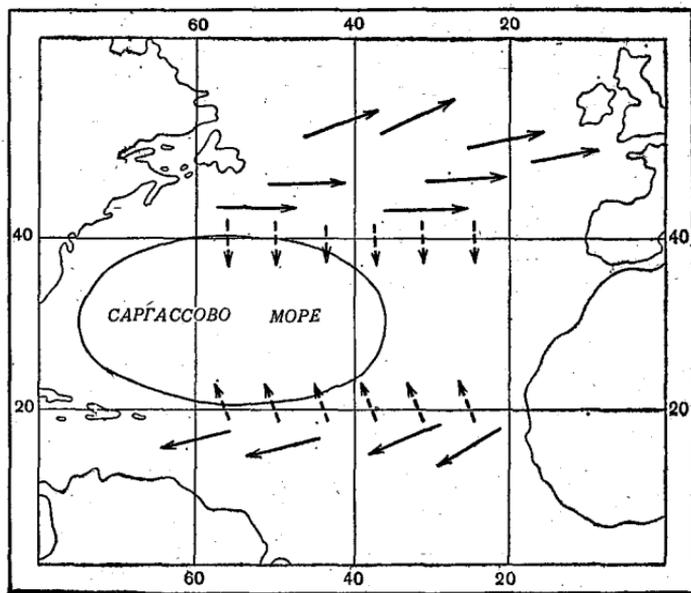


Рис. 11. Ветровой нагон вод в Саргассовом море (по Р. Стюарту, 1969).

Сплошные стрелки показывают ветер, пунктирные — осредненное по глубине ветровое течение.

перенос вызывает нагон поверхностных вод в Саргассовом море. Нагон ведет к увеличению давления на нижние слои воды, последние сжимаются по вертикали («расплющиваются»), и это вызывает их движение к экватору.

**Теорема 2.** Если в произвольно выбранной, но удаленной от берегов точке океана сложить от поверхности до дна скорости смещения по меридиану всех частиц

воды, то окажется, что результирующий перенос воды в направлении меридиана пропорционален пространственной неравномерности ветра, выраженной через вихрь касательного напряжения трения на морской поверхности.

Сделаем пояснение. На рис. 6 показано распределение касательного напряжения трения ветра в Тихом океане. Все векторы трения направлены по оси  $x$ , но они имеют разную длину и поэтому поле трения неравномерно. Вихрем (или ротором) называется характеристика поля в точке, равная в нашем простом примере тангенсу угла наклона линии, соединяющей концы векторов. Этот тангенс берется с обратным знаком и равен производной от  $\tau_x$  по  $y$ :

$$\text{rot}_z \tau_x = - \frac{\partial \tau_x}{\partial y}. \quad (37)$$

Если бы векторы трения имели проекции и на ось  $y$ , то выражение ротора было бы

$$\text{rot}_z \tau = \frac{\partial \tau_y}{\partial x} - \frac{\partial \tau_x}{\partial y}. \quad (38)$$

Теперь докажем теорему. Будем считать, что движение воды вызывается двумя силами: трением ветра и градиентом давления. Трением о дно и берега можно пренебречь. Тогда, если частицы не имеют ускорений (в том числе инерционных ускорений), движение на любой глубине должно отвечать следующим условиям равновесия сил, приложенных к единичному объему воды:

$$\frac{\partial}{\partial z} \left( A \frac{\partial u_x}{\partial z} \right) - \frac{\partial p}{\partial x} = - u_y \sigma \Omega, \quad (39)$$

$$\frac{\partial}{\partial z} \left( A \frac{\partial u_y}{\partial z} \right) - \frac{\partial p}{\partial y} = u_x \sigma \Omega. \quad (40)$$

двигущая сила трения

двигущая сила давления

отклоняющая сила Кориолиса

Ось  $x$  по-прежнему направлена на восток, ось  $y$  — на север, но ось  $z$  — вверх.

Введем граничные условия: на глубине  $z=0$  движе-

ние затухает и направление трения равно нулю ( $\tau_0=0$ ). На поверхности выполняется ньютонов закон трения:

$$\tau_x = \left( A \frac{\partial u_x}{\partial z} \right)_{z=H}, \quad \tau_y = \left( A \frac{\partial u_y}{\partial z} \right)_{z=H}. \quad (41)$$

Проинтегрируем уравнения от глубины  $z=0$  до поверхности  $z=H$ . Удобно направить ось  $z$  снизу вверх, чтобы избежать знаков минус в формулах (41). В результате интегрирования в уравнениях появятся полные (суммарные) потоки массы воды, которые мы обозначим через  $S$ :

$$S_x = \int_{z_0}^H \sigma u_x dz, \quad S_y = \int_{z_0}^H \sigma u_y dz.$$

Интегрирование градиентной силы нужно проводить с учетом того, что под знаком интеграла происходит дифференцирование. Например, в уравнении (39) мы получим

$$\int_{z_0}^H \frac{\partial p}{\partial x} dz = \frac{\partial}{\partial x} \int_{z_0}^H p dz - \frac{\partial H}{\partial x} p_H + \frac{\partial z_0}{\partial x} p_{z_0}.$$

Если давление на поверхности моря ( $p_H$ ) равно нулю и глубина нулевых скоростей или дно океана ( $z_0$ ) горизонтально, то два последних члена в правой части записанного равенства обратятся в нули. При этом, обозначив буквой  $P$  суммарное давление воды, получим

$$\int_{z_0}^H \frac{\partial p}{\partial x} dz = \frac{\partial}{\partial x} \int_{z_0}^H p dz = \frac{\partial P}{\partial x},$$

$$\int_{z_0}^H \frac{\partial p}{\partial y} dz = \frac{\partial}{\partial y} \int_{z_0}^H p dz = \frac{\partial P}{\partial y}.$$

Теперь можно переписать результаты интегрирования (39)—(40) по глубине моря следующим образом:

$$\tau_x - \frac{\partial P}{\partial x} = -\Omega S_y, \quad (42)$$

$$\tau_y - \frac{\partial P}{\partial y} = \Omega S_x, \quad (43)$$

где  $\tau_x, \tau_y$  — составляющие трения ветра по осям  $x$  и  $y$ .

Перекрестно продифференцируем уравнения (42) и (43):

$$\frac{\partial \tau_x}{\partial y} - \frac{\partial^2 P}{\partial x \partial y} = -\Omega \frac{\partial S_y}{\partial y} - S_y \frac{\partial \Omega}{\partial y}, \quad (44)$$

$$\frac{\partial \tau_y}{\partial x} - \frac{\partial^2 P}{\partial x \partial y} = \Omega \frac{\partial S_x}{\partial x}. \quad (45)$$

Эта операция позволяет теперь исключить из уравнений давление  $P$ . Для этого вычтем одно уравнение из другого:

$$\frac{\partial \tau_y}{\partial x} - \frac{\partial \tau_x}{\partial y} = \Omega \left( \frac{\partial S_x}{\partial x} + \frac{\partial S_y}{\partial y} \right) + S_y \frac{\partial \Omega}{\partial y}. \quad (46)$$

Если уровень моря  $z=H$  и горизонт нулевых скоростей  $z=z_0$  не изменяются во времени, то физическое условие неразрывности всего столба жидкости выразится так:

$$\frac{\partial S_x}{\partial x} + \frac{\partial S_y}{\partial y} = 0. \quad (47)$$

Учитывая выражения (47) и (38), перепишем полученный результат (46) в окончательном виде:

$$S_y = \left( -\frac{\partial \Omega}{\partial y} \right)^{-1} \operatorname{rot}_z \tau. \quad (48)$$

Таким образом, теорема доказана, но, подчеркнем, лишь для таких мест открытого океана, где можно пренебречь наклоном дна (или наклоном границы нулевых скоростей, когда таковая имеется).

Равенство (48) означает, что суммарный (или полный) установившийся поток по меридиану в открытом океане с горизонтальным дном зависит от неравномерности ветра и географической широты места, но совершенно не зависит от поля плотности океанических вод. Этот вывод с физической точки зрения представляется парадоксальным и может послужить новой темой для математических размышлений читателя.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Против использования соотношения (48) неоднократно высказывался известный океанолог-гидродинамик А. С. Саркисян, считающий полученный вывод неприемлемым. Однако математическая сторона доказательств никем не ставилась под сомнение.

Нужно иметь в виду, что уравнение Свердрупа (48) считается одним из самых простых и одновременно плодотворных выводов недавнего прошлого океанологии и используется в десятках серьезных работ. Правда, его физического смысла никто удовлетворительно не разъяснил, и здесь остается лишь провести параллель с известными словами Герца: «Кажется, что эти формулы умнее нас...»<sup>1</sup>

В уравнении (48) не учитывается трение о дно, однако, если оно по каким-либо причинам существенно, его можно учесть, записав:

$$S_y = \left( -\frac{\partial \Omega}{\partial y} \right)^{-1} (\text{rot}_z \tau_{\text{ветра}} - \text{rot}_z \tau_{\text{дна}}). \quad (49)$$

Введенный нами дополнительный ротор должен увеличить суммарный перенос по меридиану. Он входит в уравнение с иным знаком, чем ротор ветра, и имеет иное направление. Ротор ветра направлен по ходу течения, а ротор трения о дно — против хода течения. Таким образом, два ротора всегда имеют противоположные собственные знаки. При антициклоническом поле ветра ротор напряжения ветра о воду отрицателен. Противоположно направленный ротор трения о дно будет положительным, и разность двух роторов даст отрицательную величину суммарного переноса. Поскольку положительная ось  $y$  направлена к северу, отрицательный перенос соответствует переносу к экватору. В циклоническом движении ротор ветра положителен, а ротор трения о дно отрицателен, их разность даст положительную величину полного потока, т. е. суммарный перенос воды к полюсу.

Вторая теорема Свердрупа позволяет показать количественную связь между отдельными звеньями системы. Если мы возьмем среднее по какой-то параллели значение ротора ветра над Атлантикой и умножим его на ширину океана, то по формуле (48) или (49) найдем суммарный перенос вод к экватору. Но если Гольфстрим осуществляет компенсацию этого переноса, то он

---

<sup>1</sup> Г. Герц о максвелловых уравнениях электромагнитного поля. Цит. по кн.: Карцев Вл. Приключения великих уравнений. М., «Знание», 1971, с. 176.

должен иметь соответствующий расход воды. Этот расход был определен американским океанографом В. Манком для 35° с. ш. по формуле

$$\psi = -1,17 \left( \frac{\partial \Omega}{\partial y} \right)^{-1} \text{rot}_z \tau L, \quad (50)$$

где  $L$  — ширина Атлантического океана, равная на широте 35° с. 6500 км. В этом месте скорость поверхностных вод Гольфстрима равна 100—250 м/с, ширина потока 100 км и его расход 75 млн. м<sup>3</sup>/с.

Формула (50) дала меньший расход, чем измерения в Гольфстриме. Она не учитывает трение о дно (49), а также поступление в Гольфстрим вод из южного полушария. Это поступление связано с очертанием материков и может быть замечено читателем на любой карте течений Атлантического океана.

### Как работает механизм циркуляции

Рассмотрим теперь океан как управляемую систему.<sup>1</sup> Такая система состоит из взаимодействующих элементов или звеньев, имеющих определенные функции. На вход системы поступают внешние воздействия, которые управляют переходом системы в новые состояния. Последовательность этих состояний называется поведением, или движением, системы. Кибернетика изучает системы именно с точки зрения их поведения под влиянием управляющих воздействий. Поэтому кибернетику называют теорией управления. Если объект управления и устройство, подающее управляющие воздействия, рассматриваются совместно, они объединяются под названием системы автоматического управления. В этом случае управление осуществляется самой системой, например заложенной в ней программой.

Если рассматривать Мировой океан как объект управления, то в его систему управления надо включить Солнце, Луну, атмосферу, земную поверхность и человека. Солнце и особенно Луна вызывают приливы, воздействуя на океан по сложной и строгой программе.

<sup>1</sup> Имеется в виду система, управляемая не обязательно человеком, а внешними воздействиями в широком смысле, см. об этом ниже.

Сверх того, Солнце, тоже по программе, посылает к поверхности океана лучистую энергию, которая проходит сквозь атмосферу и трансформируется на поверхности океана в тепло. Атмосфера выступает как звено системы управления. На ее вход поступает тепловая энергия поверхности океана, которая преобразуется атмосферой в кинетическую энергию крупномасштабного движения и возвращается на выход в виде механического воздействия атмосферы на океан.

Суша воздействует на океан прежде всего через атмосферу, создавая у берегов океана контрасты атмосферной температуры и давления и вызывая суточную и сезонную смену направлений ветра. Развитие материковых оледенений изменяет уровень и термическое состояние океана, а речной сток влияет на химические и биологические процессы. Наконец, с суточным вращением Земли связана отклоняющая сила (Кориолиса).

Перечисленные связи в той или иной мере взаимны даже тогда, когда это не кажется очевидным. Так, не только вращение Земли влияет на течения в океане, но и наоборот, не только Луна влияет на приливы, но и приливы влияют на движение Луны, вызывая ее «вековое ускорение». Человечек уже при современном уровне техники может оказывать на океан воздействия, достаточные для изменения течений, температур и площади льдов.

Звенья системы сами можно рассматривать как малые системы. Для этого они обладают необходимыми признаками: входом звена, принимающим воздействия; оператором звена, преобразующим воздействия; выходом звена. В кибернетике разработана не зависящая от физической природы звеньев их классификация, которая определяет принципиальные характеристики звена — свойства инерции, устойчивость, способность создавать колебания в системе и тому подобное. Характеристики элементарных звеньев могут быть выражены формулами.

Для построения модели управления наметим следующий путь. Выберем одно из существенных внешних воздействий на океан — приток солнечной радиации к поверхности океана. Этот параметр «запрограммированным» образом меняется в пространстве по поверхности океана и во времени, а также подвержен случайным

колебаниям, связанным, например, с изменением облачности. Мы должны проследить, какими путями выбранное воздействие управляет поведением системы, на каких участках преобразуется в другие формы сообщений. Это позволит определить те элементы системы, которые существенны для ее функционирования, и выделить звенья элементов, которые обладают внутренним единством и выполняют определенную функциональную нагрузку. Каждое звено осуществляет преобразование поступающих в него сообщений, что может быть записано так:

$$y = Ax, \quad (51)$$

где  $x$  — сообщение, поступающее на вход звена;  $y$  — сообщение, поступающее на выход;  $A$  — оператор звена, объединяющий все математические и логические действия над  $x$ .

Зная звенья системы и связи между ними, можно составить функциональную схему системы. В схеме отдельные звенья обозначаются прямоугольниками, их взаимодействие — направленными стрелками, а форма передаваемых сообщений — индексами. Качественная схема — лишь первая ступень создания модели. Для того чтобы описать механизм управления системой и предсказать ее поведение, нужно найти формальные операторы звеньев. Эти операторы могут быть выражены в виде систем уравнений или матриц преобразований. Новая форма модели будет математической. Дальнейший шаг — ее анализ специальными методами, которыми располагает теория управления и которые позволяют судить о поведении системы по характеру и способу соединения ее звеньев.

Итак, проследим один из циклов поведения системы под воздействием солнечной радиации. Сначала примем во внимание лишь пространственное изменение поступающей радиации, полагая, что Солнце находится в плоскости земного экватора. В этом случае изменение потока радиации с широтой выразится формулой

$$R(\varphi) = R_0 \cos \varphi, \quad (52)$$

где  $R_0$  — поступление лучистой энергии на экваторе.

Поток лучистой энергии, проникающий в воду (которая занимает около семи десятых поверхности планеты),

поглощается водой и превращается в тепло по экспоненциальной зависимости от глубины. В первом сантиметре воды около 30% радиации, а в первом метре около 60% переходит в тепловое движение молекул. Таким образом, тепло генерируется (создается) из лучистой энергии у поверхности, откуда оно, с одной стороны, передается в атмосферу и путем турбулентного перемешивания воздуха переносится вверх, а, с другой стороны, путем турбулентного перемешивания воды уходит вниз — в морские глубины. Вертикальный перенос тепла в воде затруднен тем, что нагревание ее сверху вызывает, как правило, устойчивую стратификацию плотности, а перенос в воздухе облегчен тем, что нагревание снизу вызывает неустойчивую стратификацию в атмосфере. Нагревание приводит к расширению воздуха и пропорциональному удлинению столба атмосферы над океаном. Поскольку нагревание изменяется с географической широтой, то соответственно изменяется и высота атмосферы.

Мысленно вырезанные в атмосфере вертикальные столбы воздуха мы можем рассматривать как измерительные устройства на входе системы управления. Изменения их длины с некоторым опозданием и искажением регистрируют величину поступления в атмосферу тепла, вызванного инсоляцией подстилающей поверхности. Если изменение радиации вдоль меридиана обозначить через  $\Delta R$ , а изменение высоты столба атмосферы<sup>1</sup>  $\Delta H$ , то соответствие между выходом и входом звена можно записать с помощью оператора  $A_1$ :

$$\Delta H = A_1 \Delta R. \quad (53)$$

Изменение высоты атмосферы создает горизонтальный градиент давления, направленный вдоль меридиана. Пока столбы воздуха, изменяя свою высоту, сохраняют первоначальную массу, градиент давления возникает лишь на большой высоте от поверхности планеты.

Формула (52) справедлива, как уже было отмечено, при условии, что Солнце находится в плоскости экватора. Если приток радиации к разным широтам осреднить

---

<sup>1</sup> Здесь и дальше мы будем иметь в виду не всю воздушную оболочку планеты, а ее нижнюю часть, охватываемую вертикальной термической циркуляцией и содержащую основную массу воздуха.

за год, то получим связь, показанную на рис. 12 *а*. На рис. 12 *б* показана среднегодовая температура поверхности планеты и на рис. 12 *в* — среднегодовое положение изолинии атмосферного давления (изобара), равного 200 миллибаров (1 мбар — давление в 1000 дин на 1 см<sup>2</sup> поверхности). Эта изолиния проходит на высотах 11—12 км. Сходные с ней очертания имеют изобары

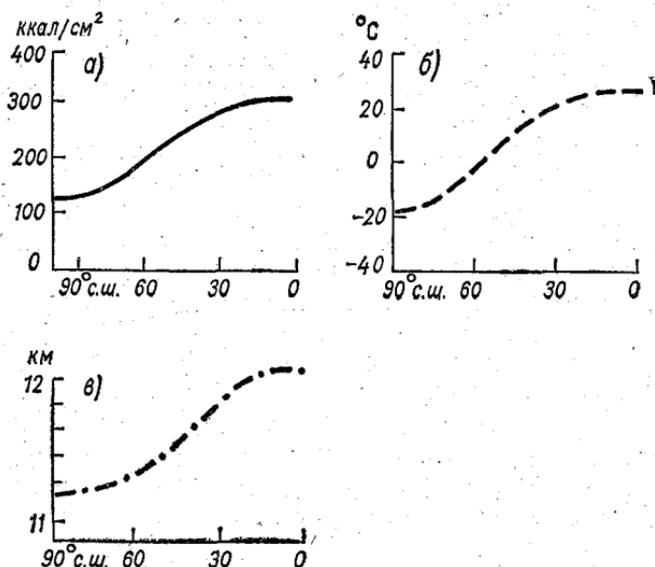


Рис. 12. Изменение с широтой радиации, температуры и давления.

*а* — годовое поступление солнечной радиации к верхней границе атмосферы на разных широтах; *б* — среднегодовые температуры поверхности Земли разных широт северного полушария; *в* — изобара 200 мбар — пример типичного для высот 3—15 км среднегодового наклона поверхности равного атмосферного давления.

300, 400, 500 мбаров. Все показанные на рисунке линии могут быть приблизительно описаны косинусоидой с аргументом  $2\varphi$ . Например, если обозначить среднее давление по меридиану на высоте  $h$  буквой  $\bar{p}$ , а давление на той же высоте  $h$  и широте  $\varphi$  знаком  $p(\varphi)$ , отклонение давления от среднего приблизительно выразится формулой

$$p(\varphi) - \bar{p} = B \cos 2\varphi, \quad (54)$$

где  $B$  — амплитуда изменений давления на высоте.

Такой ход давления должен вызвать перенос воздуха от экватора в сторону полюсов. Этот перенос действительно наблюдается и начинается у экватора на высотах 5 км и более. Перенос приводит к оттоку воздуха от экватора и уменьшает массу экваториальной атмосферы и ее приземное давление. Одновременно вблизи 30-х параллелей создается нагон воздуха и вызванный им динамический пояс высокого приземного давления атмосферы.

Необходимо рассчитать этот перенос, чтобы связать звенья системы управления. Однако вопрос, к которому мы решаемся приступить, труден и не имеет простого решения. Большинство авторов, занимавшихся им, исходили из гипотезы установившегося движения без ускорений. Его наиболее простой вариант — геострофическое равновесие (см. раздел «Математические модели течений») — не может дать никакого переноса по меридиану. Тогда к расчетам привлекается боковое перемещение атмосферных потоков, волны давления и другие сложные процессы.

Мы обратим внимание на другое обстоятельство. На рис. 2 а показана траектория частицы, рассчитанная методом Лагранжа, с учетом полного ускорения движения. Траектории радиозондов, выпускавшихся в зоне экватора, очень близко напоминают форму первой части траектории на рис. 2 а до той точки, где частица, достигнув вершины рисунка, начинает возвратное движение.<sup>1</sup> Такого возвратного движения шары-зонды не показывают. Надо полагать, что оно и невозможно. Действительно, представим, что пространство, занимавшееся частицей, вышедшей из начальной точки траектории (рис. 2 а), мгновенно заполнилось частицей, пришедшей не сбоку, а снизу, как и должно быть на экваторе. Эта новая частица устремилась вслед за первой, за ней движется следующая, и таким образом траектория одной частицы превращается в непрерывную струю воздуха. Но если условия вдоль экватора однородны, то соседние струи заполняют все пространство горизонтальной плоскости.

Пока эти соседствующие струи удаляются от экватора, они не будут мешать движению друг друга. Но,

---

<sup>1</sup> Карта траекторий радиозондов на высоте 12 км над Атлантикой показана на рис. 13.

как только одна из них начнет поворачивать обратно, она столкнется со встречным потоком и будет остановлена. Удовлетворившись таким объяснением, попытаемся рассчитать первую часть траектории (рис. 2 а), исходя из реальных условий хода давления вдоль меридиана и учитывая изменение силы Кориолиса с широтой.

Траектория получается из уравнений:

$$\frac{du_x}{dt} = u_y 2\omega \sin \varphi, \quad (55)$$

$$\frac{du_y}{dt} = -u_x 2\omega \sin \varphi - \frac{1}{\sigma} \frac{dp}{dy}. \quad (56)$$

Ось  $x$  направлена к востоку, ось  $y$  — к северу. Введем в расстояние  $y$  широту места:  $y = c\varphi$ , где  $c$  — длина одного градуса широты в метрах. Подставим также в уравнение (56) величину давления по формуле (54). После этого уравнения (55) и (56) целесообразно переписать так:

$$\frac{d^2x}{dt^2} = 2\omega \sin \varphi \frac{cd\varphi}{dt}, \quad (57)$$

$$\frac{cd^2\varphi}{dt^2} = -2\omega \sin \varphi \frac{dx}{dt} + \frac{2}{cs} B \sin 2\varphi. \quad (58)$$

Решение составленных уравнений не сложно, но для рассматриваемой задачи оно никем не проводилось.

Интегрируем (57) по времени  $t$

$$\frac{dx}{dt} = 2\omega c \int \sin \varphi \frac{d\varphi}{dt} dt + C_1 = -2\omega c \cos \varphi + C_1. \quad (59)$$

Если движение начинается на линии экватора, то можно записать условие:

$$\frac{dx}{dt} = 0 \text{ при } \varphi = 0^\circ. \quad (60)$$

Отсюда  $C_1 = 2\omega c$ , а составляющая скорости вдоль параллели

$$\frac{dx}{dt} = 2\omega c (1 - \cos \varphi). \quad (61)$$

Будем теперь искать составляющую скорости вдоль меридиана. Подставим формулу (61) в уравнение (58):

$$\frac{cd^2\varphi}{dt^2} = 4\omega^2 c \sin \varphi (\cos \varphi - 1) + \frac{2}{c\sigma} B \sin 2\varphi. \quad (62)$$

Порядок уравнения (62) понизим путем подстановки:

$$\frac{cd\varphi}{dt} = v, \quad \frac{cd^2\varphi}{dt^2} = \frac{dv}{dt} = \frac{dv}{cd\varphi} \frac{cd\varphi}{dt} = \frac{v dv}{cd\varphi}. \quad (63)$$

Тогда уравнение (62) получит вид

$$v dv = 4\omega^2 c^2 (\sin \varphi \cos \varphi d\varphi - \sin \varphi d\varphi) + \frac{2B}{\sigma} \sin 2\varphi d\varphi. \quad (64)$$

Интегрируя, найдем:

$$\frac{1}{2} v^2 = 2\omega^2 c^2 \sin^2 \varphi + 4\omega^2 c^2 \cos \varphi - \frac{B}{\sigma} \cos 2\varphi + C_2. \quad (65)$$

Учитывая, что на экваторе скорость равна нулю ( $v = 0$  при  $\varphi = 0^\circ$ ), определим  $C_2$ :

$$C_2 = -4\omega^2 c^2 + \frac{B}{\sigma}. \quad (66)$$

И наконец, получим расчетную формулу для нахождения скорости переноса по меридиану:

$$u_y = v = 2 \sqrt{\sin^2 \varphi \left( \frac{B}{\sigma} - \omega^2 c^2 \frac{1 - \cos \varphi}{1 + \cos \varphi} \right)}. \quad (67)$$

Из условия равенства этой скорости нулю найдем ту широту, на которой прекращается свободное движение частиц к полюсу (верхняя точка траектории на рис. 2 а). Обозначим эту широту через  $\varphi_1$ :

$$\frac{B}{\sigma} - \omega^2 c^2 \frac{1 - \cos \varphi_1}{1 + \cos \varphi_1} = 0, \quad \cos \varphi_1 = \frac{\omega^2 c^2 \sigma - B}{\omega^2 c^2 \sigma + B}. \quad (68)$$

Легко решить и обратную задачу — найти амплитуду давления  $B_1$ , необходимую для выхода частицы на заданную широту  $\varphi_1$ :

$$B_1 = \omega^2 c^2 \sigma \frac{1 - \cos \varphi_1}{1 + \cos \varphi_1}. \quad (69)$$

Приведем теперь пример вычисления. С январской карты давления на высоте 5 км снимем разность давления между экватором и полюсом  $2B=70$  мбаров. Подставим в формуле (68) значения  $B_1=35 \cdot 10^5 \text{ г}/(\text{м} \cdot \text{с}^2)$ ;  $c=111 \cdot 10^3 \text{ м}$ ;  $\omega=4,18 \cdot 10^{-3} \text{ град/с}$ ;  $\sigma=650 \text{ г/м}^3$ . Находим  $\varphi_1=18^\circ \text{ с. ш.}$  Примерно в этих широтах или несколько южнее начинается пояс высокого давления, достигающий максимума у  $30^\circ \text{ с. ш.}$  Чтобы получить центр пояса, нужно найти среднее  $\varphi_1$  по высоте атмосферы или внести эмпирическую поправку  $D$ .

Допустим, что это можно сделать так:

$$\cos \varphi_1^* = \frac{\omega^2 c^2 \sigma - B_1}{\omega^2 c^2 \sigma + B_1} + D. \quad (70)$$

Таким образом, наша система пришла в движение. Неравномерность поступления радиации на поверхность планеты привела к распределению температуры и давления, показанному на рис. 12. Это вызвало меридиональный перенос воздуха на высотах, называемый антипассатом. Траектории антипассата, наблюдаемые и рассчитанные по формулам (61) и (67), показаны на рис. 13.<sup>1</sup> Схождение потоков антипассата на широте  $\varphi_1$  создало динамическую зону высокого давления с максимумом на широте  $\varphi_1^*$ . Эта зона вызвала систему приземных ветров (рис. 11) и систему касательного напряжения ветра о воду (рис. 6). Ветер привел субтропические воды в антициклоническое движение с центром, смещенным, по теореме Праудмена, к западному берегу океана. Величина этого смещения может быть вычислена по полю ветра. Затем вся система течений, не прекращая антициклонического вращения, смещается под действием силы Кориолиса к экватору. Здесь происходит встреча вод северного и южного полушарий. Этим вызывается схождение вод, и их избыток, имеющий наибольшую

<sup>1</sup> При расчете использованы правила машинных вычислений, о которых рассказывается в главе III.

величину у западных берегов, создает компенсационные течения к полюсам. Наиболее изученным примером такого течения служит Гольфстрим. За последние десятилетия в Тихом океане (1951 г.), Атлантическом (1959 г.) и в Индийском (1960—1963 гг.) у экватора были сделаны неожиданные открытия. Оказалось, что на глубине, начиная с 50—100 и до 200—400 м под поверхностью, существуют узкие (от 2° с. ш. до 2° ю. ш.), но

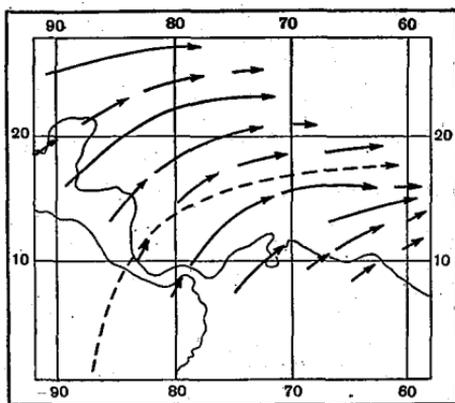


Рис. 13. Траектория частиц в антипассате.

Сплошные стрелки — наблюдения в декабре 1956 г. (по Колону, 1960), пунктирная линия — расчет по формулам (61) и (67).

сильные потоки, пересекающие океаны с запада на восток. В Атлантическом океане — это открытое советскими учеными течение Ломоносова. Оно имеет расход, сравнимый с Гольфстримом, — 37 млн. м<sup>3</sup>/с и скорость около 120 см/с. Скорость такого же течения в Тихом океане 150 см/с, расход около 40 млн. м<sup>3</sup>/с. В Индийском океане течение имеет сезонный характер, оно развивается зимой северного полушария, во время северо-восточного муссона, и исчезает летом с началом юго-западного муссона. В период максимального развития скорость течения в стрекне составляет 60 см/с. Мы вспомнили об этих потоках после того, как заметили, что максимальное схождение вод у экватора должно

наблюдаться в западной части океанов, откуда и движутся эти потоки.

К северу от антициклонической системы, смещающейся к экватору, расположена циклоническая область движения, имеющая тенденцию смещаться к полюсу. Между этими системами в направлении с запада на восток устремляется Гольфстрим.

У читателя может возникнуть вопрос, нельзя ли определить области низкого атмосферного давления таким же путем, как и зону высокого, т. е. исходя из изменения радиации с широтой. Оказывается, нельзя. С приближением к полюсу сила Кориолиса возрастает и устойчивые меридиональные движения становятся невозможными. Новые области имеют в значительной мере сезонный характер (особенно над материками) и называются не динамическими, а термическими областями давления.

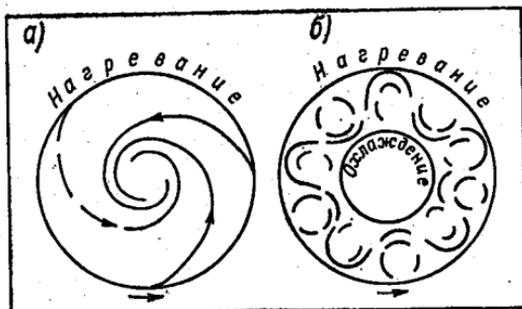
Очень наглядно изменение характера меридиональных движений с увеличением силы Кориолиса демонстрирует вращающаяся модель известного шведского геофизика К. Россби. В этой модели величина поворотной силы Кориолиса подбирается путем изменения скорости вращения. Малая скорость соответствует тропическим широтам, высокая скорость — умеренным и полярным. Воздух в модели заменен водой, которая окрашивается и подогревается со стороны внешней стенки, ближе расположенной к экватору. При малых скоростях движения на модели видны траектории окрашенных струй, которые соответствуют сделанным выше расчетам антипассата, если перевести цилиндрические координаты модели в декартовы. При больших скоростях вращения упорядоченный характер переноса к полюсу исчезает — развиваются крупномасштабные горизонтальные вихри или волны, очень похожие на картины движения в умеренных широтах на высотных синоптических картах. Два вида траектории частиц в модели показаны на рис. 14 а, б.

Итак, области аномального давления приполярных и умеренных широт имеют непосредственно термическое происхождение, связанное с температурой именно данной области. Над материками эти области в течение года меняются. Зимой здесь высокое давление (антициклон), летом — низкое (циклон). Однако над океаном

пониженное давление может сохраняться круглый год. Мы видели это на примере взаимодействия Гольфстрима с исландским минимумом давления. Поддерживая этот минимум, Гольфстрим облегчает свое проникновение в Арктику.

Здесь мы подходим, возможно, к самому важному звену системы — полярным льдам океана. Значение этого звена связано с его неустойчивостью. Расчеты показывают, что нужно сравнительно небольшое увеличение

Рис. 14. Токи нагреваемой с периферии воды на вращающейся модели (рисунок по фотографии из статьи К. Г. Россби, 1959). а — малая скорость вращения (тропики); б — большая скорость вращения и охлаждение модели в центре (умеренные широты).



притока тепла к полюсу, чтобы за несколько лет арктические льды растаяли. По расчетам крупнейшего советского климатолога М. И. Будыко<sup>1</sup> при положительной аномалии летних температур воздуха, равной  $4^\circ$ , «лед толщиной 4 м в средних климатических условиях Центральной Арктики полностью исчезает через четыре года». После этого ледяной покров будет иметь сезонный характер, появляясь только во время полярной ночи. Будыко далее пишет: «Ясно, однако, что полученная здесь оценка аномалии температуры, при которой многолетние арктические льды разрушаются, является максимальной. Так как при сокращении площади льдов на свободной поверхности океана значительно увеличивается количество поглощенной радиации, то после уничтожения части льдов может произойти дальнейшее увеличение температуры, которое в свою очередь усилит таяние льдов».<sup>2</sup>

Уничтожение постоянного ледяного покрова Арктики

<sup>1</sup> Будыко М. И. Полярные льды и климат. Л., Гидрометеоздат, 1969, с. 20.

<sup>2</sup> Там же, с. 20.

нарушило бы равновесие всей системы океан — атмосфера. Картину переходного процесса к новому равновесию пытались рассчитать многие авторы. Наиболее известны широкому читателю работы советского инженера и географа П. М. Борисова и прежде всего его книга «Может ли человек изменить климат» (М., «Наука», 1970. 192 с.). Борисов считает возможным уничтожить льды путем создания «прямотока» (по терминологии Борисова) Гольфстрима из Атлантики в Тихий океан через Северный Ледовитый океан и Берингов пролив. В этом проливе, имеющем глубину всего около 45 м и ширину около 80 км, Борисов предлагает создать плотину с перекачкой воды турбинами из Арктики в Тихий океан. Инженерный проект плотины опубликован и подсчитан размер финансирования строительства — 24 млрд. рублей.

Этот проект широко обсуждался учеными, в том числе и на специальной конференции, но одобрения не получил. Мы еще слишком плохо знаем количественные законы взаимодействия звеньев системы океан — атмосфера, чтобы решиться на умышленное нарушение ее равновесия. Мы далеко не уверены и в том, действительно ли плотина создаст «прямоток» Гольфстрима и улучшит климат.

Однако можно наблюдать неумышленное вмешательство человека в равновесие системы. В первом разделе мы говорили о роли испарения для стабилизации температуры воды. На испарение расходуется около 51% энергии, поглощаемой океаном с радиацией Солнца. Но испарение может быть замедлено, а местами и прекращено, если поверхность воды окажется покрыта мономолекулярными пленками. Такие пленки возникают при загрязнении воды нефтью в результате катастроф, очистки нефтяных емкостей в океане и главное добычи нефти с морского дна, которая быстро возрастает у берегов океана.

Подводя итоги проведенному обсуждению о взаимодействии элементов и звеньев системы управления, выделим следующие характеристики:

- 1) поступление солнечной энергии на поверхность океана  $R$ ;
- 2) меридиональные градиенты температуры поверхности океана  $\text{grad } \theta$ ;

- 3) изменение высоты столбов атмосферы  $\Delta H$ ;
- 4) градиенты давления в верхней атмосфере  $\text{grad } p$ ;
- 5) меридиональный перенос воздуха антипассатами  $W(A)$ ;
- 6) пояс высокого давления в субтропиках  $\Delta P(\varphi_1)$ ;
- 7) ротор напряжения ветра в субтропиках  $\text{rot}_z \tau$ ;
- 8) смещение циркуляции к экватору —  $\text{rot}_z \tau L$ ;
- 9) компенсационное течение западных берегов  $\psi(\Gamma)$ ;
- 10) температурная аномалия на границе полярной области  $\Delta \vartheta(\varphi_2)$ ;

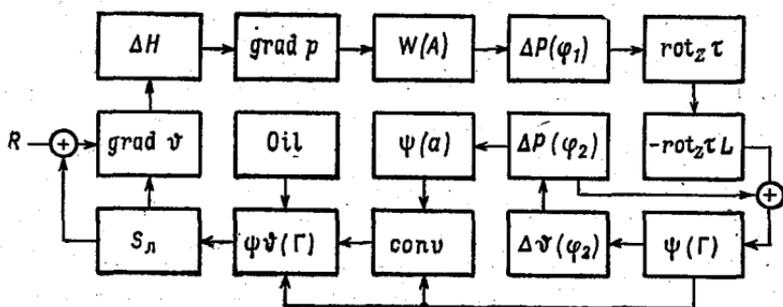


Рис. 15. Функциональная схема управления океанической циркуляцией.

На входе солнечная радиация создает градиент температуры на поверхности океана — это дает начало функционированию системы.

- 11) сезонная область пониженного давления над океаном  $\Delta P(\varphi_2)$ ;
- 12) вынос арктических вод  $\psi(a)$ ;
- 13) встреча полярных вод с Гольфстримом  $\text{сопу}$ ;
- 14) перенос тепла Гольфстримом в полярные широты  $\psi\vartheta(\Gamma)$ ;
- 15) загрязнение вод океана нефтью  $\text{Oil}$ ;
- 16) площадь полярных льдов  $S_{\text{л}}$ .

Взаимные связи между этими переменными показаны на схеме (рис. 15). Схемы такого типа называются функциональными схемами системы, а их создание составляет первую задачу системного анализа. Частично связи на схеме (рис. 15) уже теперь могут быть выражены в количественной форме, как мы видели на нескольких примерах. Но в основном их нужно еще определить. Приведенная схема, конечно, очень далека от

завершенности, но может быть основой для дальнейших рассуждений.

Мы познакомились с частью работ, относящихся к проблеме конструирования глобальной океанской системы. Они находятся в русле традиционного исследовательского подхода, направленного на объяснение связи между явлениями. Но всегда ли необходимо иметь объяснение такой связи, знать ее причины и механизм? При сложном характере системы такое требование может стать препятствием для моделирования и прогнозов. Альтернативой к объяснительному подходу служит принцип «черного ящика», когда причинный механизм связи между явлениями или не исследуется совсем, или отходит на дальний план и рисуется в виде предположений, не влияющих на расчеты. В то же время сама связь изучается и выражается количественной зависимостью, например уравнениями, графиками, таблицами. Именно в таком плане интересна работа Г. К. Ижевского «Системная основа прогнозирования океанологических условий и воспроизводства промысловых рыб» (М., изд. ВНИРО, 1964, 166 с). Ижевский делил Мировой океан на несколько систем, процессы в которых находятся в противофазе: если в одной системе увеличивается запас тепла, влаги и пищевых ресурсов, то в соседних с нею в это же время происходит их уменьшение. В Северной Атлантике Ижевский выделял три системы, исследование систем велось методом корреляции, и были сделаны долгосрочные прогнозы продуктивности.

Приведенные примеры показывают, что решение глобальных задач комплексного характера становится темой океанологических расчетов.

### Температурная инерция океана и ледниковые эпохи

Солнце почти одинаково нагревает оба полушария. Приход его радиации зависит от географической широты. Но одинаковый приток тепла дает различные результаты. В северном полушарии вблизи параллели 55° расположены плодородные берега Англии, Дании, леса Подмосковья, а на той же широте южного полушария, на меридиане Парижа, лежит остров Буве, погребенный под толщей вечного льда.

На два полушария можно смотреть как на две природные модели планеты и, сравнивая их, оценивать значение особенностей географической оболочки для теплового равновесия земной поверхности. Но сравнительное описание дает лишь качественные ответы. Например, на карте мира видно, что остров Буве лежит в центре океанического кольца, огибающего планету в широтном направлении, и что к югу от этого кольца расположен обширный ледяной материк.

Поиски количественных связей, а также ответов на вопрос о причинах, вызывающих ту или иную обстановку (например, Антарктида — это результат или причина холодного климата), требуют создания математических моделей. Такие модели схематизируют изучаемые объекты, выделяя в них главные связи и зависимости. Рассмотрим это сначала на самой простой модели.

Предположим, что тепло поступает к земной поверхности только за счет радиации Солнца, а уходит от поверхности только за счет излучения в космическое пространство. Обозначим приход тепла  $Q$ , а расход —  $I$ . Если  $Q > I$ , то поверхность Земли нагревается, если  $Q < I$  — охлаждается. Будем искать температуру равновесия, когда  $Q = I$ . Из учебников физики нам известен закон теплового излучения:

$$i = s\chi\theta^4, \quad (71)$$

где  $i$  — величина излучения с единицы поверхности;  $\theta$  — абсолютная температура поверхности (температура в градусах Кельвина);  $\chi$  — коэффициент, постоянный для всех поверхностей и температур (постоянная Стефана — Больцмана);  $s$  — коэффициент, характеризующий индивидуальные особенности поверхности.

Умножив выражение (71) на площадь Земли, найдем величину ее теплового излучения:

$$I = s\chi\theta^4 \cdot 4\pi R^2, \quad (72)$$

где  $R$  — радиус Земли.

Суммарное поглощение солнечной радиации поверхностью планеты запишем формулой

$$Q = q(1 - \alpha)\pi R^2, \quad (73)$$

где  $q$  — радиация, падающая на единичную площадку, расположенную перпендикулярно к лучам Солнца;

$\alpha$  — та часть радиации  $q$ , которая отражается планетой в космическое пространство;  $\pi R^2$  — площадь сечения Земли.

Приравняем выражения (72) и (73) и вынесем температуру в левую часть формулы:

$$\theta = \sqrt[4]{\frac{q}{4s\chi}} \sqrt[4]{(1-\alpha)}. \quad (74)$$

Как известно из наблюдений, средняя температура земной поверхности в современную эпоху примерно  $15^\circ\text{C}$ , или  $288\text{K}$ . Среднее значение коэффициента  $\alpha$  0,32. Из этих данных найдем значение первого корня в правой части формулы (74):

$$\sqrt[4]{\frac{q}{4s\chi}} = 317,1 \text{ K}. \quad (75)$$

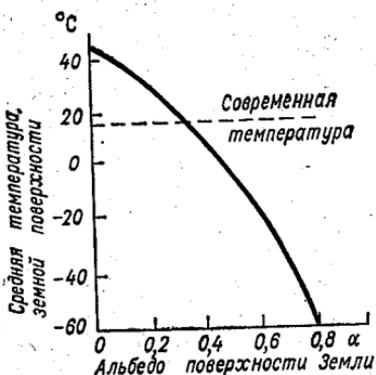


Рис. 16. Зависимость средней температуры поверхности Земли от ее альбедо.

Предположим, что эта величина остается постоянной. Тогда можно построить количественную связь между температурой поверхности и коэффициентом  $\alpha$ . Этот коэффициент — альбедо поверхности (albedo — белизна). Он имеет максимальное значение для снежно-ледяной поверхности ( $\alpha \cong 0,8$ ) и минимальное для водной ( $\alpha \cong 0,1$ ). На рис. 16

мы построили график, показывающий связь между средней температурой поверхности Земли ( $^\circ\text{C}$ ) и ее альбедо. График вычислен по формуле

$$\theta = 317,1 \sqrt[4]{(1-\alpha)} - 273. \quad (76)$$

Из рисунка видно, что планеты, получающие одинаковое тепло от своих солнц, могут иметь большие различия температур в зависимости от характера своей поверхности. В нашем примере это различие меняется в диапазоне почти  $100^\circ\text{C}$ . Конечно, построенная модель (ее идея заимствована из работ М. И. Будыко) очень приближительна. Она грубо учитывает влияние атмосфе-

ры на тепловое излучение (с помощью постоянного коэффициента  $s$ ) и не разделяет суммарное отражение радиации в космическое пространство (коэффициент  $\alpha$ ) на отражение от облаков и от земной поверхности.

По такому же принципу, как была построена модель, т. е. из условия теплового равновесия, можно рассчитать, как изменится температура какого-то района Земли при появлении или исчезновении на нем ледяного покрова. Эти расчеты должны, однако, учитывать новое обстоятельство — перенос тепла воздушными и морскими течениями. Особое значение имеет при этом перенос меридионального направления. Остров Буве расположен в центре огромного течения, расход воды в котором в 7 раз больше, чем у Гольфстрима. Однако течение Южного океана огибает Землю вдоль параллелей, и это ограничивает его влияние на климат. Но верхние слои воды под действием ветра все-таки медленно смещаются к северу, неся с собой холод и льды от антарктического побережья.

Приведем несколько цифр, показывающих роль океанических течений в формировании климата. Объемная теплоемкость воды примерно в 3200 раз больше, чем воздуха. Это значит, что 1 м<sup>3</sup> воды, охлаждаясь на 1°, может нагреть на 1° столб воздуха сечением 1 м<sup>2</sup> и высотой более 3 км. Но 50% всего воздуха атмосферы сосредоточено в ее нижнем пятикилометровом слое. Поэтому теплоемкость всей земной атмосферы равна теплоемкости трех верхних метров океана. Еще более внушительны величины тепла, выделяющегося при замерзании и испарении воды. При замерзании одного объема воды от нее отнимается тепло, достаточное для нагревания на 1° 250 000 объемов воздуха, а при испарении — 1 800 000 объемов.

Перечисленные свойства воды приводят к тому, что океан реагирует на изменения солнечной радиации, в том числе на ее годовой ход, совсем иначе, чем твердая суша. Поглощая или отдавая большое количество тепловой энергии, он мало изменяет свою температуру.

Физиологическое ощущение холода различно при соприкосновении со сталью и деревом одинаково низкой температуры. Причина заключается в том, что на месте соприкосновения двух тел (например, палец—дерево)

мгновенно устанавливается температура  $\vartheta_m$ , которая делит разность между начальными температурами поверхностей ( $\vartheta_{\Pi} - \vartheta_{\text{д}}$ ) на два отрезка, отношение между которыми обратно пропорционально коэффициентам теплоусвоения тел:

$$\frac{\vartheta_{\Pi} - \vartheta_m}{\vartheta_m - \vartheta_{\text{д}}} = \frac{b_{\text{д}}}{b_{\Pi}}. \quad (77)$$

Коэффициенты теплоусвоения определяются формулой

$$b = \sqrt{c\sigma\lambda} = c\sigma\sqrt{K}, \quad (78)$$

где  $c$  — удельная теплоемкость вещества;  $\sigma$  — его плотность;  $\lambda$  — коэффициент теплопроводности;  $K$  — коэффициент температуропроводности.

Коэффициент теплоусвоения, как видно из отношения (77), определяет способность тела противиться изменениям температуры на его поверхности. По формуле (78) можно подсчитать, что коэффициенты теплоусвоения меди, железа, песчаника и дерева относятся как 114:47:6:1. Труднее получить коэффициенты теплоусвоения для воды и воздуха. Опыт нам подсказывает, что ощущение человеком температуры этих сред зависит от их подвижности. Происходит так потому, что вместо молекулярной температуропроводности в движущейся среде нужно учитывать турбулентную температуропроводность, связанную с вихревым перемешиванием. Эта температуропроводность в десятки тысяч раз больше молекулярной. Так, коэффициент молекулярной температуропроводности воды  $1,4 \cdot 10^{-3}$  см<sup>2</sup>/с, а турбулентной — меняется в зависимости от скорости течений в пределах от 1 до 100 см<sup>2</sup>/с. При  $K=1; 10; 100$  коэффициент теплоусвоения у воды будет больше, чем у песчаника, соответственно в 22; 70 и 220 раз.

До сих пор мы говорили о тепловом взаимодействии двух тел. Но одно из тел мы можем заменить эквивалентным в каждый момент времени потоком тепла, например потоком лучистой энергии. Реакция океана, суши и атмосферы на колебания этого потока и стала предметом исследования Такахаши.<sup>1</sup> Его модель включа-

<sup>1</sup> Takahashi K. Climatic change calculated by a simple heat transfer model at the Earth surface. — «Journ. Meteorol. Soc. Japan», 1965, ser. 2, vol. 43, N 4, p. 188—195.

ет два уравнения. Первое выражает изменения тепло-содержания столба атмосферы, имеющего единичное сечение:

$$C \frac{\partial \vartheta}{\partial t} = \kappa (\vartheta_s - \vartheta), \quad (79)$$

где  $C$  — теплоемкость столба;  $\vartheta$  — температура воздуха;  $\vartheta_s$  — температура поверхности;  $t$  — время;  $\kappa$  — коэффициент, учитывающий все виды теплообмена воздуха с подстилающей поверхностью.

Согласно уравнению (79), атмосфера прозрачна для солнечных лучей и нагревается только снизу от поверхности планеты, что почти соответствует действительности. Изменение температуры воды или грунта определяется уравнением теплопроводности:

$$\frac{\partial \vartheta_s}{\partial t} = K \frac{\partial^2 \vartheta}{\partial z^2}. \quad (80)$$

Так же как и рассмотренные раньше уравнения движения, уравнение (80) выражает баланс некоторой субстанции. Баланс составлен для неподвижного кубика, вырезанного в пространстве воды или грунта. Левая часть уравнения обозначает скорость изменения тепловой энергии внутри кубика, деленной на теплоемкость и плотность вещества (эти величины сокращены в левой и правой части). Правая часть — разность между потоками тепла, вызванными теплопроводностью среды и пересекающими нижнюю и верхнюю грани кубика. Вспомним, что похожим образом мы выражали результирующее воздействие на две грани кубика силы трения.

К двум уравнениям (79) и (80) добавляется граничное условие, показывающее, чему равен тепловой поток  $\Phi$  через поверхность моря или грунта:

$$\Phi = Q - I - \kappa (\vartheta_s - \vartheta), \quad (81)$$

где  $Q$  — солнечная радиация, поглощаемая поверхностью;  $I$  — тепловое излучение поверхности, уходящее в космическое пространство.

Такахаси исследовал поведение модели при изменениях поглощенной радиации, заданных формулой

$$\Delta Q = 0,01 Q_0 \cos \omega t, \quad (82)$$

где  $Q_0$  — среднегодовое значение радиации;  $\omega$  — частота

колебаний от очень быстрых, соответствующих суткам, до очень медленных, соответствующих тысячелетиям.

В результате расчетов была получена связь между частотой колебаний радиации и амплитудой колебаний температуры океана. Эта связь имеет вид, близкий к кривой на рис. 17. Из рисунка следует, что чем меньше частота колебаний (т. е. длиннее их период), тем больше изменение температуры. При нулевой частоте, иными словами, при увеличении радиации на постоянную ве-

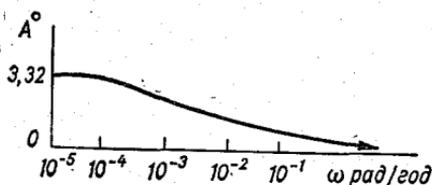


Рис. 17. Связь между частотой колебаний радиации и амплитудой колебаний температуры океана (по К. Такахаси, 1965).

личину  $0,01 Q_0$ , температура поверхности океана изменится на  $3,3^\circ \text{C}$ , а при частоте, соответствующей годовому периоду колебаний, — на  $0,2^\circ \text{C}$ .

Отсюда находим дополнительное объяснение суровости природы о. Буве — окружающий его океан не успевает за летнее время нагреваться настолько, чтобы растаял лед, покрывающий остров. Как подтверждают наблюдения, средняя величина сезонных колебаний температуры на поверхности океана — около  $2^\circ$ , а на поверхности суши —  $20^\circ \text{C}$ .

Советский геофизик С. Я. Сергин подошел к результатам Такахаси с позиций теории управления. Он обратил внимание на то, что кривая на рис. 17 приблизительно соответствует уравнению

$$A(\omega) = \frac{A(0)}{\sqrt{\omega^2 T^2 + 1}}, \quad (83)$$

где  $A(\omega)$  — ослабление амплитуды колебаний на выходе звена (температура) при увеличении частоты колебаний  $\omega$  на входе (радиация);  $A(0)$  — соотношение между амплитудами колебаний на выходе и входе при  $\omega = 0$ ;  $T$  — постоянная времени, характеризующая инерционные свойства звена.

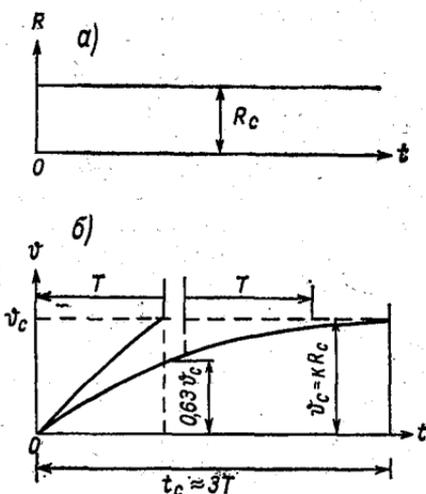
Формула (83) относится к инерционному звену первого порядка. Переходной процесс такого звена показан

на рис. 18. Из рисунка видно, что длительность переходного процесса примерно равна утроенному значению постоянной времени. Сама же постоянная определяется как величина проекции касательной на линию установившегося значения новой температуры  $\vartheta_c$ .

Постоянную времени Мирового океана С. Я. Сергин получил по данным графика рис. 17 и формулы (83). Постоянная оказалась равной 2 тысячам лет с возмож-

Рис. 18. Переходный процесс инерционного звена первого порядка.

*a* — изменение во времени радиации  $R$ ; *б* — изменение во времени температуры  $\vartheta$ .  $\vartheta_c$  — установившееся новое значение температуры (входная характеристика звена);  $R_c$  — установившееся новое значение радиации (входная характеристика звена);  $t_c$  — продолжительность переходного процесса;  $T$  — постоянная времени звена.



ным отклонением до 4 тысяч лет. Таким образом, продолжительность переходного процесса изменения температуры океана имеет порядок 10 тысяч лет. Эта продолжительность не зависит от величины, на которую изменяется поступление радиации.

В один из периодов геологической истории океана значительная часть его воды перешла путем испарения и осадков в континентальные ледяные щиты. Современные ледяные щиты Антарктиды и Гренландии значительно меньше тех, которые были при максимальном развитии оледенений, но и они хранят такое количество льда, которое при таянии способно повысить уровень Мирового океана на 65 м и затопить приморские, наиболее населенные районы суши. Если мы вспомним затраты тепла на таяние льдов, то поймем, что процесс разрушения щитов очень длителен. Например, на него не хватило бы запасов тепла всего современного

океана. Ледяные щиты аккумулируют не только влагу, но и огромные запасы холода, а потому их надо считать вторым инерционным звеном в системе теплового взаимодействия океана, суши и атмосферы.

В 1955 г. американским геологом В. Стоксом была высказана гипотеза, что взаимодействие двух инерционных звеньев — Мирового океана и ледяных щитов — должно иметь очень важные климатические следствия. Если система с такими звеньями будет выведена из состояния температурного равновесия с поступающим теплом Солнца, то она войдет в режим долгопериодных температурных колебаний, когда холодные ледниковые эпохи будут чередоваться с теплыми межледниковыми.

Физические причины таких колебаний были описаны Стоксом в статье «Новый взгляд на ледниковый период».<sup>1</sup> Гипотеза Стокса, хотя и в качественной форме, объясняла то удивительное обстоятельство, что с начала ледникового, или четвертичного, периода Земли (500 тысяч лет назад) оледенения проходили волнами, чередовавшимися с теплыми межледниковыми временами. Во время последнего межледниковья (100—70 тысяч лет назад) на Восточно-Европейской равнине и средней Волге произрастали вечнозеленые деревья, включая тисс, а дуб выходил за Полярный круг. Максимум же последней ледниковой волны наступил 20 тысяч лет назад. Это было время мамонтов, когда среднеиюльские температуры в Европе упали ниже 6° С. До начала четвертичного периода средняя температура океана была значительно выше современной (по Стоксу — на 10°). Следствием высокой температуры было большое испарение, влагосодержание воздуха и осадки. Какой-то первоначальный толчок, например повышение суши в районе полюса, нарушил равновесие влагооборота. Осадки, выпадающие на повышенную поверхность суши, не таяли, а создавали ледники. Альbedo поверхности повышалось и вызывало охлаждение. Падение температуры вело к уменьшению влажности и осадков. Таким образом, между испарением и ростом ледников существовала отрицательная обратная связь, которая могла бы ограничить рост ледни-

---

<sup>1</sup> Stokes W. L. Another look at the ice age. — «Science», 1955, vol 122, N 3174, p. 815—821.

ков. Однако огромная температурная инерция океана эффективно препятствовала процессу охлаждения. Это достигалось перемешиванием охлаждавшихся поверхностных вод с глубинными, в то время теплыми водами.

Таким образом, оледенение смогло развиваться в полную силу и ледники вышли на берега океана. В дальнейшем, в связи с понижением температуры и влажности, скорость роста щитов за счет осадков стала уступать скорости их разрушения за счет таяния и откола айсбергов. Ледники начали сокращаться, и создались условия для возвращения океана к нормальной для него высокой температуре. Если бы не температурная инерция океана, то произошло бы быстрое нагревание его вод, а возросшая при этом влажность и осадки остановили бы разрушение ледников. Но однажды охладившийся океан нуждается в тысячелетиях накопления тепла, чтобы вернуться к прежней температуре. К этому времени ледяные щиты успевают частично или полностью разрушиться. Наступает теплый межледниковый период, за которым следует очередная волна оледенения.

Те же процессы взаимодействия были рассмотрены в 1966 г. С. Я. Сергиным, но в более полной, а главное, количественной форме.<sup>1</sup> Обратимся к схеме взаимодействия, предложенной Сергиным (рис. 19). По этой схеме земная поверхность и атмосфера образуют систему, управляемую солнечной энергией.

Внешнее воздействие на систему — радиация Солнца. Она проходит сквозь атмосферу и трансформируется в тепло на поверхности планеты. Результатом этого воздействия будет изменение средней температуры поверхности и изменение температурных градиентов. Последнее обстоятельство не учитывалось Стоксом, однако, по расчетам Сергина, оно имеет принципиальное значение для поведения системы и может переводить ее из области затухающих колебаний в область автоколебаний.

Чем вызван этот градиент и какие он имеет последствия? Изменение температуры происходит главным

---

<sup>1</sup> Сергин С. Я. Динамические связи в системе «земная поверхность — атмосфера» как причина изменений климата. — «Изв. АН СССР. Сер. геогр.», 1966, № 6, с. 3—13.

образом в направлении меридианов — от экватора к полюсам. Оказывается, что величина этого изменения существенно зависит от площади, занятой в полярных районах материковыми и морскими льдами. Чем больше эта площадь, тем ниже температура воздуха в полярных районах. Расчеты показывают, например, что льды Арктики понижают среднегодовую температуру на  $15^{\circ}\text{C}$ , а ледяной щит Гренландии вызывает отрицательную температурную аномалию в  $16^{\circ}\text{C}$ . Температу-

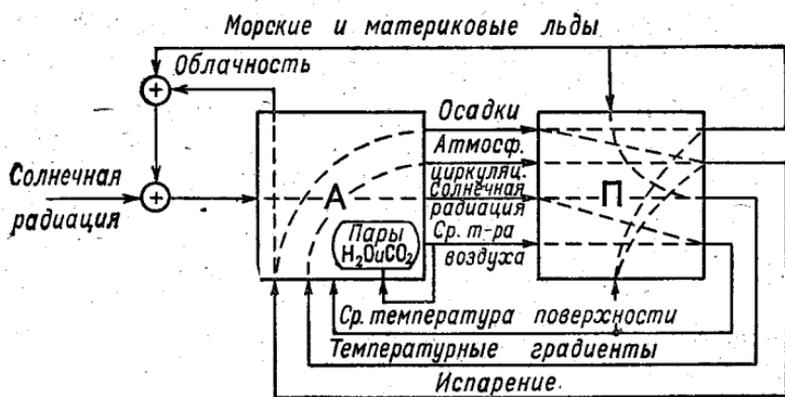


Рис. 19. Общая функциональная схема земная поверхность — атмосфера (по С. Я. Сергину, 1966).

А — атмосфера, П — поверхность планеты.

ра на поверхности открытого океана никогда не может упасть ниже  $-2^{\circ}\text{C}$ . Вблизи границы вода — лед создаются значительные разности температуры — к центру ледяных массивов температура падает, и это падение пропорционально площади льдов (в центральных районах Гренландии среднегодовая температура воздуха  $-30^{\circ}$ , Антарктиды  $-60^{\circ}\text{C}$ ). С другой стороны, повышение температуры воды с удалением от льдов вызывается теплом Солнца и происходит тем быстрее, чем больше поступление этого тепла и, значит, чем ближе расположена к экватору граница льдов. Значит, температурный градиент — величина переменная, зависящая от площади льдов и прежде всего льдов морских, поскольку площади материковых льдов (например, Антарктиды) ограничены размерами подстилающей твердой поверхности.

Таким образом, мы можем записать:

$$G = f_1(S), \quad (84)$$

где  $G$  — средний для поверхности Земли градиент температуры, а  $S$  — средняя площадь, занятая льдом (морским и материковым).

С другой стороны, чем больше пространственное изменение температуры поверхности, тем больше разности приземного давления атмосферы. Это происходит потому, что теплая поверхность нагревает воздух и увеличивает высоту лежащего над ней слоя атмосферы. Холодная поверхность охлаждает воздух и атмосферная оболочка над ней сжимается. На больших высотах происходят движения, в результате которых толщина атмосферы выравнивается за счет притока воздуха к холодным областям. Таким образом, к охлажденным поверхностям на больших высотах стекаются дополнительные массы воздуха, которые создают области высокого приземного давления. Над нагретыми поверхностями возникает обратная картина. Значит, большие разности приземной температуры создают большие градиенты приземного давления атмосферы. Но различия давления — это движущая сила, создающая приземный ветер. Чем больше разность давления, тем сильнее ветер. Мы можем записать зависимость ветра от градиента температуры:

$$W = f_2(G), \quad (85)$$

где  $W$  — скорость ветра.

На рис. 19 эта связь показана линией «температурные градиенты». Нарастающая скорость ветра увеличивает скорость испарения с поверхности океана. Эта связь показана линией «атмосферная циркуляция». Испарение увеличивает облачность и осадки. Осадки влияют на образование снежных и ледяных покровов, которые вместе с облачностью определяют альбедо планеты и с его помощью регулируют подачу солнечного тепла.

На рис. 19 показана также связь между средней температурой поверхности океана и состоянием атмосферы. Эта связь заключается в том, что подстилающая поверхность нагревает атмосферу и этим путем

увеличивает ее возможность поглощать водяной пар без конденсации его в облачность и перехода в осадки. Нагревание океана сопровождается также выделением из него в воздух углекислого газа, который в растворенной и химически связанной форме содержится в океане в значительно большем количестве, чем в атмосфере. Присутствие в воздухе двух газов — водяного пара и углекислого газа — очень сильно влияет на прозрачность атмосферы относительно теплового излучения. Добавление этих газов делает пропускную способность атмосферы к тепловым лучам избирательной. Чем выше температура тела, тем меньше длина его тепловых волн. Короткие волны солнечной радиации беспрепятственно проходят через воздух, содержащий водяные пары и углекислый газ, но длинные волны теплового излучения земной поверхности поглощаются этими газами. Таким образом создается парниковый эффект земной атмосферы.

Связи, показанные на схеме, были выражены уравнениями и введены в электронную аналоговую модель. Это устройство позволило определять поведение системы земная поверхность—атмосфера в ответ на различного рода случайные возмущения на входе, т. е. в величине поступления тепла. Причины этих возмущений могут быть разными. Это прямое изменение поступающей радиации или изменения поглощаемого Землей тепла за счет изменений ее атмосферы и состояния поверхности.

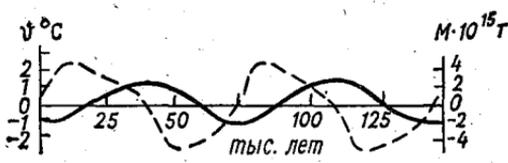
Записи, снятые с электронной модели, показали изменения во времени массы ледников и температуры земной поверхности (рис. 20). Эти изменения даны в отклонениях от среднего состояния.

В процессе подготовки модели было найдено, что некоторыми связями системы можно пренебречь ввиду их незначительной роли в энергетических процессах. Так, в модели земная поверхность представлена в двух состояниях — льды и океан. Суша учитывается косвенным образом — поправкой на испарение океана. Но изменения площади морских льдов оказались принципиально важными.

Если в модель ввести линейную зависимость площади льдов от температуры океана, то модель работает в затухающем колебательном режиме. Однако в реаль-

ном океане связь между температурой и площадью морских льдов весьма сложна, что вызвано соленостью морской воды. В противоположность воде пресной вода океана имеет максимальную плотность при температуре замерзания. Поэтому охлажденные частицы воды, становясь более тяжелыми, чем подстилающие их воды, уходят с поверхности, не успев превратиться в лед. Таким образом, началу замерзания в океане должно предшествовать интенсивное плотностное перемешивание, которое задерживает рост ледяного покрова.

Рис. 20. Запись автоколебаний системы земная поверхность — атмосфера (по С. Я. Сергину, 1968).



Палеогеографические данные показывают, что при охлаждении земной поверхности площадь морских льдов возрастала сперва быстро, затем все медленнее и медленнее, напоминая в своем изменении ход синусоиды от 0 до  $\pi/2$ . Когда такая зависимость площади льдов от температуры вводилась в модель, изменения климата приобретали незатухающий автоколебательный характер, как это видно, например, из рис. 20. Колебания здесь развиваются без участия внешнего возмущения, их источником служат отклонения параметров системы от равновесного состояния. В начальный момент времени температура поверхности имеет среднее значение, но уменьшенная масса льдов не соответствует этой температуре (на рисунке масса оледенения показана сплошной линией, а температура поверхности планеты — пунктирной). Такое несоответствие могло бы возникнуть при искусственном уничтожении ледяных щитов. В связи с этим несоответствием температура, как и предсказывают проекты уничтожения льдов, быстро повышается. Однако далекие последствия этого весьма плачевны. Следуя за рисунком слева направо, мы видим, что примерно через 25 тысяч лет развивается новое оледенение Земли.

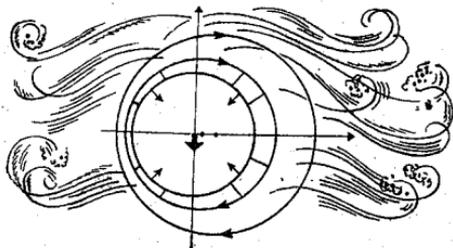
Системный анализ и математическое моделирование глобальных процессов — это вопросы для географии океана и суши относительно новые. В первой половине

нашего столетия моделированию подвергались преимущественно явления локального характера, связанные с развитием или условием равновесного состояния физических процессов в какой-то точке пространства.

Переходя последовательно от одной точки к другой, океанологи смогли рассчитать карты осредненных, в значительной степени идеализированных морских течений и получить величины переносимого ими тепла и солей. Парадоксальным было, однако, то, что объяснить картину циркуляции было иногда труднее, чем рассчитать. Почему у западных берегов Атлантики существуют стремительный Гольфстрим, а у восточных — неустойчивое и медленное движение вод, хотя поле ветра над океаном почти симметрично? Почему Гольфстрим отрывается от берегов Северной Америки раньше, чем на него действуют западные отжимные ветры? Почему, пересекая затем ветровое поле, он устремляется в полярные широты? Почему под ним существует глубинное противотечение? Не зная ответов на эти и другие вопросы, мы не можем предсказывать поведение океанической системы.

Мы рассмотрели наиболее простые модели, служащие фундаментом дальнейшего развития теории динамической системы океана. Эти модели еще не вошли ни в один из отечественных учебников океанологии или географии, а научные журналы публикуют все новые и новые работы, усложняющие моделирование и приближающие его к реальным условиям планеты.

Таким образом, всякая обзорная работа, посвященная современному моделированию океана, успеет в какой-то мере устареть раньше, чем увидит читателей. Тем не менее понять новое нельзя без опоры на те работы, из критики и усовершенствования которых это новое появилось в науке.



# ГЛАВА 2

## ХИМИЯ И ЖИЗНЬ ОКЕАНА

He who would search pearls must dive below.<sup>1</sup>

*Английская пословица*

Море выглядит как гигантская биохимическая лаборатория или хемостат.<sup>2</sup>

*Зобелл*

### Как поддерживается порядок в химической лаборатории океана?

Океан в представлении разных ученых выглядит по-разному. Физика интересуется его динамизм, борьба противоположных тенденций, и он говорит о «колесах» океанической циркуляции. Химики предпочитают говорить об океане как о «кладовой сокровищ», где хранятся металлы, соли, растворенные газы, взвешенные и растворенные органические вещества, различные химические элементы (в морской воде представлена почти вся таблица Менделеева). Морские химики и заняты в основном инвентаризацией этого гигантского склада. Записывая, что и сколько лежит на его стеллажах, они обнаруживают прежде всего строгий порядок и систему, которые наиболее ярко проявляются в постоянстве солевого состава морской воды. Тысячелетиями и миллионами лет во всех районах и на всех глубинах океана соотношение основных компонентов морской воды остается постоянным. И это не кажется удивительным: «колеса» океанической циркуляции крутятся быстро, и океан хорошо перемешивается, усредняется, масштабы его гигантски, и по сравнению с ними все возмущения, которые могут

<sup>1</sup> Кто хочет искать жемчуга, должен нырять вглубь.

<sup>2</sup> Zобell C. E. Domain of marine microbiologist. Sympos. on Marine Microbiol., Springfield, Illinois, 1963, p. 3.

случиться, — ничто. Одним словом, его химическая жизнь безмятежна.

Великий русский геохимик Вернадский даже предлагал принять соотношение основных компонентов морской воды за константу нашей планеты, аналогично тому, как характерной константой вещества служит точка его плавления.

Поэтому, например, тот хорошо известный факт, что соотношения основных химических компонентов в морской воде и в крови практически одинаковы, не вызывает удивления. Наоборот, он рассматривается как доказательство океанического происхождения жизни и постоянства солевого состава на протяжении миллионов лет. Между тем, именно этот факт должен был бы удивлять и настораживать.

Организмам мы уже никак не могли бы приписать безмятежную жизнь, инерционность во времени: возмущения по сравнению с их масштабами велики, условия новы, различны в разных местах земного шара и быстропеременны. И тем не менее организмы сохраняют эту «фамильную» черту потомков океана, передавая ее по наследству. Значит, речь должна идти не о постоянстве и неизменности, а об устойчивости, о наличии механизмов, обеспечивающих эту устойчивость химического облика и океана, и крови, причем механизмов одинаковых или принципиально близких. Больше того, приходится предполагать, что химическая жизнь океана вовсе не безмятежна и инерционна, а динамична, иначе не выработались бы механизмы, обеспечивающие эту устойчивость.

Расскажем историю подводного вулкана Бану Вуху, расположенного на 3° с. ш., 125° в. д. вблизи индонезийских островов Махенгетан и Сангихе, по книге крупнейшего советского гидровулканолога К. К. Зеленова<sup>1</sup>.

«В конце 1895 г. жители Махенгетана наблюдали диковинные гейзерообразные струи, бьющие вертикально вверх из «кипящего» моря. «Гейзеры» сопровождались выходом сернистых газов и массовой гибелью рыбы. Новый сильный выход сернистых газов произошел 17 апреля 1904 г., после чего сопровождаемый

---

<sup>1</sup> Зеленов К. К. Вулканы как источники рудообразующих компонентов осадочных толщ. М., «Наука», 1972, с. 173—174.

серией ощутимых толчков из моря поднялся новый остров. Морская вода вокруг острова имела ржаво-красную окраску и неистово бурлила, однако оставалась холодной, имела горько-соленый вкус обычной морской воды и неприятный запах серы... 18 июля 1918 г. утром из моря поднялся высокий столб воды, вызвавший разрушительное цунами, и все водное пространство, насколько хватало взгляда, покрылось пемзой. Со стороны моря в течение 4 часов подряд доносился сильный гул. 20 августа это явление повторилось в сопровождении интенсивно выделявшегося сернистого газа, в результате чего к берегу прибило большое количество одурманенной рыбы. 2 февраля 1919 г. над морем поднялись две скалы, и остров Махенгетан был засыпан пеплом, однако к вечеру скалы снова погрузились в «кипящее» море. В апреле эруптивная деятельность достигла максимальной силы. Остров Махенгетан был засыпан пеплом и градом вулканических бомб размером больше человеческой головы... По наблюдениям с о. Сангихе, столб «дыма» над Бану Вуху поднимался в это время до высоты 4—5 тыс. м, были слышны сильные взрывы и видно огненное свечение. В результате образовалась обширная, затопляемая в прилив каменистая банка, из которой в конце 1919 г. выдвинулась лавовая игла высотой 20—30 м. К 1935 г. лавовая игла вновь опустилась в море, и от острова осталась лишь каменистая отмель и несколько обнажающихся в отлив невысоких обломков скал».

И в другом месте: «При этом следует подчеркнуть, что океан постоянно стремился разрушить это сооружение, что ему частично удавалось в периоды затишья, и новая фаза извержения начиналась либо под водой, либо в затопленном кратере. Этапы этой борьбы...»<sup>1</sup>

Остается дать лишь несколько пояснений к картине этой «безмятежной» жизни. В подавляющем большинстве случаев такая борьба ведется скрытно, под многокилометровой толщей воды, где из-за высокого гидростатического давления извержение проявляется не взрывом, а сравнительно спокойным изливанием лавы и концентрированного водного раствора смеси кислот  $\text{HCl}$ ,  $\text{H}_2\text{S}$ ,  $\text{H}_2\text{SO}_3$ ,  $\text{H}_3\text{PO}_4$ ,  $\text{CO}_2$ , хлоридов металлов и др.,

---

<sup>1</sup> Зеленов К. К., с. 158.

который, взаимодействуя с горячей лавой, дает продукты: натрий, кальций, магний, железо, марганец, кремнезем и др. Над такими районами количество взвесей в воде увеличивается более чем в 10 раз, они содержат много железа, меди и других металлов, изменяется даже цвет воды. В океанологии существует соответствующий специальный термин — «обесцвеченная вода». Извержения некоторых наземных вулканов превышают годовой вынос материала всеми реками мира. Подводные вулканы не слабее наземных и их больше: на дне только Тихого океана насчитывается не менее 10 000 вулканических сооружений высотой более 1 км.

По подсчетам геологов, вода в океане должна быть в основном «вулканического» происхождения, продуктом дегазации мантии. Однако французский ученый де Турвилль<sup>1</sup> подсчитал, что для образования всей массы океанской воды достаточно одного только так называемого «солнечного ветра» — потока от Солнца протонов, ядер водорода. Солнечный ветер дует постоянно. Почему же не растет количество водорода в океане? Другой непрерывный источник веществ — речной сток. Хотя общий годовой вынос веществ речным стоком значительно меньше массы океанской воды, но он, учитывая время, тоже существен, а главное — неравномерно распределен: 60% всех растворенных веществ континентального стока приходится на одну область — северную часть Атлантического океана. Кроме того, в океане есть свои химические «дожди», «снежные бури», «течения», над ними дуют химические «ветры» и «ураганы». Обилие и масштабы таких возмущений ставят в тупик.

Несмотря на все эти и многие другие внешние воздействия, океан надежно сохраняет устойчивость своего химического облика — такой напрашивается вывод из всего рассказанного. И можно ожидать, что этот вывод окажется неверным.

Может быть, аналогично велосипедисту, который держится устойчиво против силы тяжести и одновре-

---

<sup>1</sup> Turville C. M., de Terrestrial accretion from the solar wind. — «Nature», 1961, vol. 190, N 4771, p. 156 (обсуждение этого в: Pirie N. W. Solar wind and terrestrial oxygen. — «Nature», 1961, vol. 190, N 4777, p. 706).

менно благодаря ей, но лишь пока крутит педали, океан тоже устойчив не только вопреки, но и благодаря внешним воздействиям, пока крутятся колеса его циркуляций — физических, химических и биологических? Отложим пока окончательный ответ на этот вопрос и, вернувшись к сопоставлению океана и организма, сделаем предварительный вывод, в котором больше уверены: не из-за постоянства химического состава, а именно из-за устойчивости, т. е. способности при всех возмущениях поддерживать его постоянным, в океане могла зародиться и развиваться жизнь. Именно из-за этого позднее организмы могли выбраться на сушу и противопоставить себя, фактически маленький кусочек океана, морскую воду со всеми ее компонентами и химическими реакциями, заключенную в оболочку, быстропеременным условиям новой среды. И устойчивость химического облика океана оказалась столь велика, что, даже будучи изолированными от океана, неузнаваемо меняясь внешне и внутренне в новой обстановке на протяжении миллионов лет, живые организмы не утратили химических особенностей морской воды. Именно поэтому до сих пор обнаруживается не только удивительное сходство в соотношении основных химических компонентов в морской воде и в крови, но и в способе регулирования концентрации водородных ионов; в процессах осаждения солей из них и даже в функциональной роли комплекса органических веществ в крови и в морской воде.

Эта устойчивость не только поражает, но и ставит перед нами массу интересных, принципиально важных вопросов и прежде всего: в чем же заключается химическая и физико-химическая особенность морской воды и почему от морской воды до живого, как оказалось, — один шаг? По-видимому, раз вода дала жизнь, она чем-то отличается от обычных «неживых» образований — камня, горы, воздуха и т. д., а может быть даже и от «просто воды»? Какова природа и основа этой устойчивости? Безгранична ли она? Не могут ли ее нарушить природные катаклизмы? Если могут, то что случится? Не может ли, наконец, ее нарушить вмешательство человека?

Даже само перечисление этих вопросов, которые задает нам химия океана, показывает, что ответ не прост.

Всегда, когда ученые пытаются разобраться в сложных объектах, они выбирают тот или иной путь исследования. Например, чтобы разобраться в такой сложной системе, как человеческое общество или государство, надо изучить его историю, состав, основные элементы и их взаимодействие (экономику, политику и т. д.). Но можно пойти другим, более простым путем: изучить судьбу одного человека и его семьи, в ней тоже отразится история общества, состав, основные элементы, их взаимодействие и т. д. Выберем второй путь. В качестве «меченого» объекта наблюдения лучше всего выбрать «элемент жизни» — углерод и его «семью» — его неорганические и органические соединения. Начнем с описания «дома», в котором живет эта «семья». Расскажем, из чего и как он построен, как он выглядит и почему он такой, а не иной. Одним словом, почему вода — вода?

### Вода ли морская вода? Сложные системы

Казалось бы, здесь все известно, «дом» этот — вода,  $H_2O$ . Строение, свойства и взаимодействия воды с другими веществами и природными объектами хорошо известны, и ничего нового открыться нам не может. Но вот, например, геологи до недавнего времени считали, и это представлялось всем нам бесспорным со школьной скамьи, что разрушение горных пород происходит вследствие замерзания воды в порах — аналогично тому, как лопается закрытая бутылка с замерзающей водой. И только сравнительно недавно геологи установили<sup>1</sup>, что замерзание не имеет никакого значения — главную роль играет просто переупорядочивание молекул воды, адсорбированной на кристаллах (но не замерзшей), при колебаниях температуры. Точно так же могут разрушать породу и другие жидкости, состоящие из полярных молекул, т. е. имеющих разноименно заряженные полюсы. Например, диметилформамид, молекула которого полярна, разрушает породу через 5 циклов нагревания до  $+85^{\circ}C$  и охлаждения до  $+20^{\circ}C$ . В то время как четыреххлористый углерод, молекула которого неполярна, не действует таким

<sup>1</sup> Chem. Eng. News., 1966, vol. 44, N 8, p. 102.

образом. Четкое, наглядное и «понятное» представление о процессе приходится менять на нечто, как кажется, неопределенное и туманное. И самое неприятное — значит, нет гарантии, что и другие, не менее четкие и наглядные представления не подвергнутся со временем подобной же ревизии.

Пример этот поучителен еще в одном отношении. Совершенно незначительные, на первый взгляд, мелко-масштабные детали могут привести к крупным, глобального значения, последствиям. Микроскопические, на молекулярном уровне, особенности и взаимодействия, являющиеся предметом интереса химии, вызывают макромасштабные, геологического уровня, процессы. Между тем даже в наш атомный век человеку свойственно видеть причину гигантских природных явлений в не менее гигантских и масштабных источниках и действиях. Учитывая это, рассмотрим кратко строение молекулы воды и структуру воды, обращая внимание не столько на хорошо известные из химии факты, сколько на те микроскопические особенности, которые, на наш взгляд, могут оказаться существенными для представления о том, что же такое морская вода.

Элементы, из которых построена молекула воды, — кислород  $O$  и водород  $H$  — порознь представляют собой элементарные электростатически сбалансированные системы, схемы которых изображены на рис. 21 а. Сведенные в одну молекулу два атома водорода и один атом кислорода (рис. 21 б) формально ничего нового не приобрели и не потеряли: их суммарная масса и взятых порознь, и сведенных в молекулу равна 18 атомным единицам, число элементарных частиц — протонов, электронов и нейтронов — тоже одинаково. Однако по свойствам и по своей сути — это не просто сумма  $2H$  и  $O$ , а некоторым образом упорядоченная устойчивая система из двух  $H$  и одного  $O$ , элементы которой определенным образом взаимосвязаны и организованы в нечто новое — молекулу воды. Такое характерное свойство систем — качественное отличие их от суммы составляющих их элементов — называют эмерджентностью.

Из-за того что атом водорода отдает «свой» единственный электрон на образование молекулы воды, протон — ядро водорода — оказывается «голым», не

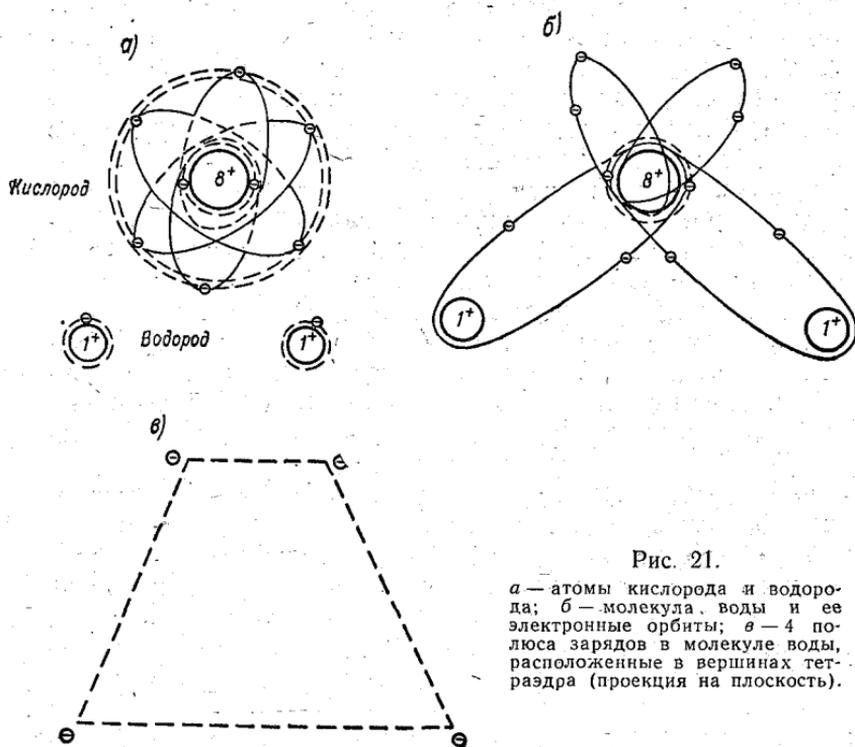


Рис. 21.

а — атомы кислорода и водорода; б — молекула воды и ее электронные орбиты; в — 4 полюса зарядов в молекуле воды, расположенные в вершинах тетраэдра (проекция на плоскость).

прикрытым никакой электронной оболочкой. Он подтягивается очень близко к электронной оболочке кислорода и в какой-то степени внедряется в нее. Электроны в среднем оказываются больше смещенными в сторону кислорода, молекула воды становится полярной, обладающей двумя разноименно заряженными полюсами, т. е. диполем: эффективный заряд при водороде  $+0,33$ , а при кислороде  $-0,66$ . Геометрическое

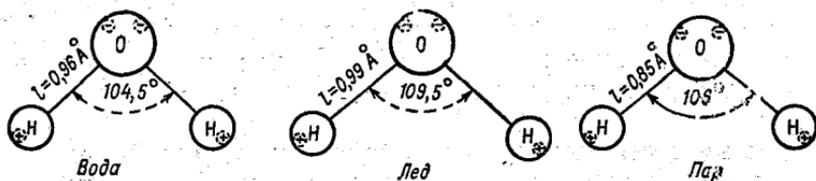


Рис. 22. Геометрическая модель молекулы воды.

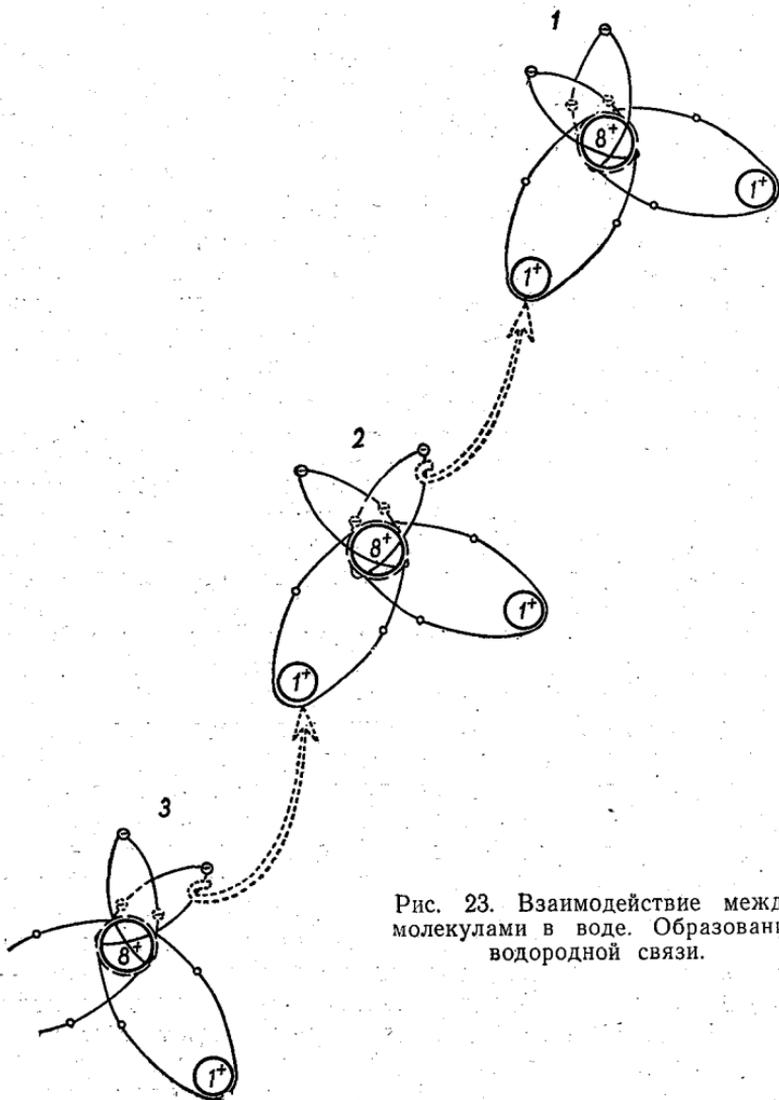


Рис. 23. Взаимодействие между молекулами в воде. Образование водородной связи.

строение молекулы воды изображено на рис. 22. Значения геометрических характеристик связаны с агрегатным состоянием воды.

Проследим за дальнейшим переходом от молекулы воды к воде как реальному веществу, т. е. к совокупности огромного количества молекул воды. Как и в случае любых других газообразных и жидких веществ, молекулы воды будут находиться в беспорядочном, хаотичном тепловом движении, тем более беспорядочном, чем выше температура. Однако электростатическое междипольное взаимодействие противодействует беспорядочному тепловому движению молекул и стремится ориентировать их совершенно определенным образом, при этом, как показано на рис. 23, протон одной молекулы воды (№ 1) взаимодействует с электронами другой молекулы воды (№ 2), протон которой в свою очередь может взаимодействовать с электронами молекулы № 3. В результате связь в самой молекуле № 2 будет поляризоваться еще больше, что в свою очередь приведет к еще большему усилению связи между молекулами и т. д. Образуется так называемая водородная связь. Она очень слаба. Достаточно энергии 5—6 ккал на 1 моль вещества, чтобы разорвать ее. Для разрыва связи в самой молекуле воды такая минимально необходимая энергия (энергия связи  $D$ ) почти в 20 раз больше,  $D_{\text{H-O}} = 109,4$  ккал/моль воды. И все же благодаря междипольному взаимодействию и главным образом водородной связи молекулы воды противопоставляют хаосу теплового движения стремление к определенной упорядоченности в пространстве и во времени и к образованию агрегатов, ассоциаций молекул воды из двух, трех и даже из четырех молекул. Насколько это им удастся, зависит от температуры. Но если проследить за любой молекулой воды, то окажется, что совершенно «упорядочиться» ей не удастся. Ассоциации молекул возникают лишь на какое-то мгновение — тепловое движение и столкновения с другими молекулами практически мгновенно их разрушают, они снова на какое-то время образуются в другом месте. Если бы удалось сфотографировать картину в целом, то на фотографии мы не увидели бы той упорядоченной структуры, которую рисуют в книгах и учебниках (рис. 24 а), чтобы создать представление о тенденции,

на которую надо обратить внимание. Существует ли некоторая определенная структура воды реально? Пересчитав на «мгновенной» фотографии расположение

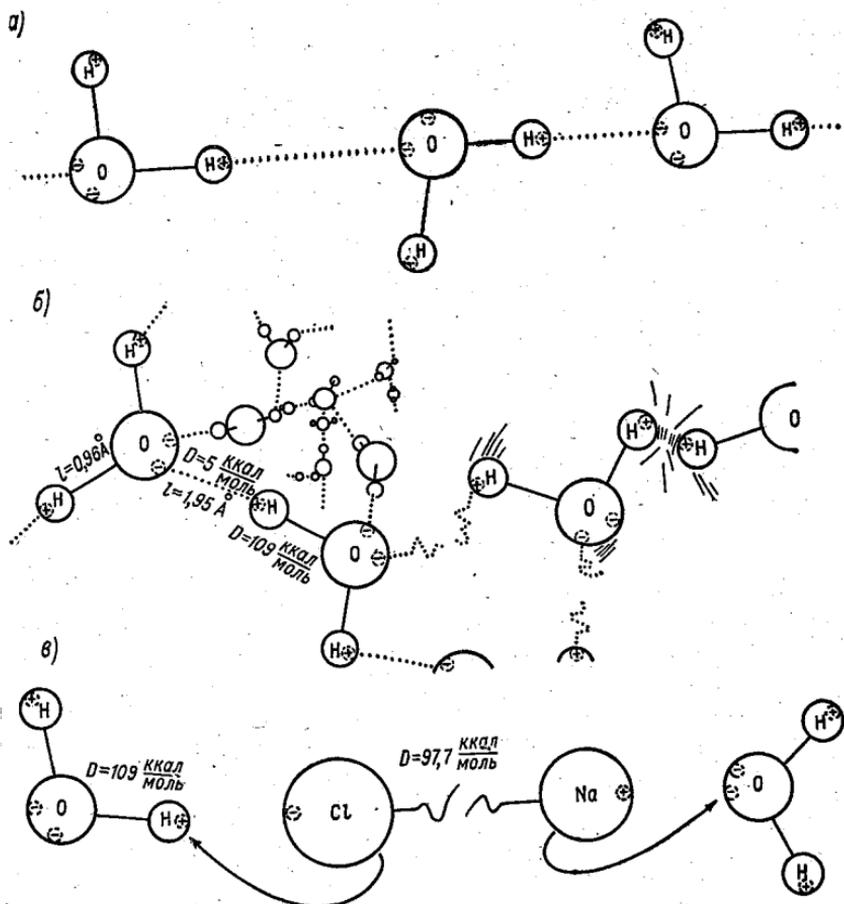


Рис. 24. Взаимодействие между молекулами в воде.

а — упрощенное изображение водородной связи в воде; б — среди беспорядочно движущихся молекул воды непрерывно происходит образование и разрыв водородных связей; в — разрыв связей (диссоциация) в молекулах электролитов в воде.  $D$  — энергия связи (ккал/моль);  $l$  — расстояние между ядрами кислорода и водорода ( $\text{\AA}$  — ангстрем =  $10^{-8}$  см) внутри одной молекулы и между разными молекулами, связанными в двойной ассоциат.

миллионов молекул и статистически проанализировав результат, можно обнаружить, что в среднем каждое мгновение больше чем половину молекул можно считать связанными в ассоциации, расположение которых

в пространстве небеспорядочно и напоминает фантастический натянутый каркас из паутины, во всех местах то и дело рвущейся, но самовосстанавливающейся (рис. 24 б). Даже при температуре выше  $100^{\circ}\text{C}$ , когда энергия теплового движения велика, плотность

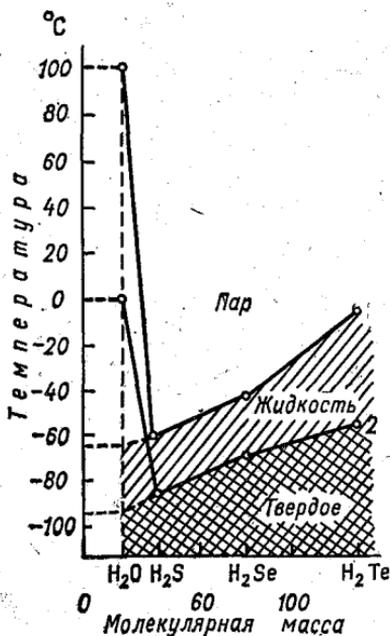


Рис. 25. Сравнение действительных температур фазовых переходов воды с ожидаемыми по аналогии с другими гидридами VI-A группы периодической системы элементов Менделеева. Эффект эмерджентности.

1 — температура кипения; 2 — температура плавления.

точно предсказаны свойства некоторых еще не открытых веществ). Результаты такой экстраполяции хорошо известны.

Они приводятся на рис. 25. Температура плавления воды вместо  $0^{\circ}\text{C}$  должна бы быть равна  $-95^{\circ}\text{C}$ , а температура кипения вместо  $100^{\circ}\text{C}$  должна быть около  $-65^{\circ}\text{C}$ . Значит, если бы вода была «нор-

водяного пара такова, как если бы в среднем 3,5% молекул существовало в виде ассоциации  $(\text{H}_2\text{O})_2$ .

Имеют ли значение столь слабые взаимодействия, есть ли какой-либо реально ощутимый эффект эмерджентности этой системы? Другими словами: есть ли какая-нибудь ощутимая разница в том, представляет ли собой вода определенным образом организованную совокупность взаимодействующих элементов, т.е. систему, или это просто огромное количество молекул  $\text{H}_2\text{O}$ ? Таблица Менделеева позволяет рассчитать свойства и состояние «воды», не обладающей присущими ей структурными особенностями. Для этого нужно экстраполировать характеристики химических аналогов воды, соединений водорода с элементами той же подгруппы, что и кислород (таким путем в свое время Д. И. Менделеевым были

мальным» веществом, без водородных связей и обусловленной ими упорядоченности, она существовала бы на Земле только в виде пара, как сероводород, и только где-нибудь в Якутии выпадала бы иногда зимой в виде дождя. Впрочем, весь температурный режим поверхности нашей планеты был бы иным. Да и Якутия не имела бы названия, поскольку не было бы людей и вообще живых организмов. Но допустим, что вопреки всему вода все равно замерзала бы при  $0^{\circ}\text{C}$ , кипела при  $100^{\circ}\text{C}$  и существовала бы на Земле одновременно в трех фазовых состояниях — парообразном, жидком и твердом, как это, по-видимому, требуется для возникновения и существования жизни в том виде, в каком мы ее знаем. Однако теплоемкость воды была бы «нормальной», значительно ниже действительной, и тогда Землю лихорадило бы: температура то очень быстро поднималась бы до  $+100^{\circ}\text{C}$  и вся масса воды испарялась бы, то так же быстро температура падала бы, местами ниже  $-100^{\circ}\text{C}$ , и океан превращался бы в лед, потому что плотность льда была бы выше плотности воды, как и положено нормальному веществу, и все новые и новые массы льда опускались бы на дно. Растворенные вещества выморозились бы из воды. Впрочем, их почти не было бы, так как вода в этом случае не была бы таким универсальным растворителем. Одним словом, выстроенный нами дом немедленно рухнул бы.

Рассмотренные особенности воды как сравнительно простой системы дают повод сформулировать некоторые свойства систем, хорошо известные из соответствующей специальной области науки — общей теории систем (пока мы вынуждены иметь в виду лишь некоторые свойства, характеризующие системы **закрытые**, т. е. без обмена с окружающей средой, и не динамические, т. е. такие, в которых время не играет роли).

1. Элементарные системы, если они взаимодействуют друг с другом, образуют единую, устойчивую, более сложную систему, которая в свою очередь оказывается более простой, подсистемой, по отношению к еще более сложной охватывающей ее системе. Обозначая предложение: « $A$  включает в себя  $B$ » символом  $B \subset A$ , можно для наглядности записать:  $\text{H}, \text{O} \subset \text{H}_2\text{O} \subset \text{вода}$ .

2. Системы, являясь организованной совокупностью взаимодействующих элементов, обладают свойством эмерджентности. Для наглядности можно записать:  $\text{H}_2\text{O} \neq 2\text{H} + \text{O}$ ; вода  $\neq n\text{H}_2\text{O}$ .

3. Структуру системы, т. е. образующие ее элементы с отношениями и связями между ними, нельзя непосредственно увидеть или сфотографировать, но она реально существует, проявляется в свойствах и реакциях системы и потому может быть изучена и символически изображена. Определенной характеристикой структуры системы могут служить принятые в химии представления о структуре (строении) химических объектов: 1) структуры, связанные с модельными представлениями (например, электронная структура атома, рис. 21); 2) структуры, связанные с геометрическими представлениями (например, кристаллы, или геометрическое представление на рис. 22); 3) структуры, связанные с кинетическими представлениями (например, возникающие в течение химических реакций или в растворах, рис. 23). Однако принятые в химии (строение) и в теории систем (функциональные) понятия структуры не тождественны.

4. Структура системы и ее поведение, функционирование, тесно и определенным образом связаны между собой.

5. Даже слабые взаимодействия и мелкомасштабные элементы и процессы в системе могут определять ее облик и поведение.

6. Из изложенных сведений можно сделать общие выводы относительно возможностей и путей изучения систем. Вследствие эмерджентности знания об элементах системы, даже детальные, не могут дать знания о системе. Простое объединение сведений об элементах системы может дать лишь ложное представление о ней.

Поскольку структура и функционирование системы однозначно связаны, поведение и состояние системы, вообще говоря, может быть предсказано из детального знания ее структуры, в этом смысле оно предопределено, детерминировано. Однако построение абсолютно точной детерминистической модели (основанной на причинно-следственных связях) хоть сколько-нибудь сложной системы практически невозможно: в системе из  $n$  элементов существует  $n(n-1)$  возможных связей и

общее число состояний  $s \geq 2^{n(n-1)}$ , т. е. фантастически велико. Так, в системе всего лишь из 10 элементов возможно 90 связей и  $s \geq 2^{90} = 1,3 \cdot 10^{27}$  состояний. Если исследование каждого из этих состояний проводить быстрее, чем мгновенно, например за одну миллионную долю секунды, то на такое изучение системы даже при непрерывной работе потребуется больше времени, чем чувствует Земля. Поэтому в системе выделяют лишь главные связи и пренебрегают второстепенными. Однако это очень рискованная процедура, не допускающая волюнтаристских решений, так как даже слабые взаимодействия и связи могут определять поведение системы. Детерминистические исследования должны сочетаться с расчетами статистическими и вероятностными (стохастическими).

Знание системы можно считать точным и полным, если удастся дать точный долгосрочный прогноз ее состояния и если в то же время удастся рассчитать состояние любого элемента по данным о состоянии  $n - 1$  остальных ее элементов. Ярчайшие примеры такого знания системы неоднократно демонстрировала небесная механика. Ее пример вселяет уверенность в принципиальной возможности познания сложных систем.

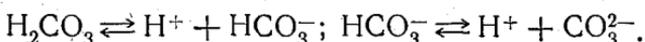
В химии океана наиболее полно системные представления нашли стихийное отражение во взглядах на карбонатную систему, в развитие которых весомый вклад внес крупнейший советский гидрохимик О. А. Алексин. Однако именно морская вода в целом, океан как химическая система, только начинает изучаться. Поэтому наши дальнейшие выводы будут пока менее определены, мы больше поставим вопросов, чем ответим на них.

Прежде всего, учитывая уже разобранные вопросы, можно было бы довольно точно предсказать, как должна взаимодействовать вода с теми веществами и объектами, с которыми она может прийти и приходит в контакт, какую систему они образуют. Значит состояние этой системы не случайно, а предопределено, как предопределено свойствами элементарных систем Н и О состояние образуемой ими воды. Все события и встречи, которые могут произойти, как бы накладываются на матрицу упорядоченности воды и согласовываются с силами, обуславливающими эту упорядоченность.

Хорошо известно, что электролиты диссоциируют в воде: те же силы, о которых говорилось выше, буквально разрывают на части полярные молекулы, например  $\text{NaCl}$ , несмотря на высокую энергию связи в ней равную 97,7 ккал/моль (см. рис. 24 в). Образовавшиеся разноименно заряженные ионы  $\text{Na}^+$  и  $\text{Cl}^-$ , естественно стремятся снова соединиться в молекулу (это им почти не удается):



Диссоциируют и неорганические соединения углерода:



Гораздо меньше известно, что происходит с самой водой под влиянием растворенных в ней веществ. Зная свойства систем, можно уверенно сказать, что растворенные вещества должны в свою очередь повлиять на структурные характеристики воды. Действительно, экспериментально обнаружено<sup>1</sup>, что ионы  $\text{Al}^{3+}$ ,  $\text{Cd}^{2+}$ ,  $\text{Zn}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{CO}_3^{2-}$ ,  $\text{OH}^-$ ,  $\text{F}^-$  приводят к упорядочению структуры воды вблизи иона, а  $\text{K}^+$ ,  $\text{I}^-$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{Cl}^-$  — к ее разрыхлению. Растворение органических веществ может влиять на структуру воды в еще большей степени. Может ли это привести к заметным изменениям в системе? Очевидно, может, но экспериментально это изучалось мало. Обнаружено, что углеводороды, например, настолько способствуют упорядочению структуры воды, что она при нормальной, «комнатной», температуре в местах контакта с большой органической молекулой превращается в маленькие айсберги, которые получили название «айсберги Франка—Эванса» — по имени открывателей. Из-за структурных же сдвигов в воде в ней аномально низка растворимость газов по сравнению с их растворимостью в органических жидкостях причем эта растворимость зависит от солености воды. По этой же причине в морской воде, особенно при больших давлениях (до 1500 кг/см<sup>2</sup>), наблюдается вязкость

<sup>1</sup> Изучение гидратации ионов в водных растворах по спектрам поглощения в ИК-области. — «Теоретич. и эксперим. химия», 1966, 2, № 4, с. 494—503. Авт.: А. В. Карякин, А. В. Петров, Ю. Б. Герлит, М. Е. Зубридина.

аномальная по сравнению с вязкостью «просто воды». Даже взвешенные в морской воде вещества должны оказывать заметное влияние, так как вблизи поверхности твердого тела, из-за ориентирующего действия поверхности, структура жидкости упорядочивается, причем толщина таких упорядоченных слоев порядка  $10^{-6}$  см, т. е. огромна по сравнению с размерами молекул воды. Свойства таких слоев специфичны, в частности они обладают повышенной вязкостью.

Здесь не случайно подчеркивается именно это свойство — вязкость морской воды — она влияет на гидродинамические свойства жидкости. Нет ни одного свойства, по которому вода и морская вода были бы полностью идентичны — начиная температурой кипения и плавления и кончая кинетикой реакций и термодинамикой процессов, протекающих в ней. Если выражать эти различия в цифрах, то они могут показаться столь малыми, что, не зная особенностей сложных систем, мы не стали бы принимать их во внимание. Но мы уже подчеркивали как чрезвычайно важное свойство систем то обстоятельство, что мелкомасштабные составляющие ее элементы и взаимодействия между ними могут кардинально влиять на облик всей системы. «Мелкие», казалось бы, структурные особенности морской воды, обусловленные взаимодействием с растворенными в ней веществами, приводят к уже «заметным» отличиям ее от воды: плотность последней максимальна при  $4^{\circ}\text{C}$ , в то время как морская вода уплотняется до самой температуры замерзания. Это отличие приводит уже к «масштабным» гидрологическим последствиям: в воде при температуре ниже  $4^{\circ}\text{C}$  прекращается термическая конвекция, а в океане она протекает благополучно при любых низких температурах (так называемая осенне-зимняя конвекция). Это в свою очередь имеет «гигантские», глобальные последствия — климатообразующие и другие географические, формирует определенную химическую структуру морей и океана — в них не прекращается вентиляция глубин кислородом, а верхние слои, бедные морскими удобрениями (биогенными элементами — P, N, Si), обогащаются ими. Поскольку в системе все сказано, не заставляют себя ждать и биологические последствия — наступает осенняя вспышка жизни, не свойственная суше.

Таким образом, морская вода, как более сложная система, отличается от воды составляющими ее компонентами и структурой, и, как внешнее проявление этого различия, наблюдаются различия физического, химического, биологического и даже географического характера. Больше того, даже ставя специально такую цель не удается получить искусственную морскую воду, идентичную по свойствам морской. И так же как для переливания крови пока приходится пользоваться только естественной кровью, для морских аквариумов не удается получить искусственную морскую воду, пригодную для длительной и нормальной жизни организмов, даже не нуждающихся, как принято думать, в растворенных в морской воде веществах — например, для жизни акул. Можно повторить вслед за геологами, иногда называющими морскую воду минералом, «что константы, полученные при изучении так называемых чистых растворов не всегда выдерживаются в случае сложного многокомпонентного соединения, каким является морская вода»<sup>1</sup> и, показав, что вода и морская вода — не идентичные системы и что вторая несравненно сложнее и включает первую, записать:  $H_2O \subset \text{вода} \subset \text{морская вода}$ .

Можно было бы остановиться на том, что, по-видимому, правы Силлен<sup>2</sup> и Мэккинчер<sup>3</sup>, рассматривающие морскую воду не как 1 л воды, в которой содержится 19,8 г ионов  $Cl^-$ , 11 г ионов  $Na^+$ , 1 мг органических веществ, 6 мл кислорода, 0,1 мг взвесей и т. д., а как систему, образованную множеством составляющих ее элементов, из которых наиболее заметные представлены на гистограмме Мэккинчера (рис. 26). Действительно, не рассматриваем же мы кровь или медузу как воду, в которой растворено и взвешено или находится в коллоидном состоянии определенное количество определенных веществ или элементов, хотя, например, от выброшенной на берег медузы, когда она высохнет на солнце и испарится вода, остается только тонкая пленка, напоминающая полиэтиленовый пакетик. При испарении

<sup>1</sup> Зеленов К. К. Вулканы как источники рудообразующих компонентов осадочных толщ. М., «Наука», 1972, с. 187.

<sup>2</sup> Sillén L. G. The ocean as a chemical system. — «Science», 1967, vol. 156, N 3779, p. 1189—1196.

<sup>3</sup> Mac Intyre F. Why the sea is salt. — «Scientific American», 1970, vol. 223, N 5, p. 104—117.

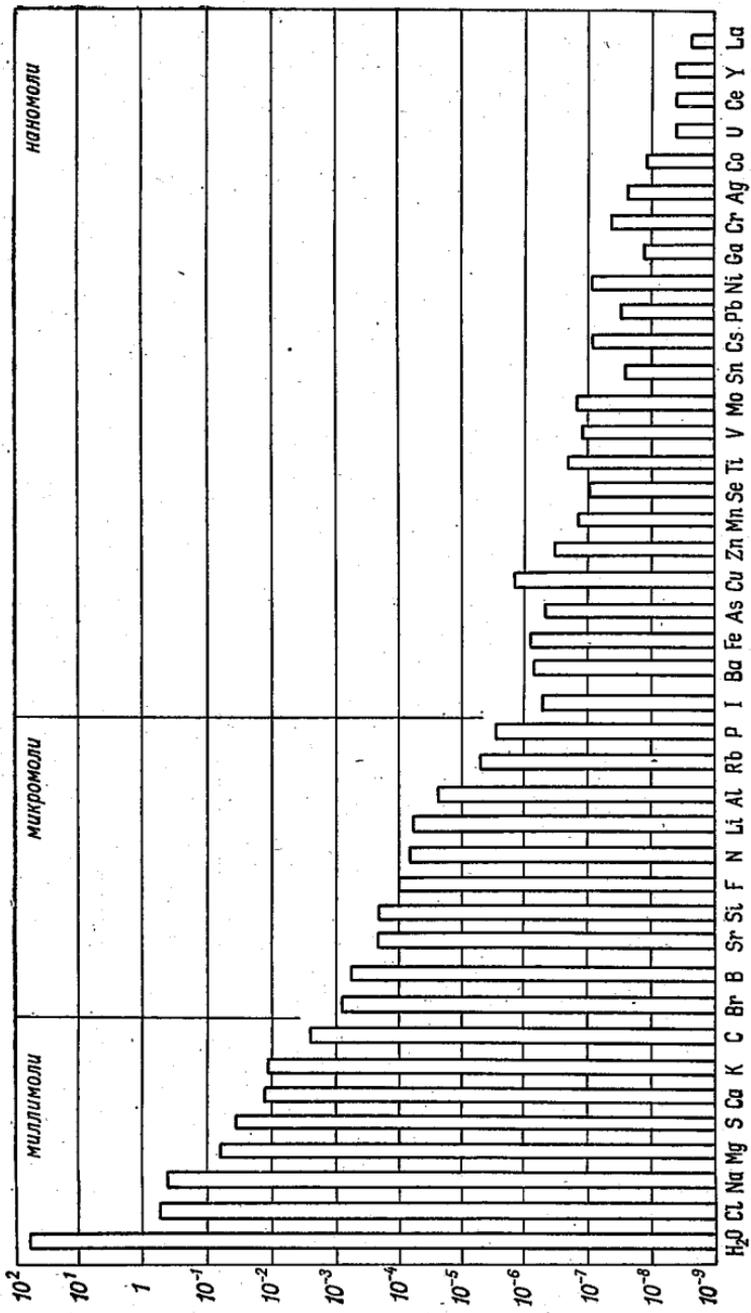


Рис. 26. Состав морской воды. Гистограмма Мэкинчера.

Полные d-орбитали

Частично заполненные d-орбитали

Без d-орбиталей

OH <sup>-</sup> (H <sub>2</sub> O)												He						
Li <sup>+</sup>	Be?	B(OH) <sub>3</sub>												F <sup>-</sup>	Ne			
Na <sup>+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Al(OH) <sub>3</sub>												O <sub>2</sub>	Ne			
K <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Sc?		Ti(OH) <sub>4</sub>	VO <sub>2</sub> <sup>2+</sup>	CrO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Mn(OH) <sub>3</sub>	Fe(OH) <sub>3</sub>	CoCl <sup>+</sup>	Ni <sup>2+</sup>	CuCl <sup>+</sup>	Zn <sup>2+</sup>	Ga?	Ge(OH) <sub>4</sub>	HASeO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	SeO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Br <sup>-</sup>	Kr
Rb <sup>+</sup>	Sr <sup>2+</sup>	Y?		Zr?	Nb?	MoO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	[Tc]	[Ru]	[Rh]	[Pd]	AgCl <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	CdCl <sub>3</sub>	In?	Sn?	Sb(OH) <sub>6</sub> <sup>-</sup>	[Te]	I <sup>-</sup>	Xe
Cs <sup>+</sup>	Ba <sup>2+</sup>	редкие земли 3+		[Hf]	[Ta]	WO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	[Re]	[Os]	[Ir]	[Pt]	AuCl <sub>2</sub> <sup>-</sup>	HgCl <sub>3</sub>	Tl <sup>+</sup>	Pb(OH) <sup>+</sup>	BiO <sup>+</sup>	[Po]	[At]	Rn
[Fr <sup>+</sup> ]	Ra <sup>2+</sup>	[Ac]		Th?	Pa?	UO <sub>3</sub> <sup>+</sup> (CO <sub>3</sub> ) <sub>3</sub>												

Рис. 27. Периодическая таблица морской воды (Мэккинчер). Показана основная форма существования каждого элемента в морской воде (кроме самого водорода воды), в случае, когда эта форма неизвестна, стоит вопросительный знак. Рамкой обведены не открытые в морской воде элементы

1 л морской воды остается около 35 г сухого остатка — фактически столько же, сколько и от медузы.

Гистограмма говорит, правда, тоже только о количественном составе. Интереснее составленная геохимиками специальная, так называемая периодическая таблица морской воды (рис. 27), которая показывает, в каком преимущественно виде существуют образующие эту систему химические элементы и как это связано с электронной структурой (с заполненностью так называемых *d*-орбиталей). Каждый квадратик в таблице — отдельная «семья» соединений одного элемента, представленная здесь лишь «главой», так сказать, «ответственным квартиросъемщиком». Понятно, что на полное описание всех не хватило бы и огромной книги — потому нами и выбрана одна «семья».

Однако мало сказать только, что морская вода представляет собой сложную химическую систему, многокомпонентную, гетерогенную<sup>1</sup>, единую и определенным образом упорядоченную, обладающую набором всех свойств, присущих сложным системам, что структура и поведение этой системы, тесно связанные между собой, предопределены свойствами образующих ее элементов — воды и в всех природных объектов, с которыми она взаимодействует.

Гораздо интереснее разобрать следующие три вопроса, связанные с переходом от рассмотрения простых систем ко все более сложным.

1. Есть ли особенность перехода от систем сравнительно простых к сложным, от атомов Н и О к молекуле  $H_2O$ , от отдельных молекул  $H_2O$  к веществу «вода» (т. е. к ансамблю молекул) и от нее к морской воде? К какому переходу мы должны быть готовы дальше и в чем может заключаться особенность этого перехода?

При переходах от элементарных систем к более сложным, но простым, низкого порядка, нам удавалось выделить один существенный фактор, например, водородную связь. При переходе к сложным системам это сделать трудно, определяющим является весь комплекс. Наконец, при переходе ко все более сложной системе внешнее отличие ее от подсистем не столь резко

<sup>1</sup> Гетерогенными называют физико-химические системы, состоящие из двух или нескольких фаз, имеющие поверхности раздела, по которым соприкасаются однородные части системы (фазы).

бросается в глаза, потому что это отличие уже лежит в другой плоскости свойств, нежели отличия, в основном касающиеся физических свойств, при переходах между более простыми системами. Ее сложность и одновременно единство, однородность и одновременно упорядоченность, существование элемента как самостоятельной единицы и как части системы — приблизительно такого рода: вопросы становятся существенными. Причем мы пока имеем возможность оставаться в рамках чисто химических представлений и понятий. При переходе к морской воде уже обозначается необходимость выйти за эти рамки. Очевидно, что особенностью перехода к следующей более сложной системе будет конструирование ее как единого целого из подсистем, отражающих различные формы движения материи, — не только химических но и биологических, физических, механических. Эта система — океан в целом.

2. Мы ограничивались учетом только химических элементов и факторов в системе. Будет ли сконструированная таким образом, пусть даже и сложная, система адекватна природной, даже если не касаться океана в целом? Например, будет ли приготовленная нами точно по природному рецепту морская вода тождественна пробе морской воды, хранящейся в склянке, и в свою очередь будет ли последняя тождественна морской воде находящейся в природной обстановке, в океане? И интуиция, и опыт, и общие положения теории систем подсказывают, что нет, все они не тождественны. Насколько же связаны и взаимообусловлены нехимические и химические факторы? Прежде всего, как хорошо известно химия морской воды неотделима от ее биохимии и биологии и наоборот. Миллионы микроорганизмов, которые можно обнаружить даже в 1 мл морской воды, непрерывно поглощают из нее и выделяют самые различные органические и неорганические вещества, обрабатывая массу, в сотни раз превосходящую собственный вес, выбрасывая 70% обработанного продукта снова в воду, откуда он вновь утилизируется другими организмами. Структура системы без учета такого элемента, конечно же, не реалистична.

Меньше известно о взаимосвязях с физическими факторами, хотя в технике и медицине, например, используется влияние электромагнитного поля на структуру и

свойства водных систем, а в геофизических методах поиска водных источников, наоборот, используется влияние водных масс на электромагнитное поле.

Еще хуже описаны взаимосвязи с механическими — гидродинамическими факторами. Учитывается только влияние солености (через плотность) и вязкости морской воды. Именно поэтому мы подчеркивали связь вязкости со структурными особенностями системы. Можно ожидать много интереснейших открытий на пути изучения того, как влияет на гидрологическую картину океана структура системы и структурно-организационные «мелочи», в том числе химической и биологической природы. На первом Всесоюзном семинаре по моделированию морских экологических систем внимание участников привлек доклад член-корр. АН УССР В. И. Беляева<sup>1</sup> о модели, в которой учитывается, что пространственная структура и плотность популяций микроорганизмов могут влиять на поглощение солнечной радиации и через это — на гидрологические особенности верхнего слоя моря.

Однако есть и обратное, тонкое по своей природе, воздействие, которое химики пока не учитывают ни при изучении настоящего, ни при изучении прошлого океана. Движение жидкости — один из самых распространенных факторов, воздействующих на распределение находящихся в жидкости частиц, в том числе микроорганизмов и больших молекул. Рассмотрев влияние пространственной упорядоченности на свойства систем, мы теперь можем оценить значение и последствия этого тонкого воздействия. Говоря выше о том, как электростатические факторы накладываются на тепловое движение молекул, мы видели, к каким поразительным последствиям это приводит. Гидродинамические факторы тоже накладываются на тепловое движение молекул, и состояние молекул, особенно крупных, оказывается зависящим от их формы. Стержнеобразная частица, в том числе большая молекула, в ламинарном потоке вращается с некоторой угловой скоростью, которая придает преимущественную устойчивость определенным угловым положе-

<sup>1</sup> Беляев В. И., Ленин А. И., Петипа Т. С. Моделирование экосистемы пелагической части Черного моря. — В сб.: Математические модели морских экологических систем. Киев, «Наукова думка», 1974, с. 10—13.

ниям, т. е. происходит ориентация частиц, сказывающаяся на пространственной структуре системы. Если эти частицы могут образовывать химические связи, то эти связи и строение образовавшегося продукта могут зафиксировать расположение, созданное гидродинамическим потоком. «Можно предположить, что сложные структуры биологических систем несут на себе некоторый отпечаток создавших их гидродинамических потоков». «Возможно, что они способствовали закручиванию молекул биополимеров в спирали»<sup>1</sup>. Если это так, то со временем мы прочтем гидродинамику древнего океана, изучив молекулы биологических полимеров.

Но это со временем. Сейчас пока интересы ученых сосредоточены на том, чтобы описать связь кинетики реакций с гидродинамикой потока.

3. Почему, несмотря на то, что молекулы различных веществ, попадая в воду, претерпевают самые различные изменения: простые, как диссоциация  $\text{NaCl}$ , или посложнее, как диссоциация  $\text{H}_2\text{CO}_3$ , представляющая собой целую цепь обратимых реакций, или еще более сложные, на которые влияют биологические, физические и гидромеханические процессы, почему, несмотря на интенсивное течение этих процессов, концентрации различных химических веществ в морской воде меняются мало?

Чтобы ответить на этот важный вопрос, необходимо остановиться на том, что морская вода (даже хранящаяся в закрытой колбе) — не просто сложная система, а система динамическая.

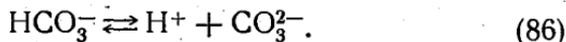
### **Почему все течет и изменяется, но выглядит неизменным. Карбонатная система**

Для того чтобы ответить на поставленные выше вопросы о причинах устойчивости химического облика океана, границах этой устойчивости и обеспечивающих ее механизмах, обратимся к основному представителю соединений углерода, вписанному в периодическую таблицу морской воды, к  $\text{HCO}_3^-$ , и проследим, как он связан по крайней мере с самыми ближайшими ему «родственниками». При этом снова обратим внимание на то, что мы следим лишь за одной углеродной «семьей»,

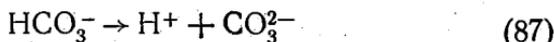
<sup>1</sup> Николаев Л. А. Основы физической химии биологических процессов. М., «Высш. школа», 1971, с. 80, 87.

предполагая увидеть в ее судьбе наиболее важные динамические особенности жизни всего химического «государства» океана.

Для упрощения ограничимся пока одним звеном преобразования, например диссоциацией  $\text{HCO}_3^-$ :



Одновременно протекают две реакции. Одна (условно скажем — прямая)

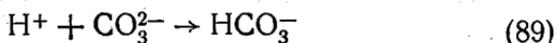


со скоростью  $r_- = -d[\text{HCO}_3^-]/dt$ . Концентрацию (моль/л), как принято в химической кинетике, будем обозначать квадратными скобками. По основному закону химической кинетики — закону действующих масс — скорость реакции пропорциональна концентрации реагирующих веществ или, в случае растворов, — их активностям (величинам, пропорциональным концентрациям). Для упрощения дальше везде не будем записывать поправку на активность. Можно считать, что она входит в константу скорости ( $k_-$ ):

$$r_- = k_- [\text{HCO}_3^-]. \quad (88)$$

Коэффициент пропорциональности  $k_-$  в уравнении (88) — константа скорости, или удельная скорость: скорость реакции при  $[\text{HCO}_3^-] = 1$ .

Для другой (условно скажем — обратной) реакции



уравнение скорости  $r_+ = d[\text{HCO}_3^-]/dt$  запишется в таком виде:

$$r_+ = k_+ [\text{H}^+] [\text{CO}_3^{2-}]. \quad (90)$$

Допустим, в колбу с чистой водой добавили какое-то количество  $\text{HCO}_3^-$ . Начнется первая реакция (прямая) со скоростью, определяемой уравнением (88), причем по мере уменьшения концентрации  $\text{HCO}_3^-$  скорость прямой реакции будет падать. При появлении первых же ионов  $\text{H}^+$  и  $\text{CO}_3^{2-}$  начнется вторая (обратная) реакция. Вначале, согласно уравнению (90), ее скорость будет мала, но по мере нарастания  $[\text{H}^+]$  и  $[\text{CO}_3^{2-}]$  скорость обратной реакции будет возрастать все больше и больше, пока скорости прямой и обратной реакций не

сравниваются. Хотя реакции продолжают непрерывно идти, концентрации всех ионов остаются неизменными и их соотношения определяются условиями наступившего динамического равновесия

$$r_+ = r_-, k_+ [\text{H}^+] [\text{CO}_3^{2-}] = k_- [\text{HCO}_3^-],$$

или

$$\frac{[\text{H}^+] [\text{CO}_3^{2-}]}{[\text{HCO}_3^-]} = \frac{k_-}{k_+} = K, \quad (91)$$

где  $K$  — константа равновесия. Если  $k_-$  и  $k_+$  учитывают коэффициенты активности, то  $K$  — термодинамическая константа равновесия (в данном случае — равновесия диссоциации). Значение ее связано с определенными термодинамическими потенциалами. Чем полнее может протекать реакция в прямом направлении, тем больше константа равновесия. В данном случае она порядка  $K \sim 10^{-11}$  (для сравнения часто используют не  $K$ , а только показатель степени без знака минус, обозначая его  $pK$ , если речь идет о константе равновесия), т. е.  $pK = 11$ . Значение  $K$  очень мало, и реакция протекает неполно, поэтому в морской воде больше 80% неорганического углерода существует в виде  $\text{HCO}_3^-$ .

Мы собирались наблюдать лишь за одной углеродной «семьей», но с первых же шагов, желая количественно описать поведение хотя бы одного «члена семьи», вынуждены следить не только за углеродными соединениями, но и за  $\text{H}^+$ . Последний, если перейти от «маленькой» системы к океану, связан такими же обратимыми реакциями с массой других веществ внутри своей «семьи» и с соединениями других элементов: кремния, бора, фосфора, серы, — все трудно перечислить в паутине связей. Этот пример иллюстрирует исключительно важный при рассмотрении природных систем принцип тотальной взаимосвязанности концентраций всех веществ в равновесной системе: в условиях равновесия концентрации всех веществ, участвующих в реакции, связаны между собой. Нельзя изменить концентрацию ни одного из них, чтобы это не вызвало такого изменения концентраций всех остальных веществ, которое приводит к прежнему численному значению константы равновесия при данных условиях.

Таким образом, устойчивым состоянием такой системы будет только равновесное состояние, когда выполняется соотношение (91).

Выведем рассматриваемую «маленькую» систему из состояния равновесия и проследим, как она откликнется на это. Пусть «возмущением» будет добавка  $H^+$ . За ответом системы можно проследить по схематическому (86) или математическому (91) изображению связей в этой системе. Из схемы (86) видно, что если увеличить  $[H^+]$ , то повысится скорость обратной реакции (89). Дополнительные количества  $H^+$  и  $CO_3^{2-}$  свяжутся в  $HCO_3^-$  и через определенное время, которое можно рассчитать из уравнений (88) и (90), вновь наступит устойчивое равновесие. Причем концентрация  $[HCO_3^-]$  повысится, а концентрации  $[CO_3^{2-}]$  и  $[H^+]$  понизятся по сравнению с возмущенным состоянием. Таким образом, ответом системы на возмущение будет сдвиг равновесия влево, стремление понизить «избыточную» концентрацию  $[H^+]$ . Такой отклик системы известен как принцип демпфирования (Ле-Шателье—Брауна): если на систему, находящуюся в устойчивом равновесии, оказывать внешнее воздействие, то в системе усилится то из направлений процесса, течение которого ослабляет влияние этого воздействия, и положение равновесия сместится в том же направлении.

На рис. 28 схематически изображена вся карбонатная система океана, от  $CO_2$  атмосферы, растворяющегося в морской воде и образующего угольную кислоту, которая диссоциирует до бикарбонат-ионов  $HCO_3^-$ , а последние — до карбонат-ионов  $CO_3^{2-}$ , которые связываются ионами  $Ca^{2+}$  в  $CaCO_3$  — плохо растворимое соединение, вплоть до звена равновесия с донными отложениями океана. Вместо изображения связей компонентов карбонатной системы с другими элементами и системами на рисунке поставлены многоточия, иначе не хватило бы рисунка, так обширны и многообразны связи системы. Обязательно пришлось бы показать, а показав, и подробно рассмотреть связи  $CO_2$ , например, с биологическими системами океана.  $CO_2$  поглощается фитопланктоном при фотосинтезе и выделяется при дыхании микроорганизмов. Уменьшение  $[CO_2]$  из-за фотосинтеза вызывает увеличение рН и влияет на равновесие всей карбонатной системы.

Используя принцип демпфирования, можно оценить, как скажется на равновесии в этой системе изменение концентрации какого-либо компонента или внешних условий, а с помощью константы равновесия — и рассчитать довольно точно отклик системы на возмущение. Отошлем интересующихся такими оценками и расчетами к учебнику по химии океана<sup>1</sup>, где можно, кроме того, почерпнуть сведения и о смещениях карбонатного равновесия в различных районах и на разных глубинах океана под действием различных причин, о смещениях,

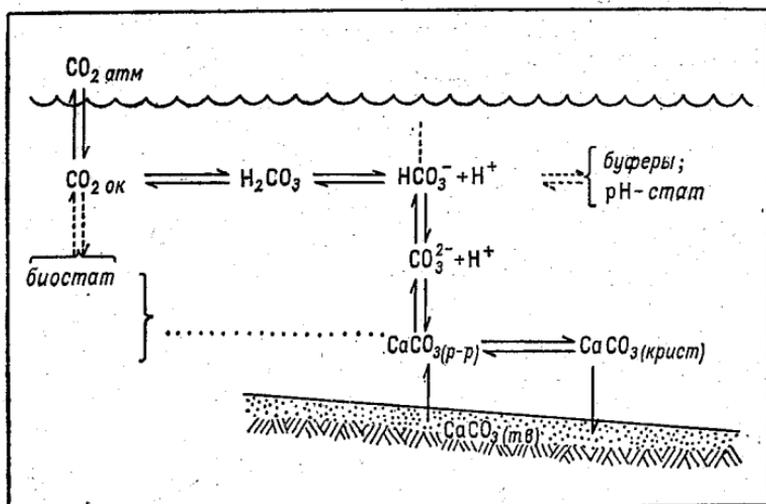


Рис. 28. Карбонатная система океана.

сопровождающихся выпадением и растворением «морского снега» — CaCO<sub>3</sub>, и о пересыщении воды углекислым газом и карбонатом кальция. Обратим внимание только на последнее. В верхних слоях океана регулярно наблюдаются устойчивые во времени пересыщения вод карбонатом кальция, достигающие 300% и выше, а в глубоководных участках океана часто наблюдаются, наоборот, устойчивые недонасыщения вод карбонатом кальция по сравнению с теми величинами, которые диктуются константой равновесия, следовательно, все-

<sup>1</sup> Алекин О. А. Химия океана. Л., Гидрометеиздат, 1966, 247 с.

ными законами термодинамики. Между тем в разобранных нами примерах показано, что устойчивым состоянием является равновесное состояние. Откуда противоречие?

Обратимся к термодинамике равновесия. Константа равновесия связана с изменением свободной энергии  $\Delta F$  соотношением

$$RT \ln K = -\Delta F$$

и с изменениями энтропии и внутренней энергии  $\Delta H$  соотношением

$$R \ln K = \Delta S - \frac{\Delta H}{T}.$$

При  $\Delta F < 0$   $K > 1$ , скорость прямой реакции  $r_-$  больше, чем скорость обратной реакции  $r_+$ :  $r_- > r_+$ . При  $\Delta F > 0$   $K < 1$ ,  $r_- < r_+$ . Условие равновесия:  $F$  минимально,  $dF = 0$ ,  $d^2F > 0$ ;  $S$  максимальна,  $dS = 0$ ,  $d^2S < 0$ . Учитывая приведенное в самом начале книги соотношение (стр. 21) энтропии и термодинамической вероятности, придем к хорошо известному из статистической механики выводу: равновесное состояние, к которому, по второму закону термодинамики, стремится всякая термодинамическая система, наиболее вероятно по сравнению с любым другим, смежным с ним состоянием, при данных условиях.

Другие состояния менее вероятны, менее устойчивы, и переход к ним из состояния устойчивого равновесия всегда связан с необходимостью затраты работы. Так, если подбросить пирамиду, то наиболее вероятно, что она, упав, будет стоять на одном из оснований, а не на вершине, «вниз головой», и перевод ее в менее устойчивое состояние — основанием вверх — потребует работы. Дым от сигареты стремится рассеяться, т. е. система аэрозоли — воздух стремится снять наведенную курительщиком упорядоченность, неравномерность в ней, стремясь к максимуму меры неупорядоченности — энтропии. Как было подмечено богословом Ламишниним, без апеллирования к энтропии: «Во вселенной превалирует разрушение над созиданием, и вещество стремится к рассеянию»<sup>1</sup>.

<sup>1</sup> Дулуман Е. К. Идея бога. М., «Наука», 1970, с. 54.

Однако в океане вопреки всему мы обнаруживаем явные нарушения этих законов: наличие упорядоченности вопреки энтропийным тенденциям.

Вслед за биологами, хронологически сделавшими это раньше (см. гл. III), построим химическую пирамиду масс: выпишем концентрации основных форм, в каких встречается углерод в океане и над ним. Так как придется сопоставлять газовую фазу с жидкой, выразим

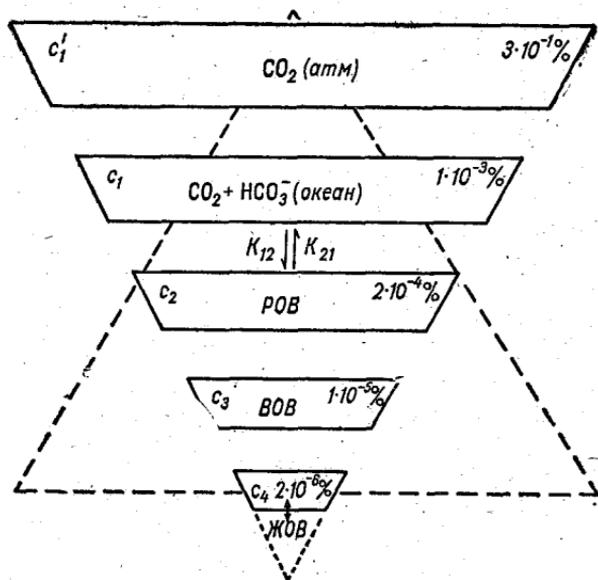


Рис. 29. Пирамида масс (по К. М. Хайлову) и пирамида упорядоченности (пунктир).

РОВ — растворенное органическое вещество, ВОВ — взвешенное органическое вещество, ЖОВ — живое органическое вещество.

концентрации в процентах и обозначим их значками  $c_i$  (рис. 29). Пирамида, выстроенная по концентрациям форм углерода — сплошные линии — обратна пирамиде, выстроенной по признаку усложнения, упорядочения этих форм (пунктир) от  $\text{CO}_2$  атмосферы до взвешенного органического вещества и далее (см. гл. III). Соотношения мало изменяются во времени, они устойчивы. Постоянный уровень этих термодинамически неустойчивых

сложных образований океан поддерживает за счет работы своих биологических систем, использующих световую энергию. Чем выше уровень упорядоченности форм соединений углерода, тем большая работа на их образование затрачивается и поэтому тем меньше их концентрация. Такую работу совершает, например, живая клетка — термодинамически неравновесная система, она может поддерживать устойчиво свое существование только непрерывным обменом веществ с окружающей средой — метаболизмом. Отсутствие метаболизма означает смерть, и бывшая некогда живой, система, ставшая «закрытой», деградирует, спускаясь по ступеням пирамиды масс к уровням все меньшей упорядоченности, все большей энтропии и термодинамической устойчивости — от уровня  $c_4$  до уровня  $c_1$ .

Океан, как и клетка, ведет интенсивный обмен веществами — с дном, материками, атмосферой. Как клетка перераспределяет химические вещества между компонентами тела, так и океан в состоянии перераспределять соединения углерода между своими химическими и биологическими системами и транспортировать их во внутренние, сравнительно инертные, пределы океанической массы от областей активного внешнего обмена веществом и энергией. Активные слои океана, естественно, прилегают к его поверхностям раздела с атмосферой, берегами, дном, через которые ведется обмен и вблизи которых поэтому наблюдается максимальное разнообразие условий и максимальная концентрация высокоорганизованных форм вещества. Благодаря подвижности океанической массы эти активные слои распространяются от поверхностей раздела на значительные расстояния как по горизонтали, так и по вертикали. Но размеры океана намного превышают протяженность активных слоев, и основная часть океана, глубинная и удаленная от берегов, была бы совсем инертной, если бы не внутренние поверхности раздела, которые, как и в живой клетке, играют внешне незаметную, но незаменимую роль. Это — поверхности фронтов течений и «инородных» вод, границы с твердыми объектами, большими, как острова, или микроскопическими, как взвешенные в морской воде частицы, детрит. Влияние островов заметно и невооруженному глазу — это вспышка растительной и животной жизни среди гораздо менее

активных океанических просторов. Существует даже термин — «островной эффект». Термина «детритный эффект» не существует. Эти поверхности раздела скрыты от глаза. И как всегда люди забывают о глобальных последствиях особенностей микромира. Между тем эти поверхности раздела имеют совершенно уникальные особенности. Они повсеместны в океане. Их общая площадь при микроскопических размерах самих частиц превышает суммарную площадь всех остальных поверхностей раздела вместе взятых, включая признаваемую наиболее «важной» поверхностью океан — атмосфера. Естественно — внутренние поверхности раздела в клетке превышают площадь ее наружного покрова, иначе вряд ли она могла бы жить. Легко подсчитать, что если  $1 \text{ см}^3$  твердого тела с площадью поверхности соответственно кубу  $6 \text{ см}^2$  измельчить до кубиков размером с глинистые частицы (ребро  $0,001 \text{ мм}$ ), то общая поверхность образовавшихся частиц станет равной  $60\,000 \text{ см}^2$ . Благодаря тому что силы молекулярного притяжения на поверхности не полностью уравновешены взаимодействием соседних молекул, любые поверхности раздела активны. Великий термодинамик Гиббс говорил о сгущении свойств и термодинамических характеристик на поверхностях раздела фаз. Особенно активны свежесформированные поверхности, так как на них могут образовываться свободные радикалы — сверхактивные химические частицы.

В лабораториях они иногда вызывают, подобно электрической искре, взрыв горючих смесей, хранящихся в колбе, если в ней образовалась свежая трещина. Поверхностный слой (фактически пленка) кристаллических тел и металлов (слой Бэйлби) аморфизирован и вещество в этих слоях проявляет чрезвычайную химическую активность. Например, растворимость аморфизированного слоя кварца в 20 раз выше чем нижерасположенных кристаллических слоев. В химических лабораториях активные поверхности находят разнообразное применение.

Некоторые процессы полимеризации, обычно проводимые в «жестких» специальных условиях, удается вести в лабораториях при нормальной, комнатной температуре, если использовать активную поверхность даже обычной тонкоразмолотой соли. Трудно предположить,

чтобы в химической лаборатории океана природа пренебрегала такими возможностями. Не в этом ли кроется недостающее энергетическое звено для объяснения самопроизвольного образования в древнем океане биологических полимеров? Пока ученым для объяснения этого приходится прибегать к чрезвычайным обстоятельствам, таким, как электрические атмосферные разряды, хотя их роль, как отмечено выше, вполне может сыграть простая трещина на поверхности частицы. И не явится ли разгадка тайн химии моря одновременно разгадкой тайны происхождения жизни? Не могло бы отправной точкой для построения модели биосферы послужить представление о Земле, как о космической кристаллической частице с аморфизированным активным слоем — биосферой? Тогда модель океана была бы сложным блоком в общей модели биосферы. По-видимому, есть также глубокая аналогия между поверхностными аморфизированными слоями и активным поверхностным слоем океана.

Можно попытаться построить простейшую схематическую модель пространственной, горизонтальной и вертикальной структуры океана с однородным, аморфизированным активным слоем на его поверхностях раздела.

При простейшем («ламинарном») режиме транспорта вещества и энергии между однородным активным и однородным максимально удаленным от поверхностей раздела слоями уравнением динамики для переходного между ними слоя будет уравнение первого порядка, при одномерной модели (одна пространственная координата):

$$-\frac{\partial c_i}{\partial t} = -W \frac{\partial c_i}{\partial l} + f(c_i).$$

Здесь  $c_i$  — набор отдельных свойств различной природы,  $W$  — составляющая скорости транспорта,  $l$  — расстояние от границы активного слоя по горизонтали или по вертикали,  $f(c_i)$  — положительный или отрицательный источник.

Функции источника  $f(c_i)$  могут быть самыми разнообразными. При простейших видах  $f(c_i)$  и при условии стационарности ( $\partial c_i / \partial t = 0$ ) общим решением уравнения будет одноэкспоненциальная функция, т. е. переходный режим с монотонным затуханием — понижением или

повышением  $c_i$  до стационарного значения по мере удаления от границы активного слоя, в зависимости от граничного условия. Соответствующие этому кривые приведены на рис. 30. Действительно, многочисленные и разнообразные свойства обнаруживают именно такой общий характер горизонтального и вертикального распределения: понижающиеся кривые характерны для тех компонентов и свойств, которые повышены в активном

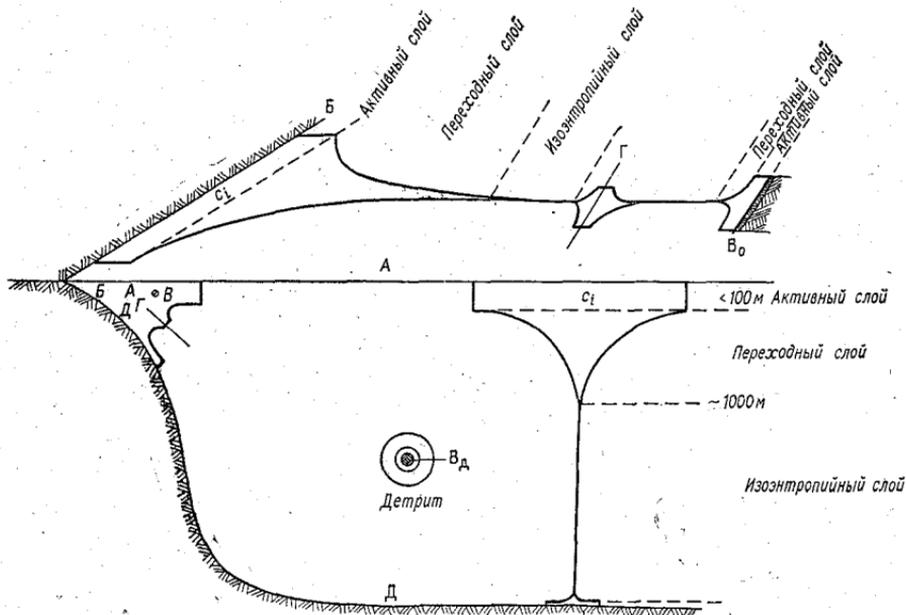


Рис. 30. Пространственное изменение активности процессов и концентраций компонентов  $c_i$  с удалением от поверхности раздела: А — с атмосферой; Б — с берегом; Д — с дном.  $B_0$  — внутренняя граница островная;  $B_d$  — внутренняя поверхность раздела детрит — вода; Г — гидрологическая граница.

В прибрежье — комбинация максимального числа различных поверхностей раздела.

слое за счет работы организмов — это сложные структуры и связанные с ними процессы (биомассы, продукция, концентрации органического вещества, скорость биохимического потребления кислорода) или за счет обмена со средой (температура, концентрация солей); повышающиеся кривые — для тех, которые понижены в

активном слое за счет работы организмов (биогенные элементы) или обмена со средой (также температура, концентрация солей). Еще более точная картина получится, если учесть турбулентный перенос в открытой системе.

Таким образом, учет того, что система открыта для обмена веществом и энергией, позволяет набросать общую упрощенную картину упорядоченной пространственной структуры океана.

### Открытая система. Хемостат

Океан, как и клетка, является открытой системой, открытой для обмена веществом и энергией с окружающей средой (для внешнего метаболизма), и следовательно, он должен обладать определенными свойствами, характерными для любых открытых систем, делающими их похожими друг на друга. Чтобы отчетливо представить себе особенность этих свойств, сравним динамику процесса в открытой и закрытой (для обмена веществ) системах. Для примера возьмем двуокись углерода, растворенную в морской воде. Пример закрытой системы — фотосинтез в закрытой склянке, в которой из живых организмов находятся только фотосинтезирующие водоросли. Если концентрация водорослей постоянна, то скорость фотосинтеза, регистрируемая по убыли двуокиси углерода, прямо пропорциональна наличной концентрации  $\text{CO}_2$ , ( $c_1$ ):

$$r_1 = - \frac{dc_1}{dt} = k_{12}c_1. \quad (92)$$

Начальное условие  $c_1 = c_1(0)$  при  $t = 0$ .

Значение интеграла можно найти в таблице интегралов. Получим

$$c_1 = c_1(0)e^{-k_{12}t}. \quad (93)$$

По виду уравнения (93) можно легко предсказать, что же произойдет с  $\text{CO}_2$  в закрытой системе. С увеличением времени  $t$  экспонента, а значит и  $c_1$  постепенно становятся все меньше. При достаточно большом времени опыта, в крайнем случае при  $t$ , стремящемся к бесконечности ( $t \rightarrow \infty$ ), экспонента равна нулю, и следовательно,  $c_1 = 0$ .

Можно не прибегать к интегрированию, чтобы получить точную зависимость  $c_1$  от  $t$ , а воспользоваться какой-нибудь хорошо известной из практического опыта аналогией. Такой метод, называемый методом аналогового моделирования, широко и эффективно используется при изучении различных динамических систем. Например, опыт с «дырявой кастрюлей» (рис. 31). Уровень воды  $h$  в такой кастрюле, аналогичный по математическому смыслу концентрации  $c_1$ , понижается со временем, по уравнению (92), тем быстрее, чем выше

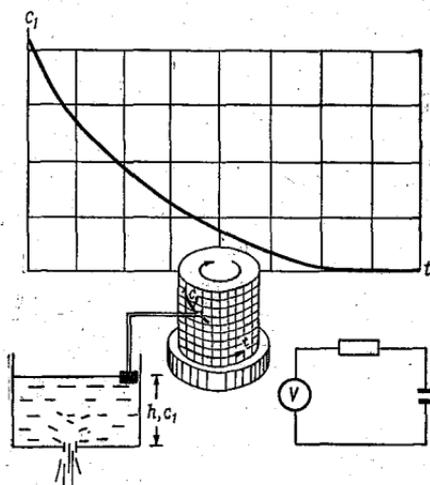


Рис. 31. Гидродинамическая и электрическая модели реакции (92) в закрытой системе.

уровень воды и чем больше величина отверстия, которая аналогична константе скорости  $k_{12}$ . Такой метод, называемый гидродинамическим моделированием, успешно использовался до недавнего времени для самых серьезных и важных расчетов. Или же хорошо известно даже из школьного курса обстоятельство, что напряжение  $U$  в электрической  $RC$ -цепи падает точно в соответствии с уравнением (92):

$$-\frac{dU}{dt} = \frac{1}{R} U, \quad (92')$$

напряжение  $U$  аналогично концентрации  $c_1$ , а величина  $1/R$  аналогична константе скорости  $k_{12}$ .

Этот метод благодаря скорости электрических процессов и возможности простой, точной, надежной и наглядной регистрации результатов на самописцах или на цифропечатающих устройствах широко используется в настоящее время. Самописец, соединенный с потенциометром или с поплавком в «дырявой кастрюле», проинтегрировав уравнение (92), начертит точно по уравнению (93) график зависимости концентрации  $\text{CO}_2$  от времени опыта в виде кривой, изображенной на рис. 31 (напомним, для закрытой системы).

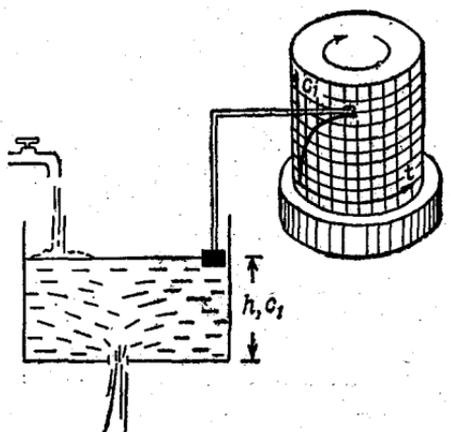


Рис. 32. Гидродинамическая модель реакции (94) в открытой системе.

Теперь легко можно промоделировать этот процесс для условий открытой системы. Подсоединим к «дырявой кастрюле» кран и приоткроем его (рис. 32). Очевидно, если мы достаточно открыли кран и дыра в кастрюле не слишком велика, несмотря на то, что часть воды из кастрюли выливается, в ней начнет прибывать вода. Но по мере того, как уровень воды будет повышаться, скорость оттока воды через дырку, пропорциональная уровню воды, тоже будет возрастать. Наконец, наступит момент, когда скорость притока воды из крана и скорость оттока воды через дырку станут совершенно одинаковыми и уровень воды закрепится на одном, определенном месте, а именно на месте, определяемом скоростью потока из крана и величиной дыры в кастрюле. Здесь существенны два обстоятельства. Первое: этот

постоянный, **стационарный**, уровень может сохраняться неизменным как угодно долго, пока не изменится поток из крана. Второе: получим совершенно тот же по величине стационарный уровень, если в любой момент времени — в самом начале, как только открыли кран, в середине или в конце, когда установился стационарный уровень, — плеснем в кастрюлю дополнительную порцию воды, причем как угодно большую, пусть даже кастрюля наполнится до краев. Если при этом уровень воды превысит тот самый предопределенный притоком из крана и дырой (т. е. кинетическими параметрами) стационарный уровень, то при такой высоте уровня воды в кастрюле напор будет велик, и скорость истечения воды через дыру превысит скорость притока воды из крана — уровень начнет понижаться и до тех пор, пока не займет свое предопределенное положение. Такое свойство открытых систем — предопределенность стационарного состояния кинетическими параметрами и независимость его от состояния системы в достационарное время — называется эквифинальностью. Аналогично этому будет и поведение нашей открытой химической системы, динамику которой мы уже промоделировали, имея в виду, что изменение уровня воды в кастрюле **аналогично** изменению концентрации вещества в морской воде, приток из крана — поступлению вещества в океан, а отток через дырку — исчезновению вещества из морской воды.

Оставим, однако, аналоговые модели для более сложных задач, тех, аналитическое решение которых (т. е. точное математическое решение в виде формул) получить очень трудно либо вообще невозможно. Пока сложность задачи позволяет получить формулу, даже приближенную, ее стоит получить, потому что аналитическое решение обладает определенным достоинством, которого не знает даже мощнейшая ЭВМ, а именно — общностью, тем, что исследователь не связан с конкретными цифрами и параметрами. Начнем анализ открытой системы опять с растворенной  $\text{CO}_2$ , потом попытаемся обобщить результат. Предельно упростим задачу, пренебрежем для этого обратным потоком  $k_{21}$  и остальной частью карбонатной системы. В левой части уравнения запишем то, что нас интересует: скорость изменения концентрации  $\text{CO}_{2,01}$ :  $:dc_1/dt$ . В правой части сведем баланс: мы должны при наших упрощениях учесть обмен  $\text{CO}_2$  с атмосферой и по-

требление  $\text{CO}_2$  на фотосинтез. Таким образом, учитываем в приходной части: 1) скорость образования  $\text{CO}_2$  в системе равна нулю  $r_{1,(+)} = 0$ ; 2) скорость поступления  $\text{CO}_2$  из атмосферы  $w_{1,(+)}$  пропорциональна ее растворимости  $\gamma_1$  при данных условиях и ее концентрации  $c_1'$  в атмосфере  $w_{1,(+)} = \alpha_1 \gamma_1 c_1'$ ; в расходной части: 1) скорость расходования  $\text{CO}_2$  на фотосинтез, как уже делали, примем равной  $r_{1,(-)} = k_{12} c_1$ ; 2) выделение  $\text{CO}_2$  в атмосферу со скоростью  $w_{1,(-)} = \delta_1 c_1$ .

Теперь запишем балансовое уравнение, приведя его к виду, удобному для обобщения:

$$\begin{aligned} \frac{dc_1}{dt} &= r_{1,(+)} + w_{1,(+)} - r_{1,(-)} - w_{1,(-)} = \\ &= \alpha_1 \gamma_1 c_1' - k_{12} c_1 - \delta_1 c_1 = \alpha_1 \gamma_1 c_1' - (k_{12} + \delta_1) c_1. \end{aligned} \quad (94)$$

Если бы мы хотели учесть еще какие-либо статьи баланса, мы аналогично добавили бы в правую часть соответствующие слагаемые. Уравнение (94) можно решить очень легко, если считать величину  $c_1'$  постоянной.

Интегрируя уравнение (94) при начальном условии  $c_1 = c_1(0)$  при  $t = 0$ , получим:

$$c_1 = \frac{\alpha_1 \gamma_1 c_1'}{k_{12} + \delta_1} - \left( c_1(0) - \frac{\alpha_1 \gamma_1 c_1'}{k_{12} + \delta_1} \right) e^{-(k_{12} + \delta_1) t}. \quad (95)$$

В отличие от закрытой системы, как это и предсказано гидродинамической моделью, здесь при достаточно большом времени  $t \rightarrow \infty$ , когда экспоненциальный член становится равным нулю, значение  $c_1$  перестает понижаться и действительно достигает предела (обозначим его  $\bar{c}_1$ ):

$$\bar{c}_1 = \frac{\alpha_1 \gamma_1 c_1'}{k_{12} + \delta_1}, \quad (96)$$

т. е. со временем в открытой системе концентрация  $c_1$  достигает стационарного значения  $\bar{c}_1$ , причем это значение  $\bar{c}_1$  не зависит от самой наличной концентрации  $\text{CO}_2$  в морской воде, а определяется концентрацией ее в атмосфере ( $c_1'$ ) и кинетическими параметрами (эквивиальность). Предположим, что внезапно произошло возмущение в момент времени  $t_1$ : разовое увеличение концентрации  $\text{CO}_2$ , например, из-за вулканического выброса в

океане (кривая 1 на рис. 33) или уменьшение  $c_1$ , например, из-за резкой интенсификации фотосинтеза (кривая 2 на рис. 33). Тогда, согласно уравнению (95), концентрация  $\text{CO}_2$  ( $c_1$ ) постепенно автоматически выравняется до прежнего стационарного уровня  $\bar{c}_1$  сверху (кривая 1) или снизу (кривая 2) соответственно, независимо от того, до каких значений произошло первоначальное изменение концентрации  $\text{CO}_2$ ; ее стационарное значение соответственно принципу эквифинальности predeterminedено кинетическими параметрами.

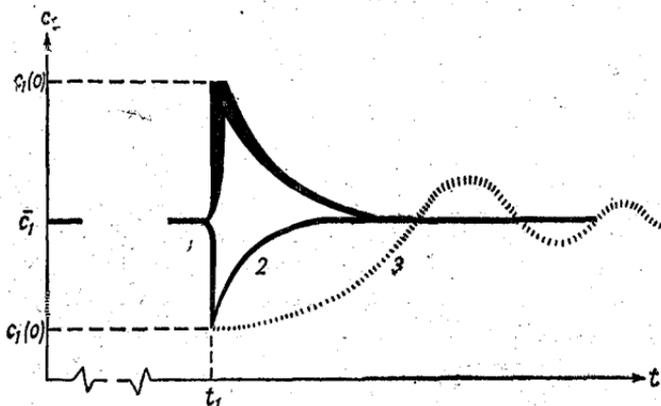


Рис. 33. Переходный процесс в открытой динамической системе первого — кривые (1), (2) и более высокого — кривая (3) порядка после возмущения в момент времени  $t_1$ , в результате которого произошло повышение (1) или понижение (2) концентрации  $c_1$  от стационарной  $\bar{c}_1$  до  $c_1(0)$ .

Легко заметить, что временные переходные характеристики, представляемые этими кривыми на рис. 33, аналогичны пространственным переходным характеристикам на рис. 30. Суть аналогии ясна — и в том и в другом случае речь идет о переходе соответственно во времени и в пространстве от возмущенного состояния к стационарному, эквифинальному. Оба рисунка совместно дают представление о пространственно-динамической структуре океана, о саморегулировании в нем и о причинах его устойчивости.

Из уравнения (94) стационарное значение  $\bar{c}_1$  легко получить без всякого интегрирования, просто из условия

стационарности. Перепишем, учитывая условие стационарности ( $dc_i/dt = 0$ ), уравнение (94), отметив черточкой стационарные  $c_i$ . Получим алгебраическое уравнение

$$\alpha_i \gamma_i c_i' - (k_{i2} + \delta_i) \bar{c}_i = 0, \quad (94')$$

решим его

$$\bar{c}_i = \frac{\alpha_i \gamma_i c_i'}{k_{i2} + \delta_i}. \quad (96')$$

Выражения (96') и (96) полностью совпадают.

Используя этот простой способ, покажем, что вся система в целом, со всеми ее химическими компонентами, эквививальна и что океан, следовательно, подобно живой клетке, стремится в ответ на возмущение вернуться в определенное природными условиями стационарное состояние. Не будем при этом ограничивать какими-то определенными химическими компонентами и определенными видами обмена веществ — это может быть и речной сток, и обмен с атмосферой, и обмен с дном.

Для  $n$  компонентов этой системы, в том числе для изображенных на рис. 29, аналогично выше описанному может быть выписано  $n$  линейно независимых дифференциальных уравнений, совокупность которых полностью описывает динамику системы:

$$\begin{aligned} \frac{dc_i}{dt} &= r_{i, (+)} - r_{i, (-)} + w_{i, (+)} - w_{i, (-)} = \\ &= \alpha_i \gamma_i c_i' + w_{i, (+)} - (k_{i, i+1} + \delta_i) c_i \\ &\quad (i = 1, 2, \dots, n), \end{aligned} \quad (97)$$

где  $r_{i, (+)}$ ,  $r_{i, (-)}$  — скорости соответственно образования и расходования  $i$ -того компонента;  $c_i$ ,  $c_i'$  — концентраций компонентов соответственно в системе и вне ее, откуда этот компонент поступает в систему;  $\alpha_i$ ,  $\gamma_i$ ,  $\delta_i$  — коэффициенты, вид которых зависит от того, каким образом реализуется обмен веществ с окружающей средой (некоторые из них могут быть равными нулю или единице).

Из общей совокупности уравнений (97) можно определить все стационарные концентрации  $c_i$ , пренебрегая

для этого производными  $dc_i/dt$ , как в (94'), и решая полученную таким образом систему алгебраических уравнений:

$$\begin{aligned}
 & r_{i, (+)}(\bar{c}_1, \bar{c}_2, \dots, \bar{c}_n) - r_{i, (-)}(\bar{c}_1, \bar{c}_2, \dots, \bar{c}_n) + \\
 & + w_{i, (+)}(\bar{c}_1, \bar{c}_2, \dots, \bar{c}_n, c'_1, c'_2, \dots, c'_n) - \\
 & - w_{i, (-)}(\bar{c}_1, \bar{c}_2, \dots, \bar{c}_n, c'_1, c'_2, \dots, c'_n) = 0 \\
 & (i = 1, 2, \dots, n).
 \end{aligned} \tag{98}$$

Так как уравнение (98) не содержит начальных и текущих концентраций  $c_i(0)$ ,  $c_i$ , то определяемые из уравнения (98) стационарные концентрации  $\bar{c}_i$  никак не зависят от начальных  $c_i(0)$  и вообще от концентраций компонентов в любой момент времени. Таким образом, для всей системы в целом выполняется принцип эквифинальности.

Но трудно предполагать, чтобы приток веществ в океан всегда был постоянным. Другими словами, в нашей гидродинамической модели (см. рис. 32) кран, скорее всего, пульсирует. Если интервалы между пульсациями гораздо больше, чем время «ответа» системы — время ее возвращения в прежнее состояние, то такие возмущения никак не скажутся на состоянии системы, даже если приток из крана соизмерим с количеством воды в кастрюле. В случае же океана приток ничтожен по сравнению с его массой, и даже частые «пульсации» не скажутся на его химическом облике.

Читатель мог бы промоделировать реакцию системы, скажем, на экспоненциально растущее возмущение — загрязнение океана.

Если из рис. 29 для упрощения изолировать элементы  $c'_1, c_1, c_2$  от остальной части системы и рассматривать как прямой ( $k_{12}$ ), так и обратный ( $k_{21}$ ) потоки, то при термодинамически устойчивом равновесии должно быть

$$\frac{c_2}{c_1} = \frac{k_{12}}{k_{21}} = K,$$

где  $K$  — константа равновесия. Аналогично предыдущему, из уравнений (97) легко показать, что соотношение стационарных концентраций  $\text{CO}_{2, \text{ок}}$  и растворенного

органического вещества (РОВ) определяется выражением

$$\frac{\bar{c}_2}{\bar{c}_1} = \frac{k_{12} - A}{k_{21} - A}, \quad (99)$$

где

$$A = \delta_1 \delta_2 / (\alpha_1 \gamma_1 c_1' + \alpha_2 \gamma_2 c_2'),$$

т. е. отношение стационарных концентраций  $\bar{c}_2/\bar{c}_1$  не равно константе равновесия  $K = k_{12}/k_{21}$ , как это должно быть при условии термодинамического равновесия. Эти выводы можно распространить и на всю систему целиком, т. е., несмотря на протекающие процессы трансформаций соединений углерода, в системе как угодно долго могут поддерживаться термодинамически неравновесные концентрации веществ. Океан, таким образом, как и клетка, как и любой живой организм, является «хемостатом», термодинамически неравновесной системой, сохраняющейся в стационарном состоянии благодаря обмену веществ с окружающей средой; это термодинамически неравновесное стационарное состояние и есть его «жизнь». Напрашивается вопрос: нельзя ли рассчитать, как долго будет сохраняться это состояние стационарности. Клетке удастся сохранять его сутками и годами, организму — десятками и сотнями лет. А океану? Можно ли рассчитать предопределенное параметрами системы (как и в случае клетки, организма) время жизни океана? Пока не известно.

Обычно химики, когда нет ни теоретической, ни экспериментальной опоры, апеллируют к массам элементов системы. Последуем этому пути: масса клетки  $1 \cdot 10^{-18}$  —  $1 \cdot 10^{-20}$  кг, время жизни сутки  $\times n$ ; масса организма  $n \cdot 10^{-1}$  —  $n \cdot 10^2$  кг, время жизни  $n$  —  $n \cdot 10^2$  лет; масса океана  $2 \cdot 10^{21}$  кг, «время жизни» больше  $10^{10}$  лет. «Прожито»  $3$  —  $5 \cdot 10^9$  лет. Так что океан еще пока молодой организм в расцвете сил?

Конечно, приведенные выражения и рисунки до чрезвычайности упрощают картину, хотя и передают основной смысл и тенденцию. Стационарные концентрации, конечно же, не достигаются плавным монотонным изменением, аналогичным кривым 1 и 2 на рис. 33 (здесь, преднамеренно упрощая картину, представляем рассмат-

риваемую систему как динамическую систему первого порядка). В действительности же ее порядок заведомо выше первого. Кривая 3 на рис. 33 отражает реакцию более сложной системы на то же самое возмущение. Как мы видим, в этом случае переходный процесс от возмущенного состояния к стационарному может носить иной характер, например может оказаться колебательным. Однако для нас сейчас существенно лишь то, что в этом случае, при затухающих колебаниях, принцип эквивалентности не нарушается, а при колебаниях незатухающих действует принцип сохранения средних значений — система устойчива.

Наивно было бы полагать, что замечательная устойчивость «параметров» океана обеспечивается только этими принципами. В действительности, кроме этих мощных, но грубых механизмов регулирования, на каждом уровне системы функционируют специальные механизмы тонкой регулировки, причем обычно обеспечивается многократная и разнообразная подстраховка — залог надежности работы всей системы. Эту автоматику с подстраховкой можно увидеть, проследив за ионами  $H^+$ .

### Система автоматического регулирования pH

Концентрация водородных ионов в океане чрезвычайно низка:  $2 \cdot 10^{-8}$  —  $4,5 \cdot 10^{-9}$  г/л, ниже почти всех других элементов, присутствующих в морской воде, в том числе серебра, урана и даже редких элементов — лантана, иттрия, церия. Несмотря на это, она является важнейшим условием нормального развития биологических и биохимических процессов,  $[H^+]$  определяет их оптимум, а также форму существования борной, кремневой, фосфорной и других кислот, стабильность ионов большинства металлов в воде, корродирующее действие морской воды на горные породы, металл, бетон и другие свойства морской воды. Одним словом, значение  $H^+$  для морской воды не ниже, чем для крови и организма. Поражает несоответствие между важнейшим «постом» этой химической единицы и ничтожностью (сравнительной) ее количества в океане. Казалось бы, при столь низкой концентрации водородных ионов судьба их должна бы быть чрезвычайно подвержена слепой игре геохимических, биохимических и дру-

гих обстоятельств. А раз  $[H^+]$  определяет течение химических и биохимических процессов, то и они в свою очередь, казалось бы, должны быть чрезвычайно нерегулярны и неопределенны. Действительно, при столь низкой концентрации водородных ионов достаточно, как это кажется очевидным, добавить еще совсем немного водородных ионов в количестве, скажем,  $1 \cdot 10^{-8} - 1 \cdot 10^{-7}$  г на 1 л воды, и их концентрация изменится соответственно на один или два порядка (дальше, чтобы не утруждать себя нагромождением цифр, будем оперировать порядками без знака, т. е. показателями степени — это и есть рН, например, вместо  $[H^+] = 10^{-8}$  будем просто говорить: порядок 8 или рН = 8). Итак, мы ждем изменения рН до 7 или 6 соответственно величине добавки. В действительности же мы с трудом заметим отклонение рН от 8 — настолько оно будет незначительным. Чтобы сдвинуть рН всего лишь на 2 единички, потребуется добавить водородных ионов (в виде кислоты) в миллион (!) раз больше, чем их имеется, т. е. в Черное море вылить половину Аральского моря из чистой соляной кислоты. Такого в природе не бывает. И то Черное море нужно изолировать, перелить в колбу, иначе все равно по известному нам теперь принципу эквивиальности через некоторое время рН снова выравняется до прежнего стационарного значения 8, если только мы не будем непрерывно и бесконечно выливать по ведру соляной кислоты, объемом в половину Аральского моря, изменив этим кинетические параметры системы. Заметим попутно, что для стационарности рН, как и других показателей, гораздо опаснее пусть и совсем небольшое, но непрерывное воздействие, т. е. изменение кинетических параметров, чем спорадический, пусть и гигантский катаклизм. Именно потому несущественны природные катаклизмы типа гигантских подводных вулканических извержений, выбрасывающих гигантскую массу того же водорода, но чрезвычайно опасно по своим последствиям непрерывное промышленное загрязнение океана, происходящее в настоящее время. От первого (но не от второго), как мы видели, природа выработала автоматическую систему защиты.

В защите такого микрокомпонента, как ионы водорода, важную роль играет рассмотренная выше мощная химическая карбонатная система автоматического регулиро-

вания, которая подключает на помощь к тому же ресурсу атмосферы и океанического дна. Эта система представляет собой, как мы видели, последовательность обратимо связанных химических процессов, изображенных на рис. 28. Если на подобную систему воздействовать извне, то, согласно принципу демпфирования, в системе усилится то из направлений процесса, течение которого ослабляет влияние произведенного воздействия. Это очень распространенный и надежный механизм саморегулирования рН растворов. В нашем случае, если мы добавляем водородные ионы, усиливается направление процесса, ослабляющее наше воздействие: равновесие смещается к левому краю, водородные ионы связываются в угольную кислоту  $\text{H}_2\text{CO}_3$ , увеличивается образование растворенного углекислого газа и вслед за этим — выделение его в атмосферу.

Видимо, важнейшим обстоятельством в «защите» водорода в океане является то, что морская вода — буферный раствор. Химики называют буферным раствором раствор с устойчивой концентрацией водородных ионов, с устойчивым рН, почти не зависящим от разбавления раствора и слабо изменяющимся при добавлении кислоты и щелочи

Буферные растворы — обязательная принадлежность всех химических лабораторий мира. Их составляют из раствора слабо диссоциирующей кислоты и ее соли.  $\text{HCO}_3^-$ , обладая  $\text{pK} = 11$ , является такой кислотой. Солей-бикарбонатов океану не занимать. Из этого в химической лаборатории океана и готовится буферный раствор. В чем механизм его действия?

Мы уже записывали условие равновесия диссоциации:

$$K = \frac{[\text{H}^+][\text{CO}_3^{2-}]}{[\text{HCO}_3^-]}.$$

Поскольку океан многократно перестрахован, и наряду с карбонатным буфером в нем имеется много других — силикатный, боратный, фосфатный и т. д., и даже ведется спор среди ученых — какой из буферов важнее, будем записывать в общем виде условие равновесия,

изображая не конкретную кислоту и соль, а в общем виде — кислоту как  $\text{HX}$ , а соль как  $\text{MX}$  ( $\text{M}$  — металл)

$$K = \frac{[\text{X}^-][\text{H}^+]}{[\text{HX}]} \quad (100)$$

Соль  $\text{MX}$  диссоциирует очень сильно и настолько увеличивает концентрацию анионов  $\text{X}^-$ , что, по принципу демпфирования, диссоциация самой кислоты практически полностью подавляется:



Поэтому практически  $[\text{X}^-] = [\text{MX}]$ , значит из (100) получим

$$[\text{H}^+] = K \frac{[\text{HX}]}{[\text{MX}]} \quad (101)$$

Если разбавить теперь морскую воду в 100 раз, то, поскольку и  $[\text{HX}]$  уменьшится в 100 раз, и  $[\text{MX}]$  тоже уменьшится в 100 раз,  $[\text{H}^+]$ , а значит и  $\text{pH}$ , почти не изменится. В действительности  $\text{pH}$  морской воды должен измениться на 0,1 — из-за изменения степени диссоциации соли  $\text{MX}$ .

Точно таким же буферным раствором, как морская вода, оказывается и кровь.

Аналогии между морской водой и кровью распространяются, таким образом, не только на их состав, но и на механизмы регуляции состава, и даже на функциональную роль их важнейших компонентов: выше упоминалось о роли органических веществ; о роли ионов водорода мы рассказали только что; о роли растворенных газов приведем слова одного из крупнейших океанологов Харвея: «Ясно выступают два свойства морской воды, характеризующие ее как жизненную среду для растений и животных. Она содержит легко доступный запас угольной кислоты, подобно тому, как кровь содержит запас кислорода. Организмы могут забирать угольную кислоту из воды или отдавать ее в воду, и если эти изменения не выводят из известных пределов, то они вызывают лишь очень незначительные сдвиги в концентрации водородных ионов».<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Харвей Х. В. Биохимия и физика моря. Л., Изд. АН СССР, 1933, с. 79.

А если они все-таки вышли «из известных пределов», если бы, предположим невероятное, отказали бы надежные буферные системы? Посмотрим, как поведет себя океан, если, например, биомасса и активность организмов оказались бы огромными и их деятельность повлияла бы на рН слишком заметно, а буферная система отказала.

Все биохимические процессы имеют узкий интервал оптимальных рН, ниже и выше которого рН резко тормозит работу ферментов  $F$  (рис. 34), разлагающих белки полисахариды и другие макромолекулы  $C_{i-1}$  до осколков

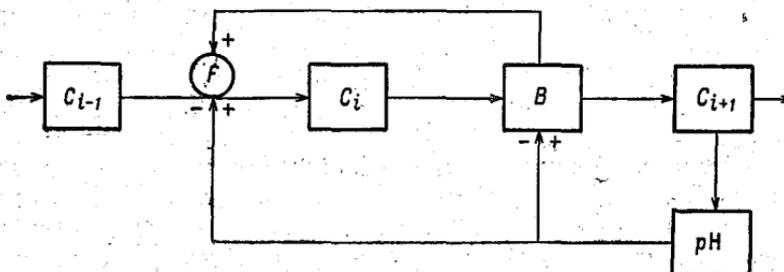


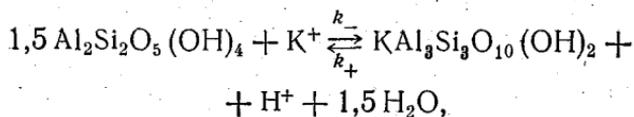
Рис. 34. Блок-схема связей в системе: органические вещества — микроорганизмы — рН.

$C_{i-1}$  — органические макромолекулы;  $C_i$  — их осколки;  $C_{i+1}$  — метаболиты;  $B$  — микроорганизмы;  $F$  — выделяемые ими ферменты.

$C_i$ , служащих пищей микроорганизмам  $B$ , тормозит собственное развитие и жизнь организмов, подавляет ее. Таким образом, в критический момент срабатывают механизмы отрицательной обратной связи, обеспечивающие возвращение системы из возмущенного в «нормальное» состояние, обеспечивающие ее устойчивость. Причина, вызвавшая нарушение, буквально отомрет. Но все-таки предположим, что все перечисленные механизмы защиты рН отказали. Что случится?

Океанические системы защищены от любых природных возмущений многократно, надежно, бесконечным числом связей, многие из которых могут взять на себя «всю полноту ответственности». Не случайно ученые называют все новые и новые связи и механизмы, которые, по их мнению, являются важными в регулировании рН в океане. Один из последних — взаимодействие со взве-

ями и донными осадками типа глин, которые являются онообменниками. Например:



словие равновесия:

$$k_-[\text{K}^+] = k_+[\text{H}^+], \frac{[\text{H}^+]}{[\text{K}^+]} = \frac{k_-}{k_+} = K.$$

Значит, несмотря на наше воздействие, концентрация ионов водорода все равно будет находиться в погонном соотношении с концентрацией калия в морской воде. Учитывая огромные запасы  $\text{K}^+$  в океане, очевидно, то нарушить постоянство состава морской воды не удастся.

Подобные условия равновесия можно записать и с другими ионами металлов. Таким образом, в «защите» принимает участие большинство компонентов морской воды.

В последнее время этот механизм предлагается как весьма важный механизм регулирования рН в океане, с крайней мерой в глубинных водах, как рН-стат. Это делало бы рассмотреть подробнее.

Однако нам важно другое — то, что океан отвечает на любую попытку внести возмущение как единое целое, «кликается» и «защищается» реакцией всех элементов, включая одновременно и химические, и физико-химические, и геохимические, и биологические механизмы саморегулирования, подключая также «ресурсы» атмосферы и дна — т. е. биосферы в целом. Отвечает как южная, но единая динамическая система и одновременно как звено более сложной системы — Биосферы.

#### Химическая лаборатория океана — как живая клетка

Мы неоднократно проводили аналогию между океаном и биологической клеткой и живым организмом. Это сравнение нельзя принимать как вульгарное, утрированное — «научно-популяризаторское»: в серьезной научной литературе океан действительно сравнивается

с гигантской метаболической клеткой, в которой регулируются не только температурный режим, потоки перенос веществ, но и химический состав. Океан рассматривается не только как термостат, но и как хемостат, т. е. система, строго авторегулирующая свой химический состав. Но лучше, конечно, было бы обобщить это и говорить в целом о гомеостате — системе авторегулирования всех «параметров» самой различной природы: гидромеханических, физических, физико-химических, химических, биохимических, биологических (возможно, геохимических и геологических) — той чрезвычайно сложной системе, которая создает и сохраняет индивидуальность объекта: клетки, организма или океана. И если мы сравниваем океан с клеткой (или организмом), а не наоборот, то это только потому, что во-первых, в настоящее время интимные регулирующие механизмы клетки изучены гораздо лучше и, во-вторых, клетка, в отличие от океана, — уже признанный объект пристального внимания кибернетики.

Однако рассмотреть гомеостат в целом — всю систему механизмов и объектов регулирования в совокупности — пока непосильная, хотя и очень интересная важная задача. Это проблема будущего, можно надеяться, ближайшего. Даже при изучении клетки организма многие процессы и явления пока еще рассматриваются отдельно, например процессы переноса веществ через мембраны и регулирование ферментативных реакций в клетке, система кровообращения, теплового регулирования и реакции обмена веществ в организме. Мы тоже поэтому отдельно рассмотрели систему регулирования гидромеханических и физических параметров, в этой главе рассмотрели хемостат, а дальше — биостат. Мы старались при этом все же не упускать из виду, а где удастся, и показать их взаимосвязь. На примере воды мы показали, что всякая, даже чрезвычайно сложная система — это лишь подсистема еще более сложной, охватывающей ее системы. Такая сложная система, как клетка, — не что иное, как подсистема организованной совокупности клеток: популяции или многоклеточного организма. Океан также можно принять как подсистему, не замкнутую в себе, но активно связанную с охватывающей ее совокупностью — биосферой. В этом отношении интересны и показательны были ка-

юнатная система, рН-стат, пирамида масс с участием «элемента жизни» — углерода, устойчивость которых поддерживается как гидродинамическими и физическими процессами, а также геохимическими на границах раздела: океан — атмосфера, океан — дно, океан — суша и в самом океане, так и хемотростом, биохемотростом и биостазом.

Мы не рассматривали то, что так же, как клетка или организм для того, чтобы поддержать свою жизнь, потребляют из окружающей среды и выделяют в нее многообразные химические вещества, твердые, жидкие, газообразные (то, что мы называем внешним метаболизмом), океан осуществляет приличествующий его масштабам гигантский обмен химическими веществами с окружающей его средой. Мы могли бы поразить цифрами, записанными в меню океана, или наоборот, обсудить тонкости, даже формальные, но приводящие к парадоксальным заключениям, например, такого типа. Говоря об организме и об обмене газообразными, жидкими и твердыми веществами, привычно будет слышать слова: животное дышит, животное ест; клетка дышит — привычно, но клетка ест — уже непривычно, говорят — потребляет, утилизирует, аккумулирует и т. п. Если пойти дальше и говорить об океане, то одинаково непривычно будет услышать и «океан дышит», и «океан ест». Но в последнее время даже в серьезной научной литературе, имея в виду обмен океана с атмосферой, осторожно, но все же говорят: «солевое дыхание океана». Так может быть, все различие и все дело только в нашей привычке, в преходящем, а суть одна? Мы могли бы привлечь на помощь теорию информации и показать, что океанические системы тоже должны обладать памятью, и даже рассчитать ее емкость, а потом сопоставить с биологическими системами. Мы не стали привлекать внимание к поражающим воображение цифрам, к сенсационным выводам, а постарались показать эту единую суть.

Мы увидели, что наряду с энтропийными тенденциями, стремлением к рассеянию и хаосу, химическая океаническая система, начиная с ее основы — воды, проявляет стремление к упорядоченности, имеет механизмы, способные поддержать эту упорядоченность на протяжении длительного времени. И если биологов

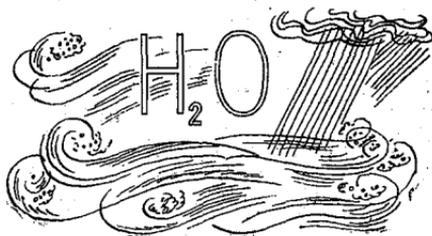
поражает, «почему хаотизированная и открытая среда породила столь сложные машины»<sup>1</sup>, как клетка и организмы, то морской химик скорее поразился бы, если бы эта океаническая среда не оказалась бы способной породить сложные машины.

Задавшись вопросом, из-за чего упорядоченный химический облик океана не рухнет со временем гигантским вихрем обмена веществ внутри и вне системы, как того требуют всемогущие законы термодинамики, мы пришли к выводу, что именно из-за этого гигантского вихря обмена веществ. Благодаря ему и благодаря обмену энергией океан, как и клетка, способен затратить работу, необходимую, чтобы поддержать свою химическую «жизнь» — термодинамически неравновесное состояние, менее вероятное, менее устойчивое, чем равновесное состояние, которым для него, как и для клетки является химическая «смерть».

Единая суть, важнейшее обстоятельство, объединяющее и клетку, и организм, и Океан, заключается в том, что все это — единые упорядоченные открытые динамические системы.

---

<sup>1</sup> Николаев Л. А. Основы физической химии биологических процессов. М., «Высш. школа», 1971, с. 66.



## ГЛАВА 3

### ОКЕАНИЧЕСКИЙ БИОСТАТ

...оказалось, что сообщества в пять раз более стабильны, чем среда. Это указывает на наличие гомеостаза там, где его меньше всего можно было ожидать.<sup>1</sup>

*Е. Одум*

События, протекающие в любых сложных системах, вызываются как случайными или постоянно действующими внешними факторами, так и внутренними. В этом смысле часть событий «предопределена». Судьба отдельного человека и история целой нации, жизнь живой клетки и процессы, происходящие в океане, — все следует правилу двойного управления. В предыдущих главах ставились вопросы: насколько случайны события в океане и насколько они предопределены, внутренне закономерны для его организации? И существует ли вообще внутренняя организация, упорядоченность в динамических системах океана? Если да, то что создает такой порядок и делает его достаточно устойчивым при всей динамичности этих систем?

Отвечая на эти вопросы, мы рассмотрели уже физические и химические системы, в рамках которых единство частей, порядок и динамическая устойчивость существуют. При всем их внешнем несхождении друг с другом оказалось, что они работают на основе единых принципов, присущих всем открытым системам. В обеих циркулируют потоки вещества и энергии — видимые, как течения, или невидимые, как химические реакции. В обеих существуют сходные механизмы, регулирующие их деятельность и поддерживающие их структуру. А значит, они, хотя и своеобразно, «живут» подобно живым клеткам и организмам. О подобии физических, химических систем и организмов мы еще расскажем.

<sup>1</sup> Одум Е. Экология. М., «Просвещение», 1968, с. 16.

Теперь возникает последний и вероятно самый странный вопрос: **присуща ли океану жизнь без кавычек?** Организована ли как-нибудь вся совокупность организмов, подобно тому, как связаны и организованы физические и химические процессы в нем и как организованы процессы в организме и клетке? Иными словами, есть ли в океане биологические системы более крупные, чем организм и если да, то как устроена и протекает эта их жизнь?

Живет ли океан — вопрос далеко не риторический. Одно из наиболее характерных и важных свойств жизни заключается в ее динамической устойчивости, способности к самоподдержанию. Обладает ли комплекс организмов моря такими свойствами — это вопрос повседневной практики человечества, вынужденного смотреть на океан, как на источник пищевых ресурсов. Если океан — живая система, то «деловые отношения» с ним надо строить не как с мертвым безразличным телом, а как с объектом, способным оптимальным для себя образом воспроизводить часть утраченных им (например, изъятых человеком) биологических или химических ресурсов. Для этого надо знать законы биологического воспроизводства. В них-то и состоит суть законов жизни океана.

Рассмотрим теперь морские биологические системы с той степенью подробности, которая необходима для понимания принципов их специфической организации и не менее специфического функционирования.

### **Элементарная управляемая система. Элементарный язык**

Морские биологические системы очень сложны. Но элементы, из которых они состоят, условно можно считать простыми. Сложные системы ученые изучают на их моделях. Чтобы построить модель, необходимо знание символов элементов, символов их связей друг с другом и их простых свойств. Необходимо также умение оперировать этими символами, соединяя их тем или иным образом и используя результаты такого соединения. Возьмем простейшую биологическую систему, считая ее «элементарной», и проследим последовательные этапы ее описания на разных языках, широко приме-

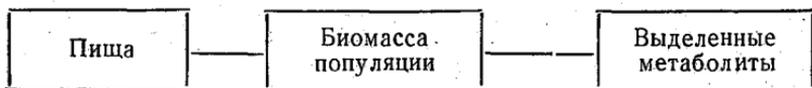
няемых в науке. Мы можем пройти путь от азбуки символов к их соединению в определенные научные понятия и до введения их в электронно-вычислительную машину (ЭВМ). Машина делает самую трудоемкую работу — произведет необходимые расчеты. Обсуждение результата завершит логику исследования нашей элементарной системы.

Что же считать самым элементарным в насыщенном жизнью океане? Организм? Это кажется самым естественным. Но один организм, взятый сам по себе, так же мало характеризует события в океане, как мало передает мысль человека одно слово, случайно выхваченное из его речи. Чтобы понять мысль, нужно услышать хотя бы несколько сказанных им фраз — совокупностей слов. Начнем поэтому рассказ о живых системах моря не с организма, а с популяции организмов. Она и будет нашим «элементарным» объектом.

Популяция — это совокупность особей одного вида, находящихся на данной территории и имеющих возможность общаться друг с другом (например, для встречи брачных пар). Популяцией является и «облако» клеток какой-нибудь одноклеточной водоросли, парящее в толще воды, и группа морских ежей на дне. Жизнь популяции — прежде всего ее питание, рост и воспроизводство себе подобных.

Водоросли питаются, потребляя в качестве источника углерода растворенные в воде карбонаты и используя энергию солнечного света. Ежи поедают растущие рядом многоклеточные водоросли, черпая из них углерод и энергию.

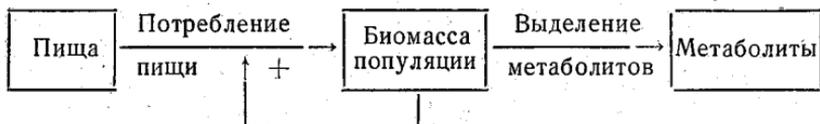
Но питание это только «вход» системы. На ее «выходе» — продукты жизнедеятельности (метаболиты). У водорослей — кислород и растворенные органические соединения, выделяемые ими в воду. У ежей — углекислота и тоже органические выделения — твердые и растворенные. Зная «вход» и «выход» популяции, можно проследить за ее ростом. Начнем с того, что изобразим графически популяцию, ее пищу и выделяемые ею метаболиты:



Соединив эти символы стрелками, т. е. значками процессов



получим то, что принято называть блок-схемой:



Естественно, что чем больше биомасса популяции, тем больше она потребляет пищи. Графически это показано дополнительной стрелкой, идущей от биомассы к потреблению. Знак «+» у стрелки показывает, что связь положительна, т. е. усиливает рост биомассы.

Но эту же систему можно описать с помощью другого языка — математического. Для этого нам придется обозначить все элементы системы определенными (конечно, произвольными) буквами:

концентрация пищи в объеме воды (мг/л) —  $C$ ,  
 концентрация биомассы в объеме воды (мг/л) —  $B$ ,  
 концентрация выделенных метаболитов (мг/л) —  $M$ .

Введем символические изображения процессов:

удельная скорость потребления пищи (л/(мг·сутки)) —  $\mu$ ,

удельная скорость выделения метаболитов (1/сутки) —  $\alpha$ <sup>1</sup>.

Пусть  $dB$  — прирост биомассы за бесконечно малый отрезок времени  $dt$ . Ясно, что скорость изменения биомассы  $dB/dt$  равна разности между скоростью потребления пищи  $\mu BC$  и скоростью выделения метаболитов  $\alpha B$ . Следовательно, баланс выразится уравнением

$$\frac{dB}{dt} = \mu BC - \alpha B = (\mu C - \alpha) B. \quad (102)$$

<sup>1</sup> Эти, странные на первый взгляд размерности возникают из-за того, что удельная величина получается путем деления скорости на количество пищи и биомассы в первом случае и на количество биомассы — во втором.

Решение этого уравнения известно и его можно найти в любом справочнике:

$$B = B_0 e^{(\mu C - \alpha)t}. \quad (103)$$

Здесь буквой  $B_0$  обозначена биомасса в начальный момент времени. Графически последнее изображение системы выглядит как бесконечно восходящая кривая.

Описание системы с помощью буквенных символов намного богаче и совершеннее описания, сделанного языком блок-схемы. Пользуясь формулой (103), можно рассчитать, например, какова будет биомасса бактерий через 10 суток, если их исходная биомасса равна  $1 \cdot 10^{-5}$  мг/л и если они растут в благоприятных условиях, когда  $(\mu C - \alpha)$  достигает  $10 \text{ сут.}^{-1}$ . Найдим  $B = 1 \cdot 10^{-5} \cdot e^{10 \cdot 10} = 10^{38} \text{ мг/л} = 10^{29} \text{ т}$  — и это в одном литре! Через несколько дней неограниченного роста биомасса бактерий превысит массу Солнца! Странное поведение! Позже мы еще вернемся к нему.

Но и то, и другое описание не показывают непрерывного изменения биомассы. Чтобы график роста популяции получался из модели сам собою, без расчета вручную по уравнению, можно построить «техническую модель», заменив потоки пищи и выделений, например, потоком воды или электрическим потоком (рис. 35).

Такая замена возможна, потому что, хотя пища и выделения химически различны, те и другие содержат

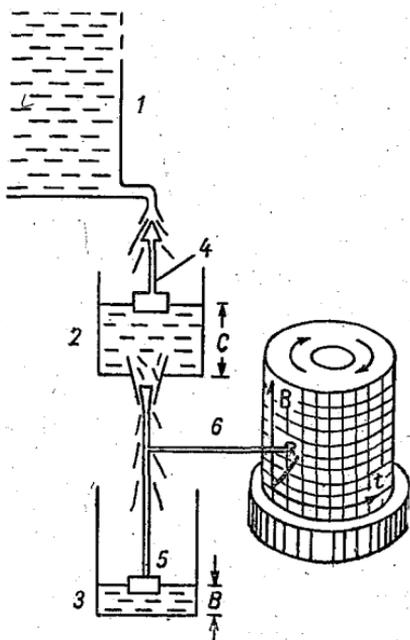


Рис. 35. Модель экспоненциального роста популяции.

1 — бесконечно большой источник пищи; 2 — «концентрация» пищи, которая благодаря поплавку с затычкой 4 поддерживается всегда постоянной; 3 — биомасса, поплавок с затычкой 5 — положительная обратная связь. Самочисец 6, соединенный с поплавком, рисует изменение биомассы.

углерод и могут быть рассчитаны в одинаковых единицах, как и электрический ток, на входе и выходе модели. Если техническую модель соединить с самописцами, то тот же результат — неограниченный рост популяции — будет получен автоматически, непосредственно из работающей модели, что весьма удобно.

Работающую модель можно получить и совершенно иным путем, самым быстрым и самым современным — с помощью ЭВМ. Такой путь позволяет изучать очень сложные системы, не строя каждый раз громоздкую техническую модель. Но прежде чем поручить такую работу машине, попробуем разобраться, что, собственно говоря, машина станет делать. Как и в технической модели, машине необходимо прослеживать процесс во времени. Для этого она будет отмеривать его с определенными интервалами времени  $\Delta t$ , величину которых зададим.

Для первого интервала  $\Delta t_1 = t_1 - t_0$  рассчитаем на основе уравнения (102) конечную разность биомассы:  $\Delta B_1 = B_1 - B_0$ . Заменим уравнение (102) приблизительно эквивалентным ему уравнением, но составленным из конечных разностей времени и биомассы:

$$\frac{B_1 - B_0}{t_1 - t_0} = \frac{\Delta B_1}{\Delta t_1} = (\mu C - \alpha) B_0.$$

Такой метод приближенного численного решения дифференциальных уравнений так и называется — решение в конечных разностях. Отсюда прирост биомассы  $\Delta B_1$  за время  $\Delta t_1$  равен

$$\Delta B_1 = (\mu C - \alpha) B_0 \Delta t_1, \quad (104)$$

а величина биомассы  $B_1$  ко времени  $t_1$  будет равна

$$B_1 = B_0 + \Delta B_1 = B_0 + (\mu C - \alpha) B_0 \Delta t_1. \quad (104')$$

Затем возьмем следующий конечный интервал времени  $\Delta t_2 = t_2 - t_1$  и сделаем то же самое, вставляя в уравнение (104') значение биомассы  $B_1$ , полученное на предыдущем шаге вычислений. Получим значение  $B_2$  для времени  $t_2$ :

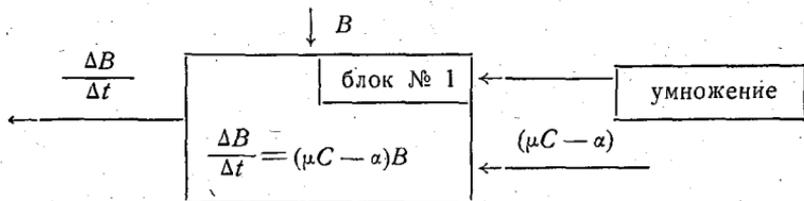
$$B_2 = B_0 + \Delta B_1 + \Delta B_2 = B_0 + (\mu C - \alpha) B_0 \Delta t_1 + (\mu C - \alpha) B_1 \Delta t_2. \quad (104'')$$

Потом сделаем точно такие же шаги по времени  $t_3, t_4, t_5, \dots$ . Это весьма трудоемкая и однообразная ра-

бота: интервалы должны быть очень малы, а стало быть «шагов», или расчетных циклов, будет очень много. Например, чтобы просчитать рост популяции за 10 суток с интервалом 0,1 суток, необходимо 100 шагов. Рациональнее поручить такой расчет машине, четко сформулировав стоящую перед ней задачу. Для этого с языка привычных понятий и буквенных символов надо перейти на язык машины.

Не нужно пугаться слов «машинный язык». Каждый, кто проделал описанные выше операции, уже почти способен использовать вычислительную машину, потому что «для ЭВМ» важно «знать» одно — логику только что проделанных операций. Теперь надо лишь составить правило, по которому мы только что считали (математики называют его алгоритмом). А полную программу действий для машины можно просто описать на любом языке (русском, английском — она сама переведет программу на свой собственный язык) или нарисовать последовательность действий на бумаге. Итак, в чем же заключается правило счета? Проследим его последовательно.

**Этап 1.** Как читатель помнит, умножались имеющиеся у нас значения  $B$  на  $(\mu C - a)$  и по уравнению (104) на каждом шаге получалось значение  $\Delta B / \Delta t$ . Нарисуем эту операцию схематически:

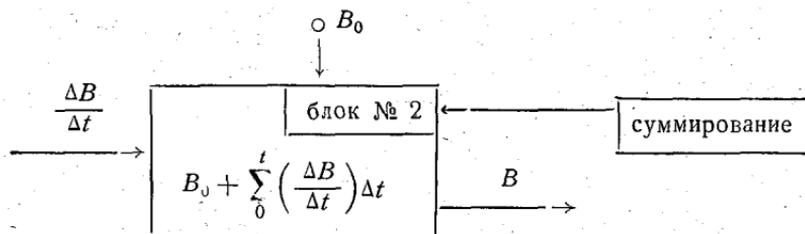


Получился первый элементарный блок действий (блок № 1).

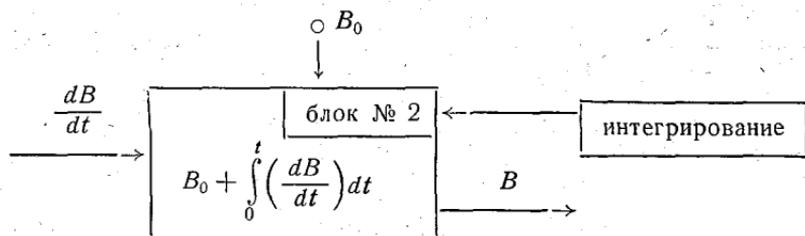
**Этап 2.** Потом полученное значение  $\Delta B / \Delta t$  умножали на  $\Delta t$ , получая  $\Delta B$ , и прибавляли к начальному  $B_0$  сумму всех  $\Delta B$ , шагая по времени от 0 до какого-то  $t$ , например до  $t=10$ , т. е. сумму  $(\Delta B / \Delta t) \Delta t$  при  $t$  от 0 до 10. Суммирование так и запишем сокращенно, обозначив пределы интервала времени: начало — под знаком сигмы  $\sum_{t=0}$ , а конец — над нею  $\sum^{10}$ , или все вместе:

$\sum_{i=0}^{10} \left( \frac{\Delta B}{\Delta t} \right) \Delta t$ . Правда, дальновиднее написать в более общей форме:  $\sum_0^t \left( \frac{\Delta B}{\Delta t} \right) \Delta t$ , так как считать, может быть, придется не до времени 10 суток, а до 20 или 30 или вообще до времени  $t$ .

Теперь изобразим все сказанное графически — и готов блок № 2:



Для случаев, когда суммируются бесконечно малые приращения, англичане предложили в свое время символ суммирования — английскую букву  $S$  вместо греческой сигмы  $\Sigma$ . При скорописи буква  $S$  с обозначением пределов  $\int_0^t$  переродилась в знак  $\int_0^t$  — интеграл. Если использовать аналоговую машину или допустить, что цифровая ЭВМ может считать с бесконечно малым шагом времени  $dt$ , то знак суммы в блоке № 2 заменится на знак интеграла



**Этап 3.** Соединим вместе блок № 1 — умножение и блок № 2 — интегрирование. Получится замкнутый цикл — блок-схема модели популяции (рис. 36). Нетрудно увидеть, насколько она богаче той, которая рисовалась нами ранее, в более простых символах: стоило над нею поработать,

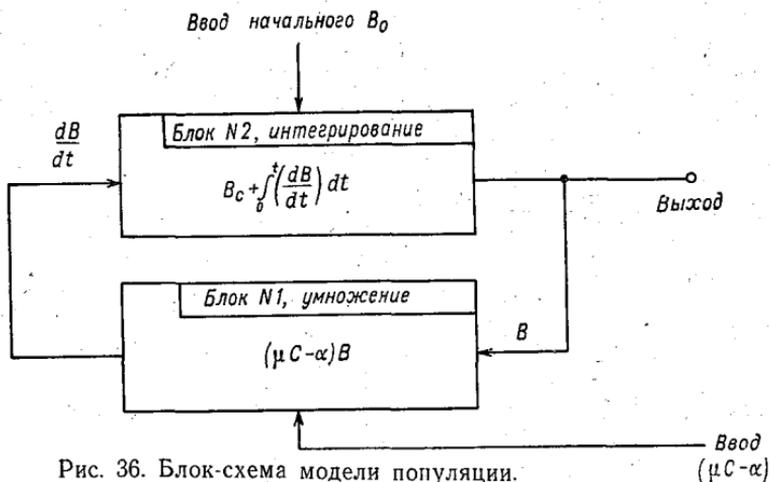


Рис. 36. Блок-схема модели популяции.

Теперь, с этой блок-схемой можно уже и обращаться к специалисту, работающему на ЭВМ. Если машина аналоговая, то на ней просто подбираются электрические блоки, соответствующие, **аналогичные** блокам в блок-схеме. В таком случае программист перерисует нашу блок-схему, заменив квадратики написанными в них действиями равнозначными и наглядными символами. Например, вместо блока умножения будет нарисован символ

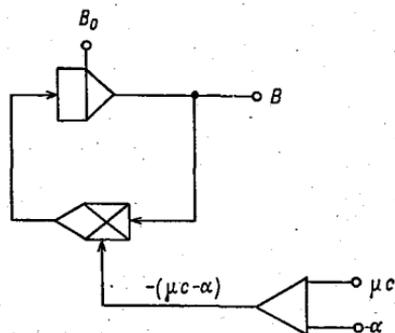
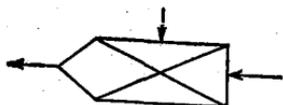
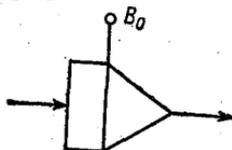


Рис. 37. Блок-схема решения уравнения (102) на аналоговой вычислительной машине.



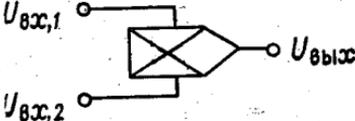
Вместо блока интегрирования будет нарисован символ



Сверху — ввод начальных данных  $V_0$ .

**Операции, выполняемые решающими устройствами (блоками) аналоговых вычислительных машин, и их условные обозначения**

Блок	Операция	Условное обозначение
Сумматор	$U_{\text{ВЫХ}} = - \sum_i^n a_i U_{\text{ВХ}, i}$	
Интегратор	$U_{\text{ВЫХ}} = -k \int_0^t U_{\text{ВХ}} dt + U_0$ ( $k = \frac{1}{RC}$ — сопротивление; $C$ — емкость конденсатора, $U_0$ — начальное значение)	
Интегросумматор	$U_{\text{ВЫХ}} = U_0 - \sum_i^n k_i \int_0^t U_{\text{ВХ}, i} dt$	
Дифференцирующий блок	$U_{\text{ВЫХ}} = -k \frac{dU_{\text{ВХ}}}{dt}$	
Масштабный элемент	Умножение на поправочный коэффициент $\alpha$ : $U_{\text{ВЫХ}} = -\alpha U_{\text{ВХ}}$	
Инвертор	Перемена знака $U_{\text{ВЫХ}} = -U_{\text{ВХ}}$	
Потенциометр	Умножение на постоянный коэф. без перемены знака: $U_{\text{ВЫХ}} = \alpha U_{\text{ВХ}}$	

Блок	Операция	Условное обозначение
Блок умножения	$U_{\text{вых}} = 0,01 U_{\text{вх}, 1} \times U_{\text{вх}, 2}$	
Генератор функций	Воспроизведение нелинейных зависимостей $U_{\text{вых}} = F(U_{\text{вх}})$	

Вся блок-схема для моделирования будет теперь максимально проста, и ее легко составить и прочесть (рис. 37). Точно так же ее можно дополнять символами других операций, которые будут нужны при анализе более сложных систем. Символы можно взять из табл. 2.

Но чаще обращаются не к аналоговой, а к цифровой ЭВМ. Форма обращения к ней другая, но не сложнее той, которую мы только что описали, так как это основа всего — лишь логический путь ваших собственных действий, высказанный другим языком. У каждого вида машин, как у каждой нации людей, свой собственный язык. Но, кроме того, разработано несколько универсальных языков, самый распространенный из них — АЛГОЛ (*ALGO*rithmic *LANG*uage — алгоритмический язык), и каждая машина имеет специально составленную программу-переводчик, называемую транслятором (*Translation* — переводить), с помощью которой она понимает АЛГОЛ. Для аналоговой машины программа действия записывается графически, а для цифровой — словами. Расскажем ее сначала подробно для себя. Машина буквально все «схватывает на лету». Ей не нужно длинных фраз, а достаточно одного-двух слов, но зато **самых главных**, выражающих суть команды. Будем в наших фразах такие слова подчеркивать и в скобках давать либо их буквальный английский перевод, либо их символическое изображение. И то, и другое можно взять из табл. 3. Параметры же, с которыми машина будет оперировать, выделим, написав их заглавными буквами. Потом составим только из

этих английских слов, символов и параметров программу действий для машины.

Разговор с машиной надо начать с сообщения о том, что она должна:

1. **Начать (begin)** группу действий, о которых она узнает, читая нашу программу действий дальше. Запомним сразу, что в самом конце мы должны будем ей сказать и о том, что пора закончить все действия. Команда на операцию начать называется: операторные скобки. Это напоминает арифметические скобки: мы открываем скобки, пишем арифметические выражения внутри и потом закрываем их. Заметим, что внутри одних скобок могут находиться другие.

Таблица 3

**Изображение некоторых основных символов языка АЛГОЛ**

array	массив
begin	начать
do	делать (цикл)
end	конец
for	для
integer	целый
procedure	операция
real	вещественный
step	шаг
until	(пока не ...) до
: =	присвоить значение
×	умножить
<	меньше
≤	меньше или равно
=	равно
>	больше
≥	больше или равно
≠	не равно

2. Дальше мы должны перечислить все величины, с которыми машине предстоит оперировать, и пояснить, что это за величины. Одни величины могут быть любыми, какие только встречаются в реальной действительности, т. е. **действительными (real)** — например, целые числа, дроби и т. д. Другие могут принимать значения только **целые (integer)** — например, число живых организмов в популяции может быть равно 1, 2, 3, ..., но не 3/4 организма. Третьи величины, возможно, потре-

буется собрать в один массив (**array**) под одной буквой, но с разными индексами. Например: метаболиты одного вида  $M_1$ , метаболиты другого вида  $M_2$ , третьего вида  $M_3$  и т. д., скажем до 12 видов. В таком случае это массив (**array**)  $M$  (/1:12/).

3. Теперь машина должна ознакомиться со схемой основной операции (**procedure**), по которой ей придется многократно считать, — операции ИНТЕГРИРОВАНИЯ. Такие схемы хорошо известны, стандартизированы и их можно выписать без изменений из справочника. Выберем, например, наиболее часто используемый метод Рунге — Кутты.

4. Надо присвоить ( $:=$ ) нашим величинам какие-то определенные исходные значения. Например, величине БИОМАССА В (в единицах мг/л) присвоить значение 0.00001 ( $V:=0.00001$ ) и т. д. (в десятичных дробях ставится точка, а не запятая).

При постоянном изменении исходных значений величин их ввод (*input*) лучше осуществить отдельно, например, после ознакомления машины с программой.

5. Далее необходимо сообщить машине, что выполнять она будет циклические, т. е. одни и те же операции многократно: для ВРЕМЕНИ Т, которому мы **присвоили значение**, например, 0.02 (будем использовать единицы времени — сутки) с **шагом**, например, 0.02, пока не достигнем такого-то времени, например, 10 суток, **делай цикл**. Используя табл. 3, слова этого приказа машине запишем так: **for T:=0.02 step 0.02 until 10 do**.

6. Теперь машина знает, каким образом работа распадается на циклы, но еще не знает, какова полная группа действий внутри цикла. Поставим снова операторные скобки и прикажем **начать (begin)** с умножения. Результат умножения — это изменение биомассы (обозначим эту величину символом IZM) за один шаг:

$$IZM := (\mu \times C - \alpha) \times V.$$

Не забудем внести эту реальную величину в начальный ознакомительный список (см. пункт 2). Далее машина должна, как мы помним, выполнить операцию ИНТЕГРИРОВАНИЕ; сократим это длинное слово до символа INT. В скобках при этом символе укажем величину, которую мы получаем, и выражение, которое

вводилось в блок интегрирования. Все вместе: INT (B, IZM).

Теперь интересующую нас величину надо дать на *выход (output)* из машины и указать, что надо отпечатать одновременно и время, к которому эта величина была достигнута: *output* (B, T). На этом — **конец (end)** одного цикла. Когда же машина проделает заданное условием пункта 5 необходимое количество циклов, то можно считать, что она выполнила все, что от нее требовалось, и программа закончена. Поэтому последней командой будет:

#### 7. Конец (end) программы.

Остается только выписать все выделенные нами слова, символы, цифры — и АЛГОЛ-программа для ЭВМ готова<sup>1</sup>. Поскольку мы определяем биомассу, назовем программу «БИО-1».

АЛГОЛ-программа «БИО-1».

#### Begin

real T, B, C,  $\mu$ ,  $\alpha$ , IZM;

Procedure INT (переписываем стандартную операцию из справочника)

B := 0.00001; C := 2;  $\mu$  := 17;  $\alpha$  := 24;

for T := 0.02 step 0.02 until 10 do

begin IZM := ( $\mu \times C - \alpha$ )  $\times$  B; INT (B, IZM);

*output* (T, B);

end

end

На рис. 38 *a* в виде кривой представлен результат реализации нашей программы «БИО-1». В. Н. Егоровым (Институт биологии южных морей) на ЭВМ «Минск-22». Меньше чем через минуту после начала счета машина прекратила печатать результаты и отказалась считать дальше, так как получаемые величины биомассы превышают сколько-нибудь разумные значения. Взрыв, настоящий взрыв биомассы! Опытный человек, только бросив взгляд на блок-схему, сразу же сказал бы, что система

<sup>1</sup> Более подробное популярное изложение основ программирования на АЛГОЛЕ см.: Брудно А. Л. АЛГОЛ. Изд. 2-е. М., «Наука», 1971; Айзатуллин Т. А., Хайлов К. М. АЛГОЛ — для всех. — «Химия и жизнь», 1972, № 10, с. 32—37.

совершенно неустойчива, она придет к взрыву, потому что в схеме есть положительная обратная связь — залог автокатализа, самоускорения, взрыва, но нет «сдерживающих центров». Атомный взрыв, взрыв взрывчатых веществ, воспламенение горючих смесей и многие, многие другие — все это процессы с положительной обратной связью, динамика этих систем точно описывается именно уравнением (102).

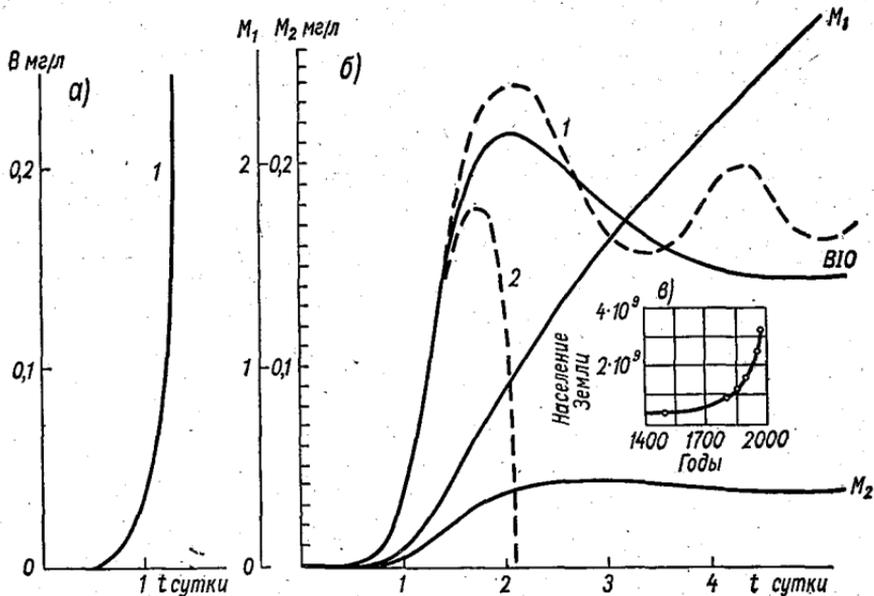


Рис. 38. Динамика популяции и рост населения.

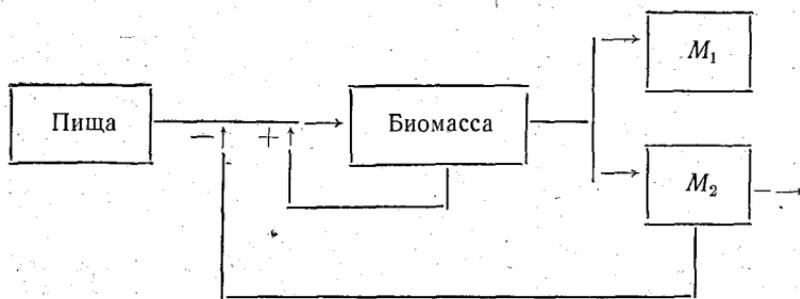
*a* — расчет по программе ВЮ-1: 1 — биомасса популяции; *б* — расчет по программе ВЮ-2: биомасса популяции: ВЮ — при отводе метаболитов  $M_2$  с константой скорости  $k_5=1$ ; 1 — при отводе  $M_2$  с  $k_5>1$ ; 2 — при отводе  $M_2$  с  $k_5<1$ ;  $M_1$  и  $M_2$  — мегабаркалы; *в* — рост населения земного шара.

Рост популяции организмов без вмешательства сдерживающих факторов был бы аналогичен атомному взрыву или взрыву воспламеняющихся смесей — здесь тот же разветвленно-цепной механизм и то же обратное положительное воздействие продуктов реакций — биологических в одном случае, физических и химических в других.

В действительности, как хорошо известно, рост биомассы популяции с определенного момента начинает

замедляться и наконец затухает совсем, или даже снижается. Реальный рост биомассы выражается S-образной кривой аналогично вырожденно-разветвленным цепным химическим реакциям (он так и называется «S-образный рост»).

Причины замедления и прекращения роста популяции разнообразны, но изучены еще недостаточно. Большое значение имеет исчерпание пищевых и энергетических ресурсов и другие. Во всяком случае одна из них — накопление в среде продуктов жизнедеятельности организмов. Например, хорошо известно, что при спиртовом брожении накопление в среде спирта постепенно приостанавливает процесс. То же самое касается и морских бактерий, и морских водорослей, и животных — с той лишь разницей, что выделения, тормозящие их рост, иные. В общей форме торможение роста продуктами жизнедеятельности выражается схемой с отрицательной обратной связью.



На схеме показан случай, когда первым тормозящим фактором (ингибитором роста) является продукт  $M_2$ . Но если этот продукт быстро отводится из среды, а остается лишь  $M_1$ , то ингибитором роста стал бы именно он.

Нам теперь ничего не стоит довести эту схему до стадии моделирования, вплоть до ЭВМ. Пусть мы решили воспользоваться цифровой вычислительной машиной, скажем, той же самой «Минск-22». Мы теперь отлично понимаем, что в разговоре с машиной математика, вообще-то говоря, ни при чем и что ЭВМ — это не атрибут математики, а мощное оружие в руках любого исследователя. Чтобы подчеркнуть это, избежим «буквен-

ных» формул (хотя они компактнее), а запишем все просто привычными нам словами, выделяя в каждом понятии первые две-три буквы, с тем, чтобы потом использовать в программе не целиком слово, а несколько букв. Итак, по схеме:

1. ИЗМенение 1 биомассы = БИОмасса  $\times$  (ПОТребление — ВЫДеление — СМЕРТность); ПОТребление = Коэффициент  $\times$  ОРГаника  $\times$  (1 + Коэффициент 2  $\times$  Метаболит 2);

2. ИЗМенение 2 метаболита 1 = Коэффициент 3  $\times$   $\times$  БИОмасса  $\times$  ВЫДеление;

3. ИЗМенение 3 метаболита 2 = Коэффициент 4  $\times$  БИОмасса  $\times$  ВЫДеление — Коэффициент 5  $\times$  МЕТАболит 2.

Все-таки гораздо лучше записывать в «математическом» виде! Но закончим так, заменив русский шрифт латинским, так как большинство трансляторов для цифровых машин требует латинских букв. Например, от слова ИЗМенение 2 вместо выделенного сокращения ИЗМ2 напишем: IZM2; вместо ПОТребление напишем POT и т. д. Составим, используя эти обозначения величин, программу для ЭВМ на АЛГОЛЕ, как АЛГОЛ-программу «ВЮ-1», и назовем ее «ВЮ-2». Выпишем из справочника или из учебника по программированию<sup>1</sup> содержание операции интегрирования по Рунге — Кутту, учитывая, что содержание процедуры — это группа действий, которые надо взять в операторные скобки **begin... end**. Кроме того, внесем еще два мелких изменения, поскольку используемый транслятор «Минска-22» требует не подчеркивания команды, а постановки знака апострофа ('. . . . '), при команде выдачи на печать результатов использования не термина *output*, а слова STANDARD. При нем в скобках указывается цифрами, через сколько интервалов надо печатать результаты на листе, перфоленте и как их там расположить. С учетом всего этого и распишем программу. Мы записали ее не самым оптимальным и красивым способом, заботясь об одном: лишь бы было просто и понятно нам и ЭВМ.

---

<sup>1</sup> Гутер Р. С., Резниковский П. Т., Резник С. М. Программирование и вычислительная математика, вып. 1, вып. 2. М., «Наука», 1971.

## Алгол-программа BIO-2

```

'BEGIN' 'REAL' T, BIO, ORG, WYD, SMER, POT, M1,
M2, K1, K2, K3, K4, K5;
'ARRAY' IZM (|1:3|);
'PROCEDURE' INT (Y, F); 'REAL' Y, F;
'BEGIN' — переписываем стандартную процедуру
из справочника, например — 'REAL' P1, P2, P3,
P4, Y1; P1 := 0.02 × F; Y1 := Y;
Y := Y1 + P1/2; P2 := 0.02 × F; Y := Y1 + P2/2;
P3 := 0.02 × F; Y := Y1 + P3; P4 := 0.02 × F;
Y := Y1 + (P1 + 2 × P2 + 2 × P3 + P4)/6;
'END';
K1 := 20; K2 := 10; K3 := 0.6; K4 := 0.4; K5 := 1;
BIO := 0.00001;
ORG := 2; SMER := 2; M1 := 0; M2 := 0;
'FOR' T := 0.02 'STEP' 0.02 'UNTIL' 5.1 'DO'
'BEGIN' POT := K1 × ORG / (1 + K2 × M2);
WYD := 0.7 × POT + 0.5;
IZM(|1|) := BIO × (POT — WYD — SMER);
IZM(|2|) := K3 × WYD × BIO;
IZM(|3|) := K4 × WYD × BIO — K5 × M2;
INT (BIO, IZM(|1|)); INT (M1, IZM(|2|));
INT (M2, IZM(|3|));
STANDARD ("18", "10", "3", T, "30", "6", BIO,
"50", "6", M1, "70", "6", M2);
'END';
'END'

```

Среди результатов расчета, выполненного ЭВМ, нас будет интересовать: 1) изменение биомассы популяции, 2) изменение концентрации первого метаболита  $M_1$  и 3) изменение концентрации второго метаболита  $M_2$ . Эти параметры и просим машину выдать на печать.

Будем считать, что среди выделений организмов каждый из метаболитов  $M_1$  и  $M_2$  составляет определенную долю, токсичный метаболит  $M_2$  отводится из системы со скоростью, пропорциональной его наличной концент-

рации, и он угнетает организмы, снижая активность потребления ими пищи, и увеличивает их смертность.

На рис. 38 б приводятся результаты реализации нашей программы «ВЮ-2» А. В. Леоновым (Государственный океанографический институт) на ЭВМ «Минск-22М». Ход изменения биомассы популяции, изображенный на рисунке кривой ВЮ, в точности соответствует наблюдаемой в опытах картине.

В этой программе мы приняли, что метаболит  $M_2$  отводится из системы с константой скорости  $K_5 = 1$ . Если он отводится быстрее ( $K_5 > 1$ ), то развитие популяции соответствует кривой 1 и представляет собой затухающие колебания. Со временем величина биомассы устанавливается на определенном уровне, как это происходит и в случае представляемой кривой ВЮ. Если метаболит 2 отводится очень медленно ( $K_5 \ll 1$  или  $K_5 = 0$ ), то популяция очень быстро погибнет (кривая 2).

В начальных участках кривых нет заметного прироста биомассы популяции. Подобное состояние называют лаг-фазой. Затем наступает фаза экспоненциального роста — взрывного, автокаталитического. В начале этой фазы при низкой концентрации организмов влияние популяции на среду своего обитания ничтожно, и популяция развивается так же точно, как и в случае, когда отрицательного обратного воздействия метаболитов не было, — взрывоподобно (ср. с рис. 38 а). Но картина меняется, когда биомасса популяции достигает больших значений: здесь уже начинает сказываться отрицательная обратная связь — «загрязнение» среды продуктами жизнедеятельности организмов, метаболитами  $M_2$ . И в зависимости от того, с какой скоростью отводятся эти метаболиты, биомасса популяции выходит на определенный постоянный уровень (кривые ВЮ, 1), или, если они отводятся из среды недостаточно быстро (кривая 2), популяция начинает погибать. В лабораторных опытах действительно приходится предпринимать специальные усилия, чтобы популяция не погибла. В природных же условиях среди миллионов видов организмов, населяющих океан, на любой метаболит найдется свой «мусорщик», для которого именно этот метаболит оказывается лакомым кусочком. «Мусорщики» отводят метаболиты из среды, усваивая их и тоже

начиная развиваться взрывоподобно, пока их собственные продукты жизнедеятельности не начнут тормозить их развитие. Всегда находятся следующие и следующие «мусорщики», и таким образом прокатывается волна жизни. Водоросли выделяют органические вещества, которые потребляют бактерии-гетеротрофы, минерализующие органическое вещество. Токсичный для них минеральный продукт их жизнедеятельности — аммиак — используют нитрифицирующие бактерии, окисляя аммиак до нитритов, этот продукт подхватывается следующим видом микроорганизмов и окисляется до нитратов, а нитраты снова используются водорослями для синтеза аминокислот и белков, необходимых им для построения своего тела. Круг замыкается. Такое мирное сосуществование оказывается выгодным всем обитателям океана, ни одна популяция не погибает, ведя мирную «торговлю» метаболитами с соседями и поддерживая этим свою биомассу на определенном стационарном уровне — вся биологическая система оказывается находящейся в динамическом равновесии. Конечно, кроме этих факторов, действует и множество других, не менее важных, например, отношения типа «хищник — жертва», но и в этом случае устанавливаются определенные равновесные соотношения между различными популяциями. Океан оказывается огромным биостатом и одновременно — хеостатом, так как потоки метаболитов — химических соединений — оказываются упорядоченными, и благодаря этому концентрации этих химических компонентов морской воды стационарны.

Но и здесь случаются локальные метаболические войны, находятся нарушители мирного сосуществования популяций, и морская вода окрашивается, буквально, в кровавый цвет. «Red tide» — красный прилив — такой термин утвердился в океанологии за одним из явлений нарушения биохимического равновесия в океане, местной «поломки» биостата, когда не вполне объяснимый пока взрыв популяции красных водорослей отравляет вокруг все живое. Однако агрессора умирмяют пока что довольно быстро, так как и его жизнь зависит от других, и местный биохимический конфликт не перерастает в мировую войну популяций.

Описание «красного прилива», продолжавшегося, по словам автора, шесть месяцев, дано в статье Б. Лефев-

ра «Океан в опасности»<sup>1</sup>, откуда мы приведем выдержки: «В ноябре 1946 года жители Форт-Майерса (штат Флорида) были поражены, увидев «красное море», на поверхность которого всплыло множество мертвой рыбы (от 100 до 150 кг на квадратный метр). Вначале подумали, что это последствия противозаконного сбрасывания какого-то химического вещества. Однако в действительности дело обстояло иначе.

На самом деле это было внезапное «нашествие» полурастительных, полуживотных организмов — динофлагеллятов, размножению которых способствовало наличие в прибрежных водах излишнего «корма». Эти микроорганизмы, развитие которых стимулировалось избытком кобальта и витамина В<sub>12</sub> и которые жадно поглощали фосфор и азот, в избытке содержащиеся в отбросах, до такой степени расплодились, что даже окрасили море».

Затрагивая проблему сохранения окружающей нас среды, будем иметь в виду, что человечество становится все более существенной частью глобального биостата. Об этом говорит даже простой рост его численности, показанный на рис. 38 *в*<sup>2</sup>. Сравнивая последний рисунок с предыдущими (38 *а*, *б*), отметим неожиданное сходство: картина на рис. 38 *в* не отличима от начальных этапов развития популяции организмов, моделирование которой мы только что провели с помощью ЭВМ. Если сохранить использованные выше названия, то на кривой роста на рис. 38 *в* также можно выделить лаг-фазу, соответствующую адаптации к условиям среды, и фазу экспоненциального роста, начинающуюся в 18 веке. Как будет идти эта кривая дальше, зависит, помимо других обстоятельств, и от того, с какой эффективностью человечеству удастся решить проблему защиты окружающей среды, распоряжения отходами своей многогранной жизнедеятельности. Влияние метаболитов человечества — продуктов его жизнедеятельности, прежде всего надо говорить о промышленности, — на начальном участке экспоненциального роста не сказывалось заметным образом на среде обитания в целом, хотя локаль-

<sup>1</sup> «За рубежом», 1973, № 21, с. 28—29.

<sup>2</sup> См. кн.: Страны социализма и капитализма в цифрах. М., Политиздат, 1966.

ные нарушения равновесия в среде отмечались в истории неоднократно. Наконец, сейчас мы находимся вблизи критической точки, когда метаболиты популяции заметным образом влияют на среду или угрожают ей, и теперь от скорости отвода одних метаболитов и от возможности ограничения и запрета других, быть может, зависит, пойдет ли развитие популяции по кривой ВЮ и 1 (колебания вблизи оптимальных значений в пределах Земли) или по кривой 2 на рис. 38 б. Расхищение пищевых и энергетических ресурсов может усугубить нежелательное направление развития.

Важную роль в отводе метаболитов, как мы уже говорили, играют биологические «мусорщики», которые обязательно найдутся почти для любого вида отходов жизнедеятельности человека. Развитие новых популяций «мусорщиков» нуждается в контроле и регулировании, иначе оно может привести биостат в состояние такого равновесия, которое нежелательно для человека (вспомним «цветение» красных водорослей). Но для контроля и регулирования надо знать более точно, как устроен биостат, какие связи в нем существуют, насколько он устойчив, чем определяется его устойчивость.

Значит, мы должны усложнить нашу модель и рассматривать не одну популяцию, пусть и с учетом химических компонентов, в том числе метаболитов, а совокупность популяций в их химическом и биологическом взаимодействии.

### **Разнообразие и его преимущества. «Ведьмин суп»**

Речь человека состоит из разных фраз, а фразы — из разных слов. Именно разных. На разнообразии в широком смысле слова строится вся сложность, все богатство языка. Сложность биологических систем океана также основана на разнообразии их элементов. А элементы интересующих нас систем — это прежде всего видовые популяции и формы их пищи, которая должна быть разнообразной. Ведь и у бактерий существуют разные потребности и вкусы.

В стакане воды, взятой из моря, непременно найдется какое-то количество одноклеточных водорослей и бактерий. Налицо видовое разнообразие — простейшая

«фраза», имеющая в «речи» моря определенный смысл. Как передать его строго и объективно?

Выше уже говорилось, что жизнь — прежде всего питание организмов популяции. Водоросли питаются углекислотой:

$$\frac{dB_1}{dt} = \mu_{B_1} C_{CO_2} B_1 - \alpha_1 B_1,$$

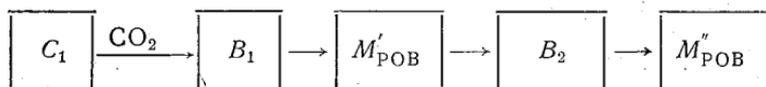
где  $B_1$  — их биомасса;  $\alpha_1$  — коэффициент, показывающий интенсивность убыли биомассы вида за счет ее выедания другим видом и выделения органических метаболитов.

Бактерии, если они гетеротрофны, питаются растворенным органическим веществом (РОВ). Это могут быть и органические метаболиты, выделяемые водорослями. Рост биомассы описывается следующим уравнением:

$$\frac{dB_2}{dt} = \mu_{B_2} C_{РОВ} B_2 - \alpha_2 B_2,$$

где  $B_2$  — биомасса бактерий;  $\alpha_2$  — коэффициент, показывающий интенсивность убыли биомассы бактерий.

Эти два типа питания взаимно дополняют друг друга, т. е. водоросли и бактерии связаны трофической связью:



Здесь  $M'_{РОВ}$  — органические метаболиты водорослей, выделяемые ими в окружающую среду, а  $M''_{РОВ}$  — метаболиты бактерий. Такая цепь называется трофической, или пищевой.

В каждой цепи видовая популяция чередуется с ее пищей — субстратом, например: углекислый газ → водоросли → глюкоза, выделенная в воду водорослями → бактерии. Значит, количество разных вариантов пищевых цепей такого типа зависит от видового разнообразия самих организмов и от разнообразия субстратов, которые они выделяют и в состоянии использовать.

В море разнообразие видов значительно выше, чем на суше и в пресных водоемах. Для иллюстрации

приведем цифры, взятые из книги классика отечественной гидробиологии С. А. Зернова:

Организмы	Количество видов, в % к общему		
	море	пресные воды	суша
Животные . . . . .	76	6	18
Растения . . . . .	50	8	42

Всего в современном океане обитает более 150 тысяч видов животных и около 15 тысяч видов растений. Можно представить себе, какие огромные возможности имеются для формирования различных пищевых цепей и сетей!

Разнообразие органических соединений, растворенных в морской воде и служащих основной пищей многочисленным примитивным организмам, также чрезвычайно велико. В состав РОВ воды входят в той или иной степени практически все соединения, синтезируемые обитателями моря, и, кроме того, масса других, хотя и медленно, но образующихся в самой морской воде благодаря различным химическим реакциям, происходящим с метаболитами. В воде моря найдены в небольших концентрациях все известные аминокислоты, многочисленные пептиды, различные моносахара, сахара более сложного состава, включая и высокомолекулярные полисахариды. Есть в ней амины, фенолы, безазотистые органические кислоты самого разного молекулярного веса и химического состава. Найдены в ней и многие жизненно важные витамины (а те, которые пока не обнаружены, несомненно, будут найдены позже), гормоны роста, формирующие вещества и т. д. и т. п. В известном смысле морская вода — настоящий «ведьмин суп». К стати, в ранних работах по исследованиям органического вещества воды слова «ведьмин суп» действительно встречались довольно часто.

Однако эпитет «ведьмин» не совсем удачен, так как в целом этот раствор очень и очень ценен по своему составу. Не случайно во многих странах из морской воды и из морских грязей выделяют целебные вещества, а нередко в медицинских целях используют сложный концентрат органических и минеральных веществ, полученный в результате выпаривания морской воды.

Давно уже было замечено, что и морским организмам этот «суп» необходим для нормального роста и развития.

В искусственных условиях некоторые растения и животные плохо растут или не дают потомства в воде, взятой из одного района, в то время как в воде, взятой в другом районе моря, чувствуют себя нормально. Например, зеленая ульва в специально очищенной от органических веществ воде растет совершенно ненормально: ее талломы<sup>1</sup> приобретают уродливые формы. Естественный рост ульвы полностью восстанавливается, если добавить немного воды, взятой у берега. Таких наблюдений было сделано очень много, и они стали первым стимулом в развитии новой отрасли науки о море — биохимии морских сообществ<sup>2</sup>.

Итак, в море существует очень много видов организмов и очень много растворенных органических соединений, служащих им пищей. Следствие очевидно: может существовать большое количество вариантов метаболических пищевых цепей. А поскольку отдельные цепи связаны друг с другом, можно себе представить, сколь сложны и многообразны могут быть все сочетания.

Например, клетки водорослей (А) выделяют одновременно ряд продуктов своей жизнедеятельности, в том числе растворенный кислород ( $O_2$ ), растворенные углеводы, скажем глюкозу (Уг), а нередко и различные антибиотики (Ан). Бактерии же (Б) выделяют в числе продуктов жизнедеятельности углекислоту ( $CO_2$ ) и ряд органических метаболитов, например ацетат (Ац) и какой-нибудь витамин (Ви). В таком случае простейшая схема связи двух популяций окажется примерно такой, как показано на рис. 39.

От этой схемы можно перейти к гораздо более сложным схемам, пользуясь тем примером, который был детально рассмотрен в предыдущем разделе.

Важно отметить следующее: налицо не простая цепь, а метаболическая, или (что то же самое) трофическая сеть. Напрашивается еще один существенный вывод. Хотя разнообразие видовых популяций и разнообразие

<sup>1</sup> Талломы — тело несущих растений, нерасчлененное на стебель и листья.

<sup>2</sup> Хайлов К. М. Биохимия сообществ. — «Наука и жизнь», 1966, № 8, с. 80.

субстратов, растворенных в морской воде, очень велико, «ведьмин суп» — не такая уж хаотическая смесь. Действительно, все органические и неорганические метаболиты организмов перемешаны в воде. Но одновременно все они непрерывно движутся от организма к организму, от популяции к популяции, «текут» по невидимым трофическим каналам, одни быстрее, другие медленнее. Это, собственно, не «ведьмин суп» и вообще не «суп»: он разумно и целесообразно организован природой, он упорядочен, как упорядочена и вся жизнь. Не

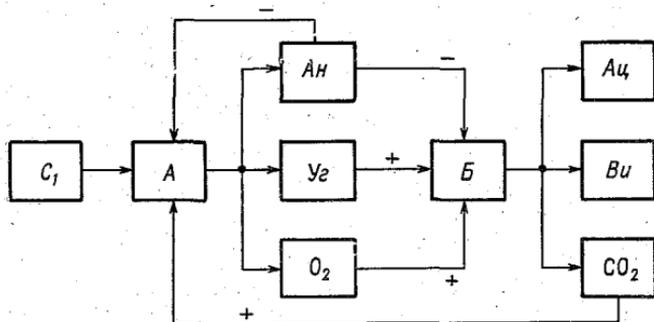


Рис. 39.

*А* — популяция водорослей; *Б* — популяция бактерий, потребляющих метаболиты водорослей; *Ан* — антибиотики, *U<sub>2</sub>* — углеводы, *O<sub>2</sub>* — кислород, продукт фотосинтеза; *Ац* — ацетат, *Vi* — витамин; *CO<sub>2</sub>* — углекислота, продукт метаболизма бактерий; *C<sub>1</sub>* — запас *CO<sub>2</sub>* в морской воде.

таков ли и человеческий язык? Его элементы могут лежать по алфавиту в словарях, как лежат в книгах о море списки видов или списки трофически ценных субстратов. Но такое их расположение — простая условность, а не природный строй. Напомним, что порядок, свойственный живому человеческому языку, бесконечно варьирующий и бесконечно содержательный, создается не алфавитным строем словарей, а живой практикой речи, мыслью. Именно в этом «жизнь» языка.

Филологи дали группам элементов своих систем удобные названия: «слово», «фраза», «рассказ», «роман». Морские биологи дали своим системам названия: «вид», «популяция», «цепь», «сеть», «биоценоз». **Биоценоз** — то, о чем пойдет речь, — совокупность видовых популяций, совместно обитающих на одной общей тер-

ритории, на площади дна или в объеме воды, связанных друг с другом теми или иными связями и составляющих в силу этого некое единство более крупного ранга, чем отдельный организм или популяция. Если продолжить аналогию с языком, то биоценоз — аналог по меньшей мере рассказа, новеллы... Целостное произведение живой природы — так можно сказать в более общей форме.

Рассмотренный выше биоценоз можно в известном смысле назвать «элементарным», имея в виду, что он состоит всего из двух видовых популяций (минимальное число). Но и он, при своей простоте, обладает важнейшим свойством биоценоза — неразрывностью, целостностью. Стоит изъять из него один из двух его биологических элементов — видов, и он перестанет существовать. Сообщество распадется. Видовое разнообразие реальных биоценозов неизмеримо выше. Если учитывать только одни виды водорослей и бактерий, то в воде какого-нибудь морского залива одновременно присутствуют десятки видов тех и других. Каждый из них выделяет какие-нибудь специфические для него метаболиты. Каждый сосед имеет тоже специфические «вкусы». И чем больше видовое разнообразие при условии метаболического различия видов, тем выше сложность биоценоза, тем выше его стабильность, устойчивость по отношению ко внешним воздействиям.

Стабильность сообщества организмов, свободно парящих в толще воды... О чем, собственно, речь? Конечно, не об устойчивости видимой. Клетки водорослей и бактерий могут быть перемешаны любым образом, «облако», которое они образуют, может иметь любую форму. Но определенное количественное соотношение между биомассами и численностями видовых популяций в принципе должно сохраняться. Вернемся к рис. 39, взглянув на него теперь с точки зрения взаимной регуляции численности двух видов. Клетки водорослей выделяют одновременно и углеводы, необходимые бактериям для роста, и антибиотики, при определенной концентрации начинающие подавлять этот рост. Налицо два вида прямого управления. Но потребляя углеводные метаболиты водорослей, бактерии в свою очередь выделяют витамины, необходимые им для роста. Эта положительная обратная связь тоже вид управления. Весь

смысл трофических связей организмов в биоценозе, если рассматривать его с точки зрения управления, а не просто питания организмов, заключается в том, чтобы взаимная регуляция обеспечивала оптимальное существование взаимосвязанных видов сообщества. Чем больше в микробном сообществе разных вариантов метаболических связей, тем надежнее управление и стабильнее само сообщество. Если один канал откажет (например, у водорослей, нуждающихся в витаминах бактерий, появится какой-нибудь конкурент), то будет работать другой. Произойдет определенная перестройка соотношений видов, но сообщество как таковое сохранится и будет функционировать.

### «Легкая» жизнь на границе фаз

Человек живет не в воздухе, не под землей, не под водой, а на границе раздела трех перечисленных фаз — твердой, жидкой и газообразной. Почему именно на границе фаз или около нее? Вероятно, здесь жить легче: тут большее **разнообразие** условий и большая **насыщенность** факторами, необходимыми для жизни. Человек не одинок в своем выборе. Так же поступает и большинство других организмов, как на суше, так и на море. В самом деле, максимальная концентрация кислорода в воде наблюдается обычно в верхнем ее слое. Здесь же больше всего света, лучше происходит обмен углекислотой между водой и атмосферой. Разнообразие и обилие организмов в верхнем слое воды хорошо известны. Эта часть населения водной толщи получила даже особое название — нейстон<sup>1</sup>.

В море есть еще и внутренняя граница — граница «вода — твердое тело». Она существует на поверхности построек, погруженных в воду, на поверхности плавающих судов. Не случайно и постройки, и суда так быстро обрастают в воде. Но гораздо более важна в жизни моря другая твердая поверхность — поверхность взвешенных в воде мельчайших частиц, органических, неорганических, органоминеральных, объединяемых в морской биологии собирательным понятием «детрит».

---

<sup>1</sup> См., например: Зайцева Ю. П. Морская нейстонология. Киев, «Наукова думка», 1970.

Детрит — это «концентрат», содержащий в большом количестве самые разнообразные, в том числе биологически очень важные, химические компоненты: от металлов (железа, марганца, молибдена и других) и биогенных элементов (азота, фосфора и кремния) до органических соединений (белков, углеводов и даже витамина  $B_{12}$ ). Часть из них входит в состав детрита и при его разложении постепенно выделяется в воду, привлекая микроорганизмы; другая часть адсорбирована и сконцентрирована на его поверхности.

По этой ли причине или из-за специфических особенностей поверхности раздела фаз, о которых рассказано в предыдущей главе, скорее из-за того и другого, на поверхности детрита концентрируются не только химические вещества, но и мелкие организмы. Полагают, что для бактерий твердая поверхность детрита может служить местом, где от них требуется гораздо меньше энергетических затрат, чем на жизнь в растворе. Кроме того, что она играет роль «столовой» и «дома отдыха», для микроорганизмов, размножающихся делением, как полагают некоторые микробиологи (например, Ю. Горбенко), поверхность детрита может служить и своеобразным «родильным домом», облегчая деление материнской клетки на дочерние. Биомасса организмов, населяющих детрит, достигает 10% его веса. При внесении свежего детрита в морскую воду на него сразу же переходит из раствора до 90% бактерий, и начинается их интенсивное размножение. Бактерии ( $B_1$ ) выделяют ферменты ( $F$ ), которые ускоряют разложение детрита и адсорбированных на нем белков и полисахаридов ( $C_M$ ) до низкомолекулярных органических веществ ( $C_N$ ), служащих им пищей. На рис. 40 показана эта положительная обратная связь. Следом за бактериями на детрите начинают развиваться одноклеточные водоросли — флагеллаты ( $B_2$ ).

Часть из них на свету поглощает выделяемый бактериями углекислый газ, синтезирует органическое вещество и выделяет его и кислород, дополнительно «подкармливая» бактерии — вторая положительная обратная связь. Можно ожидать взрыва биомассы бактерий. Однако на детрите «легкая жизнь» не только для бактерий, но и для тех, кто питается ими, для «хищников». Бактерии становятся жертвами тех же флагеллатов,

особенно в темноте, когда флагаелляты не могут обеспечить себя одним фотосинтезом, а также других, более крупных организмов, например силиатов ( $B_3$ ), которые, кроме того, питаются и флагаеллятами.

В результате переходный процесс (от начала заселения детрита до стабилизации биомасс) оказывается автоколебательным. Для иллюстрации на рис. 41 приведены экспериментальные данные<sup>1</sup> по динамике биомасс бактерий и флагаеллятов на детрите.

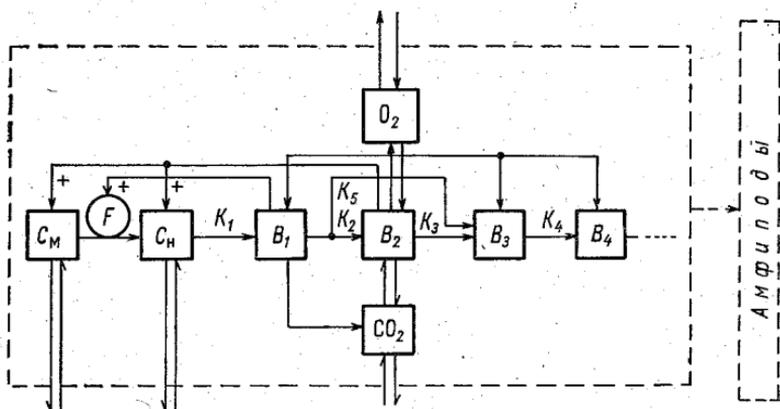


Рис. 40. Микросистема на детрите.

$C_M$  — органические макромолекулы;  $C_H$  — низкомолекулярные органические вещества;  $F$  — ферменты;  $B_1$  — бактерии;  $B_2$  — флагаелляты;  $B_3$ ,  $B_4$  — силиаты.

Математические модели таких систем строятся на основе уравнений Вольтерра—Лотка и для звена бактерии—флагаелляты, если не учитывать все остальные связи в системе, изображенной на рис. 40, можно записать такой «блок»:

$$\frac{dB_1}{dt} = k_1 C_H B_1 - k_2 B_1 B_2 - k_3 B_1 B_3$$

$$\frac{dB_2}{dt} = k_2 B_2 B_1 - k_3 B_2 B_3$$

<sup>1</sup> Fenchel T. Studies on the decomposition of organic detritus derived from the turtle grass *Thalassia Testudinum*.— «Limnology and oceanography», 1970, vol. 15, N 1, p. 14—21.

Эти уравнения показывают, что должны происходить колебания биомасс «хищников» и «жертв» около средних значений. Кто же из организмов выигрывает на поверхности частиц детрита — силиаты? Выигрывает биостат. Детрит с населяющими его многочисленными организмами оказывается лакомым кусочком для более крупных «хищников» — амфипод. Они заглатывают детрит с микроорганизмами, а затем выбрасывают его, не переваривая, в виде экскрементов, но уже без населения. При этом амфиподы «заботятся» о своем будущем: они размалывают детрит, увеличивая этим его активную поверхность в 2—3 раза, и тем самым обеспечивая еще более быстрый рост нового населения детрита, пришедшего на смену съеденному.

Таким образом, и в этом случае популяция амфипод не забывает «включить» положительную обратную связь — залог собственного благополучного развития:

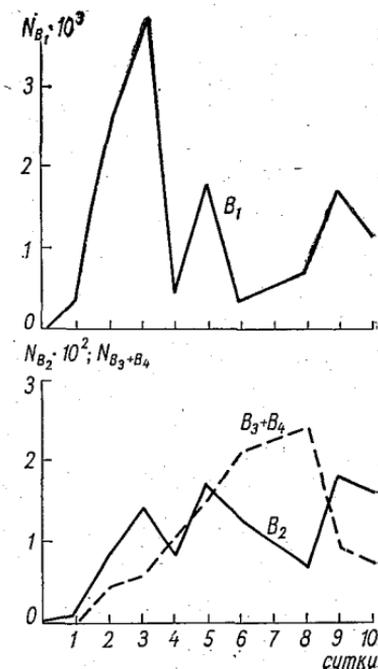
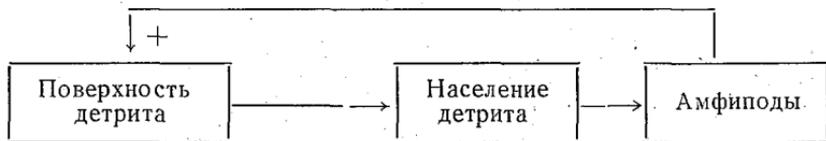


Рис. 41. Динамика популяций сообществ на детрите (Fenchel, 1970 г.).

$N$  — число организмов в расчете на 1 мкг детрита;  $B_1$  — бактерии;  $B_2$  — флагелляты;  $B_3 + B_4$  — силиаты.



На амфипод тоже находятся хищники. Колесо биологической циркуляции не останавливается. Заодно через звено детрит — организмы в океане проходит переработку гигантская масса разнообразнейших химических веществ.

Выступая как один из основных регулирующих механизмов в биостате, механизм «хищник—жертва» обеспечивает и совершенно упорядоченную трансформацию химических веществ, работая, таким образом, и на хе-мостат.

Для полноты картины добавим, что детрит в океане оседает и частично успевает дойти до дна, выходя таким образом «из игры». Скорость его оседания регулируется плотностью ( $\rho$ ) и температурой ( $T$ ) воды, а также вертикальным переносом ( $K_z$ ) воды в океане (см. гл. IV, рис. 49).

Это звено как часть более сложной системы будет рассмотрено в последней главе.

### Что можно увидеть, заглянув под воду у побережья Баренцева моря

Животные «вписаны» в прибрежные биоценозы в принципе так же, как и гетеротрофные бактерии. Но с одной важной разницей. Бактерии — существа примитивные, не имеющие пищевого тракта и поэтому питающиеся растворенной органической пищей. Животные же стоят в эволюционном ряду неизмеримо выше. Почти у всех имеются органы внутреннего пищеварения. Поэтому и питаются они твердой пищей: бактериями, водорослями, другими животными, а иногда детритом. Частично они усваивают и растворенные в воде органические соединения, но это биохимический реликт, и у большинства развитых животных он не имеет особенно большого значения в их жизни.

Если отвлечься от того факта, что животные и гетеротрофные бактерии питаются пищей, разной по своему физическому состоянию (животные — твердой пищей, а бактерии — растворенным органическим веществом), то две эти группы организмов принципиально подобны друг другу и в экономике биоценоза занимают во многом сходное место (об их важнейших различиях мы пока говорить не будем). А значит, растения и животные связаны аналогично тому, как связаны одноклеточные водоросли и бактерии. Для прибрежных биоценозов Баренцева моря характерны, например, такие связи:

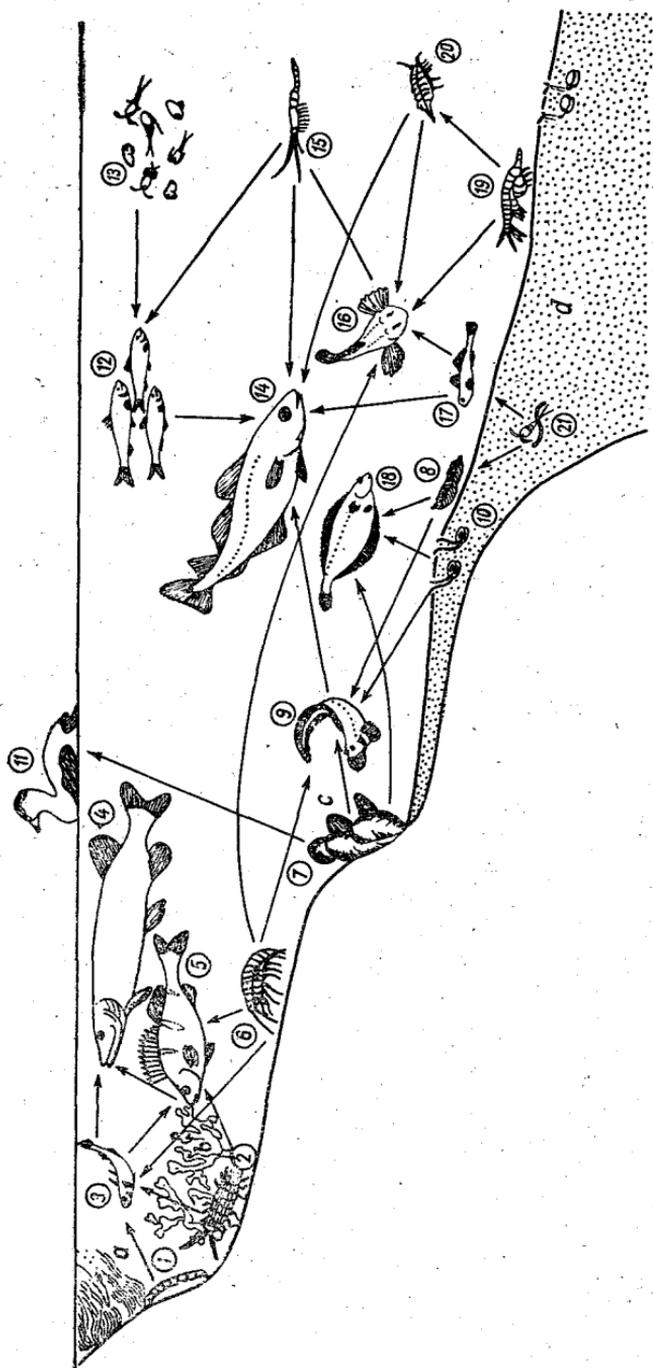
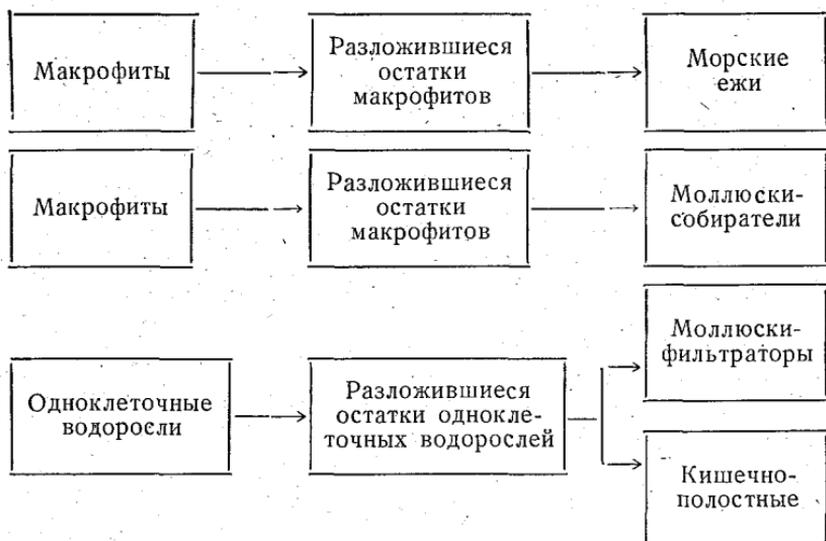


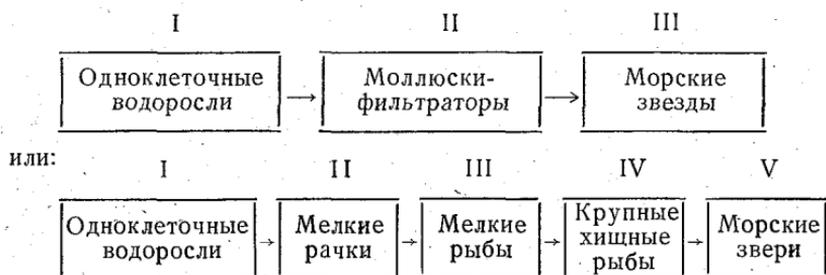
Рис. 42. Пищевая цепь биоценоза прибрежных макрофитов.

*a* — пояс кладофоры, *b* — пояс фукусов, *c* — пояс мидий, *d* — мягкое дно;  
 1 — личинка хирономид, 2 — изопода, 3 — колошкка, 4 — щука, 5 — окунь, 6 — Сокоплав, 7 — мидия, 8 — полихета, 9 — вивипарус, 10 — кардиум, 11 — гага, 12 — сельдь, 13 — планктон, 14 — треска, 15 — мязда, 16 — бычок, 17 — гоблус, 18 — камбала, 19 — амфипода, 20 — морской таракан, 21 — мейофауна.



Другие связи можно проследить на рис. 42.

Но далеко не все животные травоядны или поедают разложившиеся остатки организмов. В сообществах Баренцева моря это, например, морские звезды, рыбы или тюлени. Типичная пища морских звезд — моллюски, а пища сельди — мелкие парящие в воде рачки, в свою очередь питающиеся одноклеточными водорослями. Сельдь тоже становится жертвой более крупных рыб, а они — жертвой крупных морских животных. Таким образом, на основе отношений «хищник—жертва» образуются трофические цепи:



Группы организмов, образующие последовательные звенья пищевой цепи, называются трофическими уровнями (I—V).

Если рассматривать пищевые цепи хищника и жертвы более детально, то окажется, что они переплетаются друг с другом, образуя, как и в случае внешне-метаболических связей, сложные трофические сети. На рис. 42 и была показана такая сеть в прибрежном сообществе Мурмана.

Схема потоков вещества в таком сообществе похожа на ту, что приводилась на рис. 39, но, разумеется, сложнее ее. Если превратить изображение сети «хищник — жертва» в простую блок-схему, то можно разрабатывать эту модель дальше. В таких схемах существует множество обратных связей — положительных и отрицательных, а следовательно, и широкая возможность для процессов управления и автоматического регулирования.

Вот простой пример взаимной регуляции численности в системе «хищник — жертва». Парящие в воде рачки — так называемый зоопланктон — питаются одноклеточными водорослями — фитопланктоном. Если скорость выедания фитопланктона рачками превысит скорость прироста этого корма, то популяция водорослей естественно начнет разреживаться. В результате постепенно снизится и численность самих рачков, так как им будет не хватать корма. Снижение численности рачков будет происходить до тех пор, пока прирост фитопланктона не превысит его выедание разрежившейся популяцией зоопланктона. Тогда возможна новая вспышка его численности. Такое колебание численности популяций двух трофически связанных видов, идущее с некоторым запаздыванием по отношению друг к другу (см. рис. 1 и 41), происходит в морских сообществах постоянно и касается многих пар видов. Математическая модель этого процесса (уравнения Вольтерра — Лотка) была одним из первых успехов теоретической морской экологии и не утратила своего значения до сих пор. Теперь такие колебательные циклы обнаруживают и в системах нехищных внешнеметаболических связей.

### Чего никак не увидишь, заглянув под воду. Трофический каскад

Схемы сообщества, подобные той, что была приведена на рис. 42, можно встретить в любом учебнике морской биологии. Такие схемы нужны и полезны и в

технике, и в биологии, но они — лишь первый шаг к пониманию устройства и жизни сложной системы. Вторым шагом — ее принципиальная схема. В радиотехнике это электрическая схема. Она удобна тем, что ее язык универсален. Универсальным должен быть и язык трофодинамики, чтобы можно было описывать структуру и функционирование биоценозов со всем разнообразием их связей.

Раз любая живая система открыта и существует лишь благодаря непрерывному притоку и оттоку вещества и энергии (не зря говорят: «поточная система»), то ее в принципе можно описать в форме соответствующего каскада: «падающая» с одного трофического уровня на другой, вещество и связанная в нем энергия разделяются на несколько потоков. Основных потоков существует три. Поступившее на любой уровень вещество, во-первых, образует биомассу своего уровня ( $P$ ), во-вторых, оно частично выделяется в виде конечных продуктов углеродного обмена —  $\text{CO}_2$ , а свободная энергия, выделившаяся при этом, рассеивается в форме тепла ( $T$ ). В-третьих, вещество выделяется в виде органических экскретов, хитиновых покровов, отпадающих при линьке животных, и т.п. ( $E$ ).

Например, для звена первичной продукции, где вещество синтезируется из углекислого газа и воды при участии солнечной энергии, уравнение прихода и расхода по разным статьям бюджета имеет следующий вид:

$$P = p + T + E,$$

где  $P$  — валовая продукция;  $p$  — чистая продукция, или весовой прирост биомассы;  $T$  — траты вещества на дыхание и  $E$  — прижизненное выделение органических метаболитов. Все элементы уравнения можно измерить, выразив их в единицах количества углерода или в калориях, что будет одинаково универсально. Примерное численное соотношение элементов балансового равенства для первичных продуцентов таково:

$$100 = 50p + 35T + 15E.$$

У гетеротрофных организмов существуют те же основные входы и выходы, так что уравнение балансового равенства очень похоже на предыдущее:

$$P = p + E_1 + E_2 + T,$$

или в примерном численном выражении:

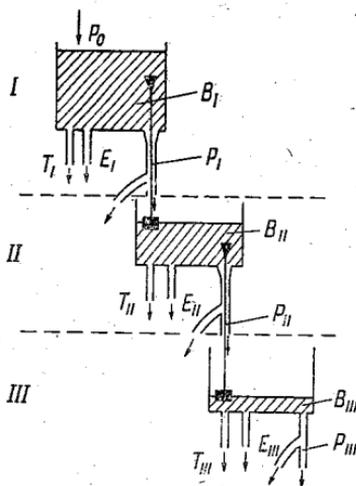
$$100 = 30p + 20(E_1 + E_2) + 50T,$$

где  $P$  — продукция гетеротрофного уровня;  $p$  — потребленная пища;  $E_1$  — выделенные твердые отходы метаболизма,  $E_2$  — выделенные жидкие отходы метаболизма и  $T$  — траты вещества на дыхание. Все входы и выходы также могут быть выражены в единицах количества углерода или энергии.

Сведения об отдельных трофических уровнях нетрудно теперь объединить и применить их к описанию трофических цепей. Любая цепь, состоящая из первичных продуцентов (I), растительноядных (II) и поедающих их хищников (III), может быть представлена в виде каскада «дырявых кастрюль», отверстия которых соотносятся друг с другом (в одной кастрюле), как соотносятся между собой статьи материально-энергетического бюджета организма (рис. 43). Заметим, что в каждый ни-

Рис. 43. Гидродинамическая модель трофического каскада.

$B$  — биомасса уровня,  $P$  — прирост,  $E$  — выделение экскретов,  $T$  — траты на дыхание. Уровни: I — первичные продуценты (водоросли), II — растительноядные животные, III — хищники, питающиеся растительноядными животными.



жележащий уровень попадает лишь часть биомассы, синтезированной на вышележащем уровне, так как значительная часть организмов погибает и разлагается, не успевая быть съеденной.

Допустим, что из первой кастрюли во вторую, нижнюю, поток  $P_I$  выливается со скоростью 10 л/ч. Из второй кастрюли в следующую также попадает лишь 1/3,

т. е. около 3,3 л/ч, а 2/3 отводятся в другие каналы ( $T_{II}$  и  $E_{II}$ ).

Пусть по каналу  $P_{III}$  из самой нижней кастрюли тоже оттекает лишь треть воды, т. е. около 1 л/ч, а 2/3 отчуждаются по каналам  $T_{III}$  и  $E_{III}$ . Если сечения отверстий  $P_I$ ,  $P_{II}$  и  $P_{III}$  в кастрюлях равны между собой, то такое соотношение скоростей вытекающих потоков (10:3,3:1) возможно лишь в том случае, если вода в кастрюлях установится на уровнях, соотносящихся друг с другом как 100:10:1. Действительно, по уравнению Торичелли, уровень воды в баке ( $h$ ) связан со скоростью ее истечения из него ( $v$ ) уравнением

$$v = \kappa \sqrt{2gh},$$

где  $\kappa$  — потери на трение (ими в данном случае можно пренебречь) и  $g$  — ускорение свободного падения. Из этого уравнения следует, что если уровни воды в баках соотносятся как 100:10:1, то скорости истечения относятся как 10:3,3:1.

Такая гидродинамическая модель несколько упрощает картину, существующую в трофической цепи. В ней не учтены некоторые детали, а взятый числовой пример отражает лишь частный случай из многих весьма разнообразных соотношений параметров, которые наблюдаются между уровнями трофической пирамиды в реальных сообществах. Важно другое: модель принципиально верно передает динамическую ситуацию, существующую в главном трофическом каскаде любого сложного сообщества, так как аналогом притекающей в кастрюли воды является либо углерод пищи, либо содержащаяся в пище энергия (на первом уровне это энергия солнца). Удельные скорости тока воды через отверстия кастрюль (« $P$ ») аналогичны удельным скоростям продукции (обычно ее выражают в граммах продуцируемого органического вещества на 1 г или 1 кг биомассы организмов этого уровня). Уровням воды в кастрюлях аналогичны биомассы организмов на каждом трофическом уровне сообщества. В соответствии с гидродинамической моделью каскада биомасса первичных продуцентов обычно в 5—10 раз превышает биомассу травоядных, а биомасса хищников соответственно ниже биомассы их предшественников по цепи. Величины удельной продукции

организмов в последовательных трофических уровнях соотносятся между собой в такой же согласии с моделью.

Насколько верно в принципе предсказание модели относительно соотношения биомасс разных трофических уровней и скоростей продукции и насколько реальные их соотношения отличаются от теоретически возможных, видно из нескольких примеров. По данным известного океанолога В. Г. Богорова<sup>1</sup>, соотношение биомасс рачков, обитающих в толще воды (зоопланктон), более крупных животных, обитающих на дне моря (бентос) и плавающих в воде крупных животных (нектон) в целом по Мировому океану равно 21:10:1 млрд. т. А годовая продукция тех же групп животных соотносится как 53:3:0,2. Отметим, что биомассы названных групп животных находятся по отношению друг к другу примерно в том же положении, что и «дырявые кастрюли» в гидродинамической модели. Таким образом, правило «пирамиды биомасс», вытекающее из этой модели, хорошо соблюдается в море. Основание этой пирамиды — водоросли, служащие пищей всем животным. В биоценозах суши и пресных водах, а также в прибрежных морских биоценозах их биомасса намного выше биомассы животных, как это и предполагается гидродинамической моделью. Однако в целом по Мировому океану биомасса водорослей равна, по данным В. Г. Богорова, всего 1,7 млрд. т, что значительно ниже общей биомассы морских животных (32,5 млрд. т). Однако это количество водорослей вполне обеспечивает питание последующих уровней за счет очень высокой скорости продукции, которая водорослям свойственна (550 млрд. т в год по сравнению со скоростью продукции всех животных, равной 56 млрд. т в год). При определенных параметрах потоков воды такую картину можно получить и в гидродинамической модели.

При всей своей наглядности гидродинамическая модель малосудобна для научных целей. Более удобной была бы электрическая модель. Но наиболее удобна математическая модель, реализованная на ЭВМ. Такие модели существуют, и их исследование дает интересные результаты. Институт океанологии АН СССР в течение нескольких лет разрабатывает под руководством

---

<sup>1</sup> Богоров В. Г. Жизнь океана. М., «Знание», 1969.

М. Е. Виноградова машинную модель потока энергии через пелагическое сообщество тропических районов Тихого океана. Для этого используются данные, собираемые сотрудниками института во время экспедиций на известном научно-исследовательском судне «Витязь».

Но вернемся к «дырявым кастрюлям», чтобы сделать еще некоторые выводы. Читатель, присмотревшийся к рисунку и его объяснению в тексте, поймет теперь, каким образом поточный характер системы, на первый взгляд исключающий как будто бы всякую стабильность, приводит к определенному соотношению биомасс организмов на разных трофических уровнях, т. е. к определенной и стабильной структуре сообщества.

На события в трофическом каскаде можно взглянуть и с точки зрения управления ими. Уровень II контролируется уровнями I и III, а уровень III уровнем II.

Если добавить к этому, что на каждом трофическом уровне находится обычно много разных видов, имеющих специфические особенности питания и продуцирования, то нетрудно понять, что возможности взаимной регуляции в трофических сетях весьма велики, о чем мы уже не раз говорили. Такую взаимную регуляцию в трофической цепи называют внутренним управлением.

Структуру трофической пирамиды можно выразить не только в единицах количества вещества, но и в калориях, заключенных в нем, в калориях на кубометр воды или на квадратный метр поверхности дна, если речь идет об организмах донных. Вот один конкретный пример:

Энергия чистой первичной продукции	→	Энергия в звене травоядных животных	→	Энергия в звене хищников, питающихся травоядными
15		1,5		0,15

калорий на 1 м<sup>2</sup> поверхности дна в сутки.

Этот пример опять-таки отражает лишь один из многих возможных случаев. В различных сообществах соотношение запасов энергии на разных уровнях различается, однако «закон пирамиды» остается неизменным, отражая основную черту структуры сообщества.

Чем же вызываются различия в трофической структуре разных сообществ? Прежде всего разнообразием

конкретных условий среды, существующих в разных морях и районах океана. Например, в одних районах мощный подъем глубинных вод, содержащих большой запас биогенных элементов, необходимых для успешного фотосинтеза, вызывает интенсивный рост биомассы водорослей. А в других — биомасса мидий на отмели, возможно, из-за дополнительных источников пищи (например, приносимый из других сообществ детрит) оказывается выше «нормы».

На каждом трофическом уровне действуют свои определяющие его биомассу многочисленные внешние факторы, образующие внешнее управление звеном или трофической цепью, например:



В звене первичной продукции ими могут быть не только биогенные элементы, но и интенсивность света, и температура. На всех уровнях каскада это может быть температурный фактор или соленость воды, а на уровне рыб — и заболевания рыб, и массовая гибель из-за разных внешних причин, и промысел. Несколько забега вперед, скажем, что разнообразие факторов, влияющих на продукцию каждого уровня как раз и позволяет искусственно видоизменять природные системы в сторону, выгодную человеку. Принцип внешнего управления — также одно из основных средств в планировании и создании искусственных морских ферм. Например, в каком-нибудь заливе можно систематически вносить в воду биогенные элементы, стимулируя первичную продукцию, а на этой основе и последующие звенья пищевой цепи. Такие фермы уже создаются, биогенные элементы вносятся с бытовыми сточными водами — одновременно решаются две проблемы: пищевая и сточных вод. Биологи

должны учитывать влияние внешних факторов не только для промысловых целей, но и для изучения природных продукционных систем. Вот пример модели, предложенной для звена фитопланктона известным американским океанографом Гордоном Райли. Она показывает выедание фитопланктона растительноядными животными, связь его продукции с потоком ассимилируемой энергии и такими факторами, как турбулентность водных масс и концентрация биогенных элементов:

$$\frac{dP}{dt} = P(P_h - R_P - q),$$

где  $P$  — популяция фитопланктона на единицу объема воды;  $P_h$  — фотосинтетический коэффициент, являющийся функцией освещенности, поглощения света водой и концентрации биогенных элементов, а также турбулентности воды;  $R_P$  — дыхание фитопланктона с коррекцией на температуру воды и  $q$  — коэффициент выедания фитопланктона, пропорциональный плотности популяции растительноядных животных. Хотя эта модель учитывает не все факторы, влияющие на продукцию фитопланктона, она дает результаты, близкие к реальным событиям, связанным с динамикой фитопланктона (см. рис. 1).

Для зоопланктона, питающегося водорослями, аналогичное уравнение выглядит так:

$$\frac{dH}{dt} = H(A - R - C - D),$$

где  $H$  — популяция зоопланктона,  $A$  — коэффициент выедания им фитопланктона, пропорциональный биомассе последнего до величины 8% веса тела животных в день,  $R$  — дыхание зоопланктона,  $C$  — выедание зоопланктона хищниками следующего уровня и  $D$  — естественное отмирание рачков.

Но вернемся к вопросу об управлении структурой и параметрами пищевых цепей в биоценозах. Возможности воздействовать на них лежат не только в использовании таких абиотических факторов, как свет, температура, концентрация биогенных элементов (которые можно в той или иной мере задавать в условиях морских ферм). Можно изменять и структуру самой пищевой цепи, вставляя в нее некоторые «искусственные» элементы. Пример таких воздействий — успешные результаты

акклиматизации животных — перенесения ценных для человека видов из одного моря в другое. Так, можно сослаться на удачное переселение одного из дальневосточных видов лосося — горбуши — в Баренцево море. Начатый около 10 лет назад этот большой эксперимент (на нескольких реках Кольского полуострова, впадающих в Баренцево море, были построены специальные хозяйства для выращивания мальков из икры — «рыбоводные заводы») привел к тому, что теперь здесь начат промышленный лов горбуши. Точно так же из Азовского моря в Каспийское успешно переселяли кефаль. В послевоенные годы в научных журналах и газетах писали об удачном переселении другой группы организмов — беспозвоночных: в Каспийское море были завезены и прижились там nereисы, служащие хорошим кормом для рыб. Проводятся такие работы и за рубежом. Большую пользу принесло переселение одного вида сельди из Атлантического океана в Тихий. Акклиматизация приносит хорошие результаты только в том случае, если переселяемый вид «вписывается» в новом водоеме и в существующую там пищевую сеть, и в окружающие абиотические условия. И если до сих пор вселение новых видов базировалось не столько на теории пищевых цепей, сколько на общих представлениях о жизни и жизненных потребностях переселяемых видов, то в будущем оно станет опираться именно на теорию. Тогда можно будет не только заранее предвидеть — приживется переселенец или нет, но и предсказать, какова будет его возможная биомасса и скорость продукции в новых условиях, как его вселение повлияет на структуру других элементов пищевой сети.

### Живые гиганты моря

В рассказах о морских путешествиях и в книгах о жизни в водной стихии гигантами называют китов, акул, иногда кальмаров, настолько крупных, что они вступают в схватки с другими великанами. Книги об акулах и знаменитых китах (вспомните «Моби Дика») идут нарасхват. Между тем настоящие левиафаны моря и подлинные хозяева всего живого в нем мало известны читателям, потому что они еще незаметнее микробов. Между тем именно они управляют живым подводным

миром. Как и мельчайшие бактерии, они нуждаются в притоке вещества и энергии и выделяют продукты жизнедеятельности. Они дышат, сами поддерживают свое существование, даже обладают памятью... Эти гиганты — большие биологические системы. Как и все сложное, они состоят из более простых элементов, с которыми мы уже познакомились. Как же эти элементы связаны?

Два или три течения в океане могут сливаться друг с другом, как может раздваиваться единое течение. Могут соединяться две или три химические реакции. Сливаются друг с другом и разные биологические потоки в сообществах. И именно это ведет к возникновению в океане больших систем, охватывающих целые моря или даже весь океан. Уже говорилось, что при всем внешнем различии два типа межорганизменных связей — хищные и нехищные — принципиально сходны и нет никаких причин, чтобы они не могли сливаться в единое русло. Действительно, на каждом трофическом уровне часть органического вещества отчуждается из русла отношений «хищник — жертва» и переходит в растворенное состояние. На последнем уровне пирамиды хищников происходит то же самое: животные погибают, их трупы разлагаются и часть вещества переходит в форму растворенного органического вещества (РОВ). Если бы РОВ морской воды не включалось в трофические процессы вновь и не окислялось до минеральных продуктов, то его концентрация непрерывно возрастала бы. Поскольку этого не наблюдается, ясно, что РОВ вновь поступает в трофический каскад.

В основном возвращение РОВ в биологический круговорот вещества в сообществах происходит при участии гетеротрофных бактерий, для которых оно служит пищей.

В значительно меньшей мере ту же роль выполняют и водоросли, для которых растворенные органические вещества служат дополнительным (к фотосинтезу) источником питания. Животные, особенно низшие, тоже способны использовать РОВ для питания, но его доля в рационах, как правило, невелика.

Кроме органических метаболитов, выделяемых всеми группами морских организмов, каждая группа оставляет после себя твердые остатки: фекалии, линичные шкур-

ки, трупы. Все это разлагается в морской воде, превращаясь в бесформенную органо-минеральную взвесь — детрит. Казалось бы, взвесь должна оседать на дно. Но оседание происходит медленно, и по пути на дно частицы отчасти разлагаются, отчасти поедаются организмами-фильтраторами. Так замыкается ещё один «боковой» цикл: отделение органического вещества от основного трофического каскада и его возврат.

Все сказанное хорошо представить в виде упрощенной, но в главных своих чертах полной схемы органического круговорота в большом морском биоценозе (рис. 44). Такой биоценоз занимает обычно очень боль-

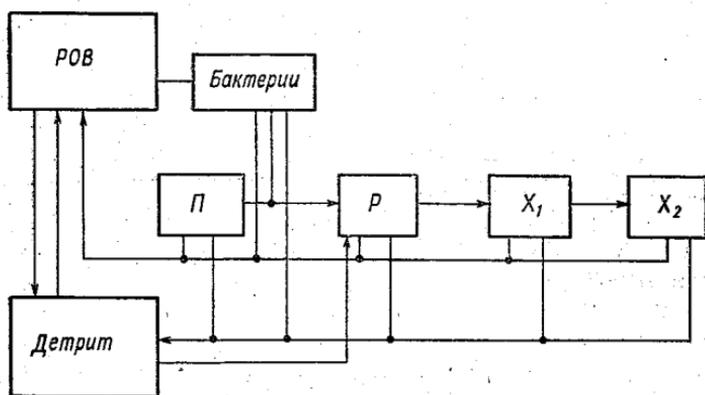


Рис. 44. Блок-схема органического круговорота в большом морском биоценозе.

*П* — первичные продуценты, *Р* — растительноядные животные, *Х<sub>1</sub>* — хищники первого порядка, *Х<sub>2</sub>* — хищники второго порядка, РОВ — растворенное органическое вещество.

шой объем — целый морской залив или фиорд, верхний сто—двухсотметровый слой воды любого моря, все население прибрежной зоны и т. д. Он включает все основные группы организмов, образующие и главный трофический поток, и его боковые ответвления.

Теперь можно сделать вывод: в этой сложной обменной системе существует взаимное управление и все элементы и связи системы образуют определенную внутреннюю структуру, которая в основных своих чертах поддерживается до тех пор, пока существует само сообщество.

Итак, мы подошли, наконец, к тому целостному образованию, которое принципиально подобно живому организму или клетке, но которое имеет свои собственные обменные циклы, отличные от организменных и клеточных. Теперь ясно, почему и клетка, и многоклеточный организм, взятые как самостоятельные системы, не характеризуют обмен веществ в океане. Как ни сложна и как ни важна биохимия клетки и организма, не она определяет главные биологические события в океане. Только сообщество в состоянии обеспечить тот круговорот вещества, который необходим для жизни всех групп морских организмов.

Однако океанические биоценозы не являются еще максимально большой океанической системой, в которой обменом веществ руководит жизнь. Когда-то замечательный русский геохимик академик В. И. Вернадский назвал главное проявление жизни в биосфере «жизненным вихрем». Он имел в виду, что в него вовлекается не только углерод, но **большинство химических элементов**. Они приходят в поток жизни из неорганической среды. На фоне этого широкого геохимического круговорота цикл углерода выглядит хотя и важнейшей, но довольно тонкой струйкой. Для полного обеспечения жизни, кроме углерода, нужны в первую очередь азот, кислород, сера, фосфор, железо, а за ними и множество других химических элементов. В биоценозе полное обеспечение жизни невозможно. Оно осуществляется в системе еще более крупного ранга, получившей название **биогеоценоз, или экосистема**.

Чтобы получить принципиальную схему экосистемы, подключим к биоценозу (который будем рассматривать теперь как один блок) все, что необходимо для поддержания жизни и что захватывает «жизненный вихрь» из окружающей среды: биогенные элементы, кислород, углекислоту, а также океанические запасы РОВ и детрита. Поскольку последние две формы органического вещества не являются организмами, их правильнее отнести к числу элементов экосистемы, а не биоценозов) (рис. 45). Из этой схемы с учетом всего, что уже говорилось об организации биоценозов, можно заключить, что перед нами еще один природный автомат наиболее крупного масштаба. В его основе, как и в основе всех динамических систем океана, лежит постоянный обмен

веществ, гораздо более широкий и разнообразный, чем в биоценозе. Не вдаваясь в подробности, скажем, что массы каждого элемента (блока) экосистемы соотносятся между собой строго определенным образом. Например, в прибрежных экосистемах соотношение масс растворенных в морской воде карбонатов, растворенных в воде биохимически стойких органических веществ, таких же растворенных, но представляющих трофическую цен-

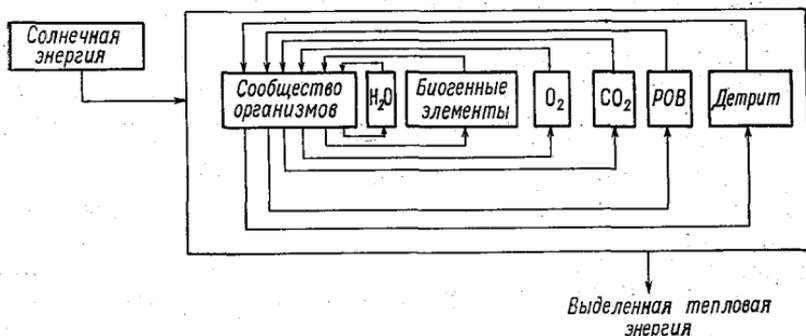


Рис. 45. Схема экосистемы.

ность метаболитов, взвешенного в воде детрита и живой биомассы организмов составляет примерно 100:50:10:5:1. Это соотношение весьма постоянно и поддерживается автоматически, образуя то, что можно назвать структурой экосистемы, как она выглядит если рассматривать лишь ее элементы. Но в экосистеме кроме элементов существуют также их связи друг с другом. Рассматривая всю совокупность таких связей, мы видим структуру экосистемы с другой стороны — со стороны функциональной.

Сравнивая схемы экосистемы и биоценоза, можно видеть, что первая как раз и представляет собой ту наиболее крупную по своим масштабам — буквально океаническую — систему, существование которой позволяет сравнивать океан с единой живой клеткой, с организмом. В экосистеме, как и в организме, объединены и слиты неорганический и органический обмен. Хотя неорганические вещества в воде — биогенные элементы, углекислый газ и кислород формально относятся к компетенции химии, их судьба в море определяется жизнью,

скоростью и характером их вовлечения в «жизненный вихрь» биосферы. В этом смысле они оказываются объектом не столько гидрохимии моря, сколько биогеохимии и биохимии экосистем.

### Человек и биостат

Но оставим академический подход к живому океану и взглянем на его динамические системы с практической точки зрения. На первый взгляд представление о единстве элементов океана, к которому мы шли на протяжении всей книги, не кажется таким уж важным. Могут сказать, что оно просто до тривиальности и слишком абстрактно для практики.

Как ни парадоксально, но именно это представление должно лежать в основе всей практики общения человека с океаном, в основе хозяйственного использования морей, устьевых областей рек, в основе прогнозирования вылова рыб и беспозвоночных, в основе охраны вод моря от загрязнения и т. д.

Под хозяйственным использованием биологических ресурсов океана раньше понимали лишь промысел, объектами которого являются и животные, и растения. В Мировом океане обитает более 15 000 видов рыб и около 600 видов головоногих моллюсков, многие из которых не только съедобны, но и чрезвычайно вкусны и питательны. Кроме того, в океане обитает немногим менее 100 видов китов и ластоногих, тоже служащих объектами интенсивного промысла. Промысел морских рыб в течение многих столетий непрерывно возрастал и достиг сейчас примерно 40 млн. т в год. Теперь прирост вылова рыб замедлился и сейчас он равен всего 3 — 4% в год. Это свидетельствует о том, что рыбные ресурсы океана используются весьма и весьма напряженно. По мнению многих ученых у нас и за рубежом, максимальный вылов может быть не более чем в 1,5—2 раза выше современного. «Запасы» же китов под давлением вылова стали быстро уменьшаться.

Однако киты составляют лишь около 6% всех биологических ресурсов океана, оцениваемых примерно в 100 млн. т. Большая часть всех ресурсов — рыба (около 85% по биомассе). Около 9% общих ресурсов приходится на долю так называемых «нерыбных объектов»: моллюс-

ков, ракообразных и многих других, включая и водоросли. Максимальный вылов пищевых продуктов из моря не должен превышать 80 — 90, по мнению других — 70—80 млн. т в год, так как 10—20% необходимо для нормального воспроизводства стад. Исходя из этих цифр, известный советский океанолог В. Г. Богоров писал недавно: «Оценивая все перспективы повышения улова в Мировом океане (включая моря), нельзя рассчитывать на удвоение вылова в ближайшие 20 — 30 лет просто путем увеличения количества или качества рыболовных судов. Ведь можно подорвать основные запасы. В борьбе за существование при резком уменьшении численности вида он может вообще исчезнуть. Следовательно, эксплуатация биологических ресурсов океана должна вестись рационально...»<sup>1</sup>. О рациональном использовании ресурсов моря и опасности перелова пишут и другие советские ученые.

Итак, необходима рациональная стратегия промысла, основанная на знании законов круговорота и продукции органического вещества в морских сообществах и экосистемах. Самый общий принцип такой стратегии чрезвычайно прост: **беря, отдавать обратно эквивалент взятому**, т. е. возмещать. «Беря — возмещать» — это понятное и справедливое условие, которому следует вся живая природа. Приходится лишь удивляться тому, как много времени требуется человеку, чтобы усвоить этот принцип и следовать ему в практике своих отношений с морем.

Из предыдущего изложения следует, что, изымая из биологических ресурсов моря один продукт и в одном месте, нужно возвращать некий эквивалент в другом месте круговорота. Выловив определенное количество рыбы, можно вернуть материальный эквивалент в виде, например, соответствующего количества биогенных солей, которые поднимут на нужную величину кормовую базу рыб, и тем самым увеличат (восстановят) и самую популяцию рыб: «возмещение» произойдет, хотя биогенные соли могут быть внесены и не точно в том месте, где была выловлена рыба. Большинство морских биологов сходятся во мнении, что удобрять океан пока невозможно. Если где-нибудь и производить подкормки

---

<sup>1</sup> Богоров В. Г. Жизнь океана. М., «Знание», 1969, с. 55.

минеральными или органическими веществами, так это в специально отведенных и пригодных для аквакультуры прибрежных районах — бухтах, заливах (что в настоящее время и делается), хотя возможны и несколько иные варианты.

Прибрежные воды сейчас служат основными районами промысла. На шельфе добывается 86% рыбы, а в районах, удаленных от берега, — только 10%. В прибрежных районах перспективно и фермерское хозяйство. Во многих приморских странах уже сейчас выращивают водоросли моллюсков, ракообразных и даже рыб. Развитая морская ферма — это не что иное, как видоизмененная экосистема, структура которой специально приспособлена к получению полезного продукта в определенных звеньях пищевой цепи — рыбы, морских моллюсков, трепангов или водорослей. Чтобы спланировать ее структуру и схему оптимального управления, нужен прежде всего набросок ее принципиальной схемы. Затем, задавшись определенными параметрами выхода необходимых звеньев, нужно так «подогнать» другие элементы системы и так изменить набросок принципиальной схемы, чтобы система давала нужный выход. Делать все это экспериментально слишком медленно и дорого. В таком деле основная предварительная работа падает на специалистов-планировщиков, работающих с помощью ЭВМ над первоначальной моделью экосистемы. Поскольку животные нуждаются в органическом веществе, синтезируемом водорослями, планировщики непременно должны позаботиться о звене водорослей. Чтобы добиться нужной их продукции, потребуется рассчитать необходимое поступление биогенных элементов, углекислого газа и других факторов. Если строить систему по замкнутому циклу, как и в естественных системах моря, то подача биогенных веществ должна быть обеспечена достаточно быстрым разрушением всех излишков органического вещества, поступающего из разных цепей системы, а также введением дополнительного количества биогенных элементов (эквивалентно отбору продукта, выносимого человеком). Возможно, что дополнительное введение этих веществ окажется больше такого эквивалента. Это будет означать, что часть их переходит в системе в состояние неусвояемого отхода (например, ила), который, возможно, придется удалять

из экосистемы<sup>1</sup>. Хорошо, если вещества, уходящие в «отход», нетоксичны для организмов системы. А если они токсичны, то удаление необходимо. Нетрудно, пожалуй, удалить отходы твердые, оседающие на дно биологического реактора. А если это продукты жидкие? Они окажутся растворенными во всем объеме воды, будут накапливаться в ней до вредных концентраций. Вывести их из системы труднее. Быть может даже, что в реактор придется специально вводить организмы (бактерии, водоросли), разрушающие токсин. А это в свою очередь может изменить весь баланс уже спланированной вчерне экосистемы... Словом, работы здесь, и работы трудной, более чем достаточно. Но именно в этом и заключается синтез экосистемы фермерского морского хозяйства.

Получить из системы одного типа все необходимые продукты будет трудно. Скорее всего будут строиться фермы, специализированные разным образом, как и фермы земледельческие. Значит, единого «типового проекта», одинаково пригодного для разных условий, быть не может, а если он и будет, то общего характера. Конкретные же разработки хозяйственных морских экосистем неизбежно окажутся разными.

Итак, основное условие взаимовыгодного общения человека с биологическими системами океана — это принцип разумного, хорошо обдуманного и спланированного возврата, который может осуществляться в бесконечно разнообразных формах. В разнообразных, но не любых. Некоторые формы «возврата» запрещены самой природой. Можно сказать так: море, как всякий организм, способно «переварить» далеко не любой продукт. Некоторые вещества самым драматическим образом нарушают нормальную его работу. Между тем человек давно и необдуманно выбрасывает в океан отходы промышленных производств, выливает нефтепродукты, загрязняет воды пестицидами, солями ртути и других металлов, вредных для развития жизни.

Гидрохимические съемки, проведенные в 1973 г., показали, что поля загрязнений, простирающиеся от европейского и американского материков, уже сомкнулись в

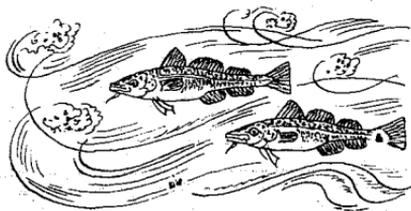
---

<sup>1</sup> Такие отходы являются прекрасным удобрением для почв. Сапропели эффективно используются в сельском хозяйстве.

центре Атлантического океана. Загрязнение океана — проблема не завтрашнего, а сегодняшнего дня. Последствия такой необдуманной практики видны на примере применения ДДТ в борьбе с вредителями и болезнями сельскохозяйственных растений суши, откуда ДДТ попадает в море. Невозможно оценить ущерб, наносимый им биологической продукции. Изучение действия ДДТ на водоросли рыб и показало, что при одних концентрациях ДДТ замедляется их рост, а при других организмы гибнут.

Однако такое знание крайне недостаточно, чтобы судить о вреде, наносимом продукции моря. На его основе нельзя предсказать, как изменится продукция, скажем, через 20 лет. Можно изучить, как распространяется ДДТ по трофической цепи, как он накапливается в организмах разных трофических уровней, какие виды страдают больше и быстрее, какие перестройки в составе сообщества это вызовет. Тогда прогноз продукции через 20 лет станет гораздо реалистичнее. Но и таких сведений мало. ДДТ выносится в океан реками, частично выпадает из атмосферы в виде дустов. Ограничивается его действие только приустьевыми районами и верхним тонким слоем воды или яд переносится в глубинные воды? Стабилен ли ДДТ в глубинной воде, если он туда попадает, как быстро идет его накопление? Эти вопросы показывают, что и гидрологи, и химики тоже обязательно должны быть участниками такого комплексного исследования и прогнозирования. Это будет уже прогноз в экосистеме. Именно он наиболее полон и необходим для предвидения будущего и для ясного понимания настоящего.

Гидрофизические, химические и биологические системы океана существуют изолированно друг от друга только в знаниях человека об океане, но не в самой природе. В современных науках об океане только начали намечаться мосты между этими островами знаний.



## МОСТЫ МЕЖДУ СИСТЕМАМИ. ПЛОДОРОДИЕ. ОКЕАН КАК ПОЧВА

... Четыре фактора можно считать первичными регуляторами природы: энергия, вещества, условия существования и сообщество.<sup>1</sup>

*Е. Одум*

Мы представляем в общем виде схему взаимодействия природных процессов, действующих на поверхности Земли, в океане и атмосфере, но наши сведения о количественных соотношениях в этих связях и в особенности о связях типа управления пока еще отрывочны и примитивны. Таким образом, мы воздействуем на природу, но в то же время еще плохо понимаем, каковы будут протекающие от этого следствия, и, как правило, не считаемся с ними.<sup>2</sup>

*Е. Федоров*

Определим самую примитивную зависимость насыщения океанских вод питательными солями от гидродинамических процессов (перемешивания воды и ее вертикальной скорости) с учетом глубины, на которой концентрация питательных солей не меняется по сезонам (это может быть дно или слой скачка плотности).

Если вырезать в воде какой-то неподвижный объем пространства и предположить, что концентрация питательных солей меняется в нем за счет перемешивания воды, вертикального движения и жизнедеятельности планктона, то уравнение баланса питательной соли  $C$  можно записать так:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = K_z \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} - u_z \frac{\partial C}{\partial z} - aC, \quad (105)$$

где  $\frac{\partial C}{\partial t}$  — суммарное изменение концентрации соли в

<sup>1</sup> Одум Е. Экология. М. «Просвещение», 1968, с. 108.

<sup>2</sup> Федоров Е. К. Некоторые проблемы развития наук о Земле. — В кн.: Взаимодействие наук при изучении Земли. М., «Наука», 1964, с. 52.

объеме;  $K_z \frac{\partial^2 C}{\partial z^2}$  — изменение концентрации, вызываемое вертикальным перемешиванием воды ( $K_z$  — коэффициент диффузии, показывающий интенсивность перемешивания);  $u_z \frac{\partial C}{\partial z}$  — изменение, вызываемое вертикальным движением воды ( $u_z$  — вертикальная составляющая скорости течения);  $aC$  — изменение концентрации, вызываемое жизнедеятельностью планктона и пропорциональное количеству питательной соли.

Допустим, что суммарное изменение концентрации целиком вызывается жизнедеятельностью планктона. Тогда уравнение (105) распадается на два:

$$\frac{dC}{dt} = aC, \quad (106)$$

$$\frac{d^2 C}{dz^2} - \frac{u_z}{K_z} \frac{dC}{dz} = 0. \quad (107)$$

Решение уравнения (106) уже подробно рассматривалось. Решение же уравнения (107) будет зависеть от величины соотношения, называемого числом Пекле:

$$Pe = \frac{u_z}{K_z/H} = \frac{u_z H}{K_z}, \quad (108)$$

где  $H$  — расстояние до некоторого источника питательных солей, т. е. до того горизонта, где концентрация питательных солей постоянна, например расстояние до дна или до слоя глубинных вод.

Вид соотношения связан с тем, что при вертикальном движении питательные соли переносятся по оси  $z$  не разбавляясь, а при перемешивании разбавляются пропорционально удалению от источника. Поэтому нужно искать не простое соотношение двух величин  $u_z$  и  $K_z$ , а соотношение, взятое с учетом влияния этих величин на перенос питательных веществ. Учет достигается делением  $K_z$  на глубину места (или расстояние до источников солей)  $H$ .

Решением уравнения (107) будет следующая формула:

$$C^* = \frac{e^{-Pe \frac{z}{H}} - e^{-Pe}}{1 - e^{-Pe}}, \quad (109)$$

где  $C^*$  — концентрация питательной соли в безразмерных единицах.

Скорость течения, направленную вверх, будем считать положительной, вниз — отрицательной. В соответствии с этим и число Пекле будет иметь или положительные, или отрицательные значения. На рис. 46 показаны распределения концентрации при числах Пекле, равных 16; 8; 4; 2; 1; 0; -1; -2; -4; -8; -16.

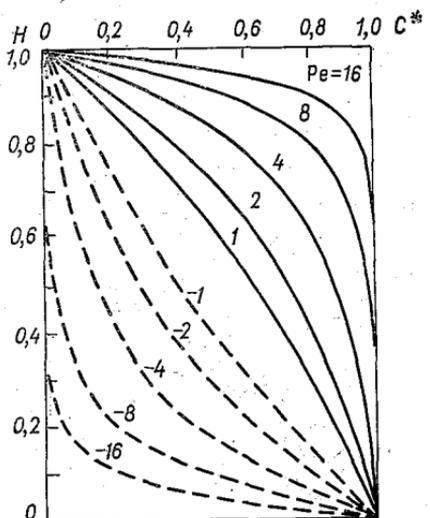


Рис. 46. Структура океанической «почвы» в зависимости от числа Пекле (соотношения вертикальной скорости, интенсивности перемешивания и расстояния до источника).

Сплошные линии — вертикальное распределение питательных солей в богатых (дивергентных) «почвах», пунктирные — в бедных (конвергентных) «почвах». Цифрами показаны числа Пекле ( $Pe = u : K : H$ ).

Рисунок построен таким образом, что в него можно подставить любые значения  $C$ ,  $K_z$ ,  $u_z$ ,  $H$ ,  $z$ , так как вместо расстояния до источника в метрах по оси ординат отложено безразмерное расстояние в долях от величины  $H$ , принятой за единицу. По оси абсцисс вместо абсолютной концентрации в миллиграммах на  $1 \text{ см}^3$  отложена безразмерная концентрация, выраженная в долях

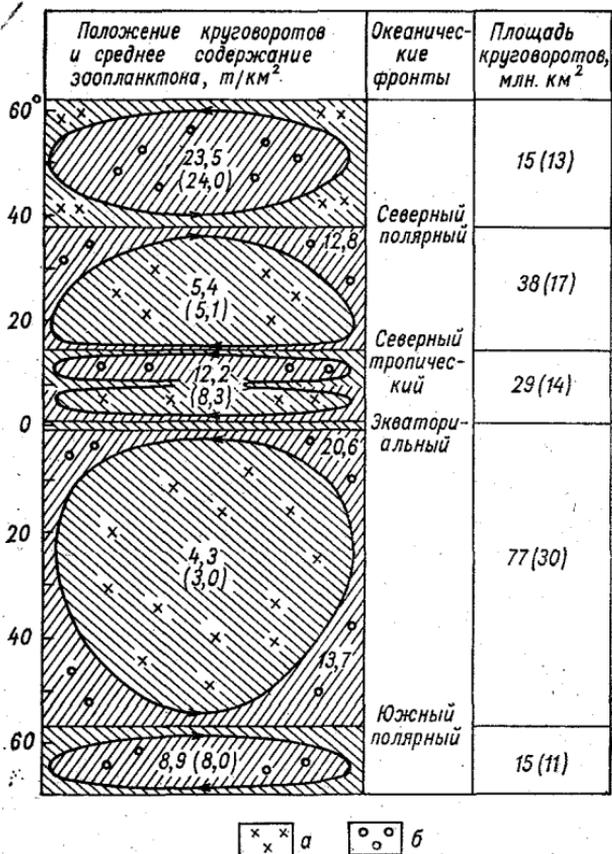


Рис. 47. Конвергентные и дивергентные «почвы» океана.

Стрелки показывают основные круговороты течений на поверхности Тихого океана (по В. А. Буркову, 1968). Цифры обозначают содержание зоопланктона (сырой вес) в верхних 100 м и площади круговоротов (по И. А. Суевой, 1973). В скобках всюду даны для сравнения соответствующие цифры по Атлантическому океану, включая Гренландское, Норвежское и Баренцево моря. а — области нагона — конвергенции, б — области сгона — дивергенции.

единицы. При этом за единицу взята разность между высокой и постоянной концентрацией на глубине  $H$  и пониженной, но тоже постоянной в данный сезон концентрацией на поверхности океана.

Из рисунка видно, что плодородие океанской почвы, насыщенность ее питательными солями, существенно зависит от направления вертикальной скорости.

Вертикальные движения связаны со сгонами и нагонами или дивергенциями (расхождениями) и конвергенциями (схождениями) морских вод, направлением ветрового течения и положением берега. Суть здесь заключается в том, что течение, идущее в антициклоническом направлении (т. е. по часовой стрелке в северном полушарии), имеет циклоническую завихренность, или ротор скорости, в прибрежной зоне от стрежня потока к берегу.

В то же время в центральной части круговорота завихренность скорости носит антициклонический характер. В циклоническом круговороте — все наоборот.

Циклоническая завихренность означает увеличение скорости слева направо, если смотреть вдоль потока, — и это благодаря силе Кориолиса приводит к сгону (дивергенции) вод. Антициклоническая завихренность означает уменьшение скорости слева направо и, следовательно, при ветровом течении произойдет нагон (конвергенция) вод за счет той же силы Кориолиса.

На рис. 47 показаны зоны дивергенции и конвергенции. Проставленные на них цифры показывают среднее содержание в воде планктонных организмов в тоннах сырого веса на  $1 \text{ км}^2$  поверхности океана. Цифры относятся к верхнему стометровому слою моря. Они осредняют многочисленные наблюдения на научных судах (эти осредненные расчеты проведены в МГУ И. А. Суетовой). При сравнении рис. 46 и 47 видно, что между гидродинамикой вод, балансом биогенных элементов и биологической продуктивностью океана существует тесная связь и что на уравнение (105) можно смотреть как на один из самых простых мостов, соединяющих гидродинамические, химические и биологические системы океана.

Уравнение (105) значительно упрощает развитие событий в реальном океане. Действительное положение вещей полнее отразила бы такая запись:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = K_z \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} - u_z \frac{\partial C}{\partial z} - aC + bC_0, \quad (110)$$

где  $C_0$  — концентрация питательных элементов, заключенных в детрите в 1 л морской воды (примем  $C_0 = \text{const}$ );  $bC_0$  — скорость их перехода из детрита в морскую воду, предполагаемая постоянной по глубине.

При условиях стационарности уравнение (110) можно записать в виде уравнения

$$K_z \frac{d^2 C}{dz^2} - u_z \frac{dC}{dz} - aC = bC_0. \quad (111)$$

Если учесть, что концентрация детрита меняется не сильно, то общим решением этого уравнения будет:

$$C = C_1 e^{r_1 z} + C_2 e^{r_2 z} + B, \quad (112)$$

где  $B, C_1, C_2$  — постоянные, а  $r_1, r_2$  — корни алгебраического характеристического уравнения

$$K_z r^2 - ur - a = 0,$$

получающегося заменой  $C$  и производных на степени  $r$  (т. е.  $C$  на  $r^0 \frac{dC}{dz}$  на  $r^1$  и  $\frac{d^2 C}{dz^2}$  на  $r^2$ ).

Или еще лучше вместо уравнений (110) и (111) записать выражение более общего характера:

$$K_z \frac{d^2 C}{dz^2} - u_z \frac{dC}{dz} - aC = F, \quad (113)$$

где  $F$  — любая функция, аргументом которой не является  $C$ , отражающая, вообще говоря, любое воздействие на систему на различной глубине.

Решение уравнения (113) можно получить классическим путем, аналогично предыдущему, только  $B$ , в зависимости от  $F$ , может оказаться и не постоянной, например:

$$B = B_0 \cos \omega_f z + B_1 \sin \omega_f z \quad \text{при} \quad F = b \sin \omega_f z.$$

Можно получить решение и операторным методом, очень популярным среди специалистов по автоматиче-

скому регулированию. Покажем, не решая уравнение до конца, почему этот метод мог бы оказаться полезным при изучении интересующей нас системы.

Если воспользоваться символом  $S$  для операции дифференцирования,  $S \equiv \frac{dC}{dz}$ ,  $S^2 \equiv \frac{d^2C}{dz^2}$ , то

$$\left( \frac{K_z}{a} S^2 - \frac{u_z}{a} S - 1 \right) C = \frac{1}{a} F,$$

или, обозначив  $L \equiv \frac{K_z}{a} S^2 - \frac{u_z}{a} S - 1$ , запишем:

$$C = \frac{1}{aL} F.$$

Первый множитель — передаточная функция системы, а второй — входная функция  $F$ . Передаточная

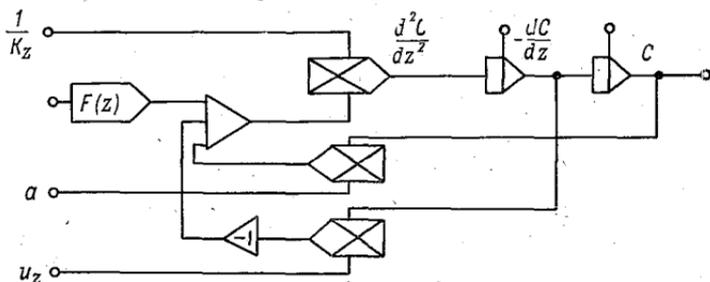


Рис. 48. Блок-схема решений уравнения (113) на аналоговой вычислительной машине.

функция состоит из множителя  $1/a$ , определяющего коэффициент усиления системы, и множителя  $1/L$ , определяющего пространственно-динамические свойства системы. Таким образом, операторный метод не только удобен, но и нагляден. Это уравнение легко решить на аналоговой машине (рис. 48).

Но и этот мост между системами весьма примитивен. Действительные связи между физическими, химическими и биологическими системами многообразны. При увеличении числа отображаемых в модели элементов системы и связей между ними порядок дифференциальных уравнений повышается, они могут стать нелинейными уравнениями, аналитическое решение которых получить обычно невозможно.

Некоторое представление о сложности реальной системы дает рис. 49. Здесь учитываются средние концентрации в продуктивном слое моря органического вещества, оседающего детрита, питательных солей (фосфаты и соединения азота) и биомассы двух основных видов фитопланктона и бактерий, а также влияние света, температуры и вертикального переноса питательных солей из глубоководной части, где их концентрация при-

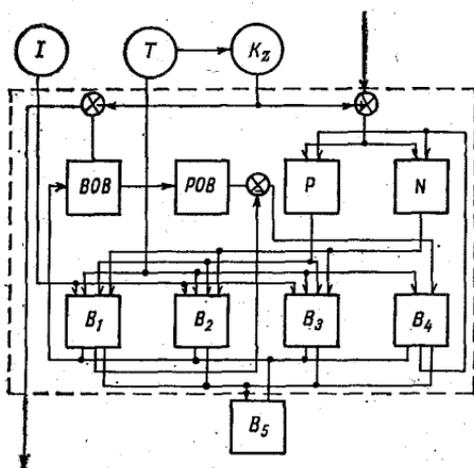


Рис. 49. Блок-схема связей в системе — фитопланктон — органические вещества — бактерии — биогенные элементы —.

$I$  — освещенность;  $T$  — температура;  $K_z$  — интенсивность перемешивания;  $B_1$ ,  $B_2$  — диатомовые водоросли;  $B_3$  — водоросли динофлагелляты;  $B_4$  — бактерии;  $B_5$  — зоопланктон, BOB — детрит; POB — растительное органическое вещество; P — фосфор; N — азот.

нимается постоянной. На цифровой вычислительной машине рассчитывались сезонные изменения в системе, и ЭВМ неплохо имитировала реальные события (рис. 50). Необходимо подчеркнуть, что действительные связи в системе еще многообразнее и сложнее. Но можно ли до бесконечности усложнять модель? Она станет необозримой и мало полезной. Можно перечислить «бесконечное» число параметров, которые и физикам, и химикам, и биологам важно учесть. А неизбежные случайные воздей-

ствия извне и в самой системе? Очевидно, что на помощь должны прийти статистические и вероятностные модели. Рассматривавшиеся в этой книге модели, основанные на дифференциальных уравнениях (их называют еще «жест-

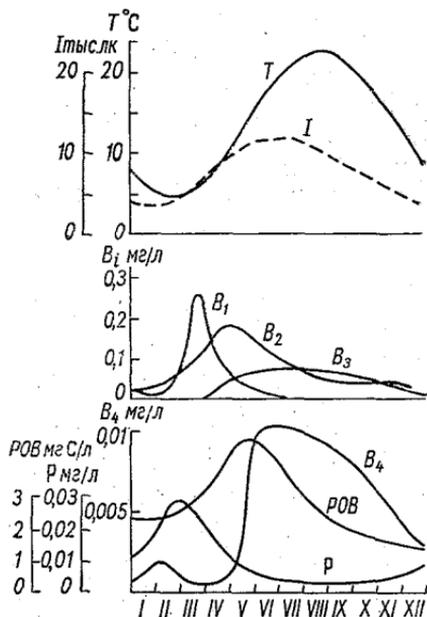
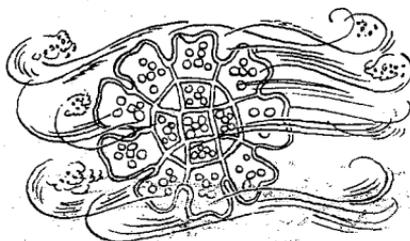


Рис. 50. Сезонные изменения в морской экологической системе (результаты моделирования на ЭВМ).

Усл. обозначения см. рис. 49.

кими» и «детерминистическими»), позволяют сделать немалое—привести в порядок имеющиеся сведения и проверить, как они согласуются между собой и не противоречат ли действительности. Но это только начало пути.



## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

### ПОРЯДОК ПРОТИВ ХАОСА. ГЕОГРАФИЯ ОКЕАНА

Развитие реальных динамических структур шло по пути постепенного вытеснения признаков хаоса и превращения самой структуры в некоторое подобие механизма.<sup>1</sup>

*Л. А. Николаев*

Целостность океанологии как науки в той же мере, в какой целостен океан или отдельный морской водоем, как естественноисторический и народнохозяйственный объект, должна быть основным положением современной океанологии.<sup>2</sup>

*Л. А. Зенкевич*

Два диаметрально противоположных и, на первый взгляд, несовместимых свойства присущи океану.

Одно из них — стремление выровнять любые неровности, любые градиенты, сообщенные ему силами, действующими извне. Вылейте в море стакан пресной воды — образуется пресное «облако». Но скоро оно рассеется, градиент концентрации станет бесконечно малым, исчезнет вообще. Нагрейте воду в одной точке — через некоторое время сгладится и температурный градиент. Но и то, и другое воздействия краткие. А если «наводить» неравномерность вечно? И в этом случае океан стремится ее уничтожить. Вспомните величайшие реки, тысячелетиями выносящие в моря пресную воду, взвеси, а теперь и ядовитые отходы химических производств. Все это океан стремится развеять по своему объему. Естественно, приходит мысль, что стремление выровнять, равномерно рассеять все и вся — основное проявление его «деятельности».

Но не только силы, усредняющие, устраняющие не-

---

<sup>1</sup> Николаев Л. А. Основы физической химии биологических процессов. М., «Высш. школа», 1971, с. 120.

<sup>2</sup> Зенкевич Л. А. Фауна и биологическая продуктивность моря. Т. 1. М., «Советская наука», 1951, с. 13.

равномерность, действуют в океане. Наряду с этим океан сам создает неравномерность, градиенты, упорядоченность. И не только создает, но и поддерживает их тысячелетиями, потому что эта упорядоченность — его собственная структура.

Стремление строить свой внутренний порядок, свою структуру и одновременно умение охранять ее от разрушающего воздействия внешних сил — два эти свойства наиболее характерны для живых существ. Так что же, и океан — гигантское живое существо? Такое сравнение, как мы увидели, может быть полезным.

Вся история изучения океана — это в сущности постепенный переход от идеи царящего в нем беспорядка и случайности к мысли о том, что он представляет собой совокупность определенным образом взаимосвязанных и, следовательно, упорядоченных физических, химических и биологических явлений, обладающих и относительно постоянной структурой, и вполне закономерным развитием. На одном из этапов, ведущих к такой идее, возникло представление об океане как открытой динамической системе.

При первом знакомстве с океаном человек обращает внимание на его подвижную поверхность, на внешние часто кажущиеся хаотичными проявления его деятельности. Однако того, кто ближе знакомится с океаном, поражает регулярность и упорядоченность многочисленных — физических, химических, биологических — процессов, протекающих в нем, его геологическая деятельность, климатическая роль, его хозяйственный потенциал. Такому человеку океан напоминает гигантскую химическую лабораторию или метаболическую клетку. В этом образном выражении выдающегося морского микробиолога Зо-Белла прежде всего привлекает внимание верное по существу сравнение океана со сложными организованными, благодаря деятельности человека или благодаря эволюции, системами. Понятие «система» многоаспектно. При множестве определений этого понятия принципиально важно одно: система — это организованная совокупность взаимодействующих элементов (под-систем).

Из множества свойств систем, описываемых в общей теории сложных систем, важно выделить всего лишь два положения, главных для существа вопроса.

1. Благодаря тому, что составляющие систему элементы (подсистемы) взаимодействуют и организованы, являя собой единую совокупность, система приобретает качественно новые свойства, не присущие ни одному из составляющих ее элементов, и, следовательно, система — иное, новое качество по сравнению с ее элементами (подсистемами). Система принципиально не сводима к составляющим ее подсистемам.

2. Отсюда следует, что нельзя изучить систему, исследуя лишь свойства и существо ее элементов, без знания их взаимодействия и организации их в систему. Так, одно лишь знание свойств водорода и кислорода не дает никакого знания или может дать ложное представление о свойствах и сути воды. Иными словами, изучение системы — это анализ и синтез системы.

Изучение океана до последнего времени шло по пути анализа этой сложной природной системы. Среди множества обособившихся наук, изучающих подсистемы океана (физической океанологии, геологии океана, химии океана, биологии океана), на их стыке стали возникать пограничные науки об океане, являющиеся по существу первыми попытками на пути к синтезу из двух подсистем (геохимия и биохимия океана) или из трех подсистем (биогеохимия океана). Эти тенденции отнюдь не являются данью моде. Они свидетельствуют о том, что пора исключительно анализа в изучении океана заканчивается и что частные науки об океане созрели для перехода к синтезу в системы. Одновременно же в соответствии с известной логикой эволюции науки и практической деятельности человека наиболее острые современные практические запросы, предъявляемые человечеством к науке об океане, — проблемы эксплуатации ресурсов океана и охраны его от загрязнения — требуют не дифференцированного, но комплексного, точнее сказать, системного подхода и обнаруживают явную недостаточность знаний об океане, которыми располагают и могут располагать частные науки о нем.

Очевидно, что механически сведенные вместе знания, накопленные частными науками об океане, не могут дать представления о его функционировании как единой сложной системы. Необходимая, адекватная природной, система наук об океане, как и всякая система, не может быть сведена к составляющим ее подсистемам — част-

ным наукам об океане — она должна быть качественно новым построением из составляющих ее элементов. В последнее десятилетие отмечается постепенное переключение генерального направления научных исследований от проникновения в микромир, в глубину и интимные свойства материи, с чем связаны наиболее выдающиеся успехи недавнего прошлого (овладение атомной и ядерной энергией в физике и технике; генетика в биологии; механизмы реакций в химии; проникновение в подсознание в «человековедении»), к изучению сложных ансамблей — систем (теория автоматов и кибернетика в физике и механике; экология в биологии; динамика и макрокинетика в химии; изучение организации, функционирования и управления коллективами в социологии). Кардинальными вопросами при изучении сложных систем оказываются следующие: организация и функционирование; динамика и стационарные состояния; механизмы саморегулирования и управления; устойчивость и эволюция; пространственная и видовая структура. Неслучайно во всех океанологических дисциплинах в последнее время на первый план выходят вопросы динамики подсистем, с которыми связаны эти дисциплины. Именно от этого генерального направления наук вообще ожидают наиболее выдающихся успехов науки и практики. Следовательно, все шире будут разрабатываться методология изучения сложных систем, основывающаяся в настоящее время на представлениях кибернетики и теории сложных систем, и средства их экспериментального и теоретического изучения, современными примерами которых служат теория эксперимента, моделирование и вычислительная техника.

Может возникнуть вопрос: почему же задача синтеза наук об океане не поставлена в прошлом? Потому, очевидно, что «человечество ставит себе всегда только такие задачи, которые оно может разрешить, так как при ближайшем рассмотрении всегда оказывается, что сама задача возникает лишь тогда, когда материальные условия ее решения уже имеются налицо, или, по крайней мере, находятся в процессе становления»<sup>1</sup>.

---

<sup>1</sup> Маркс К. К критике политической экономии. 1858—1859 гг. — В кн.: Маркс К., Энгельс Ф. Соч., т. 13, М., Изд. полит. лит.-ры, 1959, с. 7.

Таким образом, существуют объективные предпосылки развития комплексной науки об океане. Ни одна из частных океанологических наук, связанных с изучением конкретной — механической, физической, химической или биологической — формы движения материи, не может претендовать на роль этой комплексной науки. Такой наукой может быть только понимаемая в широком смысле океанология, или география океана, как количественное описание динамической геоподсистемы — океана.

Предмет изучения географии океана — океан как единая сложная открытая динамическая система и одновременно существенный элемент географической оболочки в целом. Главные вопросы географии океана — вопросы структуры океана и его функционирования как сложной системы и одновременно как относительно простого элемента более сложной системы — биосферы.

Вот эти вопросы:

- 1) пространственная упорядоченность океана как динамической системы;
- 2) циркуляция вещества и энергии по звеньям системы;
- 3) эволюция океана и его устойчивость, в том числе к возмущениям в виде загрязнения океана и в виде изъятия его ресурсов;
- 4) механизмы саморегулирования океана и управления процессами в нем, в том числе климатообразующими, самоочищением, биологическим продуцированием;
- 5) наконец, на этой основе организация, экономика и долгосрочное планирование оптимальной эксплуатации океана как единой системы и звена биосферы.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие . . . . .	5
Введение.	
Можно ли рассматривать океан как систему? . . . . .	6
Глава 1.	
Физические системы океана . . . . .	20
Чем океан приводится в движение? . . . . .	—
Планетарный вихрь и движение вод . . . . .	23
Невидимые каналы . . . . .	29
Системы океанической циркуляции . . . . .	32
Математические модели течений . . . . .	38
Две теоремы о течениях и их применение к Гольф-стриму . . . . .	50
Как работает механизм циркуляции . . . . .	58
Температурная инерция океана и ледниковые эпохи . . . . .	72
Глава 2.	
Химия и жизнь океана . . . . .	87
Как поддерживается порядок в химической лаборатории океана? . . . . .	—
Вода ли морская вода? Сложные системы . . . . .	92
Почему все течет и изменяется, но выглядит неизменным. Карбонатная система . . . . .	110
Открытая система. Хемостат . . . . .	121
Система автоматического регулирования pH . . . . .	130
Химическая лаборатория океана — как живая клетка . . . . .	135
Глава 3.	
Океанический биостат . . . . .	139
Элементарная управляемая система. Элементарный язык . . . . .	140
Разнообразие и его преимущества. «Ведьмин суп» . . . . .	160
«Легкая жизнь» на границе фаз . . . . .	166
Что можно увидеть, заглянув под воду на побережье Баренцева моря . . . . .	170
Чего никак не увидишь, заглянув под воду. Трофический каскад . . . . .	173
Живые гиганты моря . . . . .	181
Человек и биостат . . . . .	186
Глава 4.	
Мосты между системами. Плодородие. Океан как почва . . . . .	191
Заключение.	
Порядок против хаоса. География океана . . . . .	200

Владимир  
Львович  
ЛЕБЕДЕВ

Тамерлан  
Афиятович  
АЙЗАТУЛЛИН

Кирилл  
Михайлович  
ХАЙЛОВ

**О К Е А Н**  
КАК  
ДИНАМИЧЕСКАЯ  
СИСТЕМА

Редактор **О. Д. Рейнгерц**  
Художник **Б. Н. Осенчаков**  
Техн. редактор **В. И. Семенова**  
Корректор **Т. Н. Римант**

Сдано в набор 10/VII 1974 г. Подписано в печать 12/XII 1974 г. М-08681. Формат 84 × 108/32. Бумага тип. № 1. Печ. л. усл. 10,92. Уч.-изд. л. 10,42. Тираж 13 000 экз. Индекс ОЛ-2. Заказ 587. Цена 35 коп. Гидрометеоиздат. 199053, Ленинград, 2-я линия, 23.

Типография им. Котлякова издательства «Финансы» Государственного комитета Совета Министров СССР по делам издательств, полиграфии и книжной торговли 191023, Ленинград, Д-23, Садовая, 21.