

УДК 541; 574; 550; 551; 556; 523; 524; 533.9

© 1991 г.

РОЛЬ ХИМИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ В ЭВОЛЮЦИИ ПРИРОДНЫХ СИСТЕМ (ХИМИЯ И ЭКОЛОГИЯ)

Тимашев С. Ф.

Представлены некоторые тенденции развития химической и смежных наук в решении проблем экологии. Помимо обсуждения традиционных для химии проблем, связанных с разработкой ресурсосберегающих и малоотходных технологий, сенсорных систем для мониторинга природной среды, анализируются физико-химические аспекты динамики разнообразных природных систем с выявлением роли химического фактора в их эволюции. На основе нелинейных моделей неравновесной термодинамики введены представления о параметрах предельно допустимых выбросов и предельно допустимых концентраций, характеризующих соответственно защитные свойства среды обитания и отдельных организмов. Обсуждаются уравнения динамики, описывающие состояния экосистем при наличии стохастических внешних факторов химической природы. Анализируются вопросы влияния на эволюцию природных сообществ процессов массопереноса во внутренних областях Земли и в различных слоях атмосферы. Развиваются представления о термодинамической открытости системы Земля – атмосфера и на этой основе обсуждается возможная роль антропогенных факторов в инициировании природных катастроф.

Библиография -- 163 ссылки.

ОГЛАВЛЕНИЕ

I. Введение	2292
II. Природоохранные химические технологии	2294
III. Химические мембранные сенсоры	2298
IV. Физико-химические принципы моделирования состояния экосистем	2302
V. Влияние процессов массопереноса в системе Земля – атмосфера на состояние биосфера	2312
VI. Заключение	2324

I. ВВЕДЕНИЕ

Биосфера Земли, охватывающая нижнюю часть атмосферы, гидросферу и верхнюю часть литосферы с богатейшим разнообразием экологических ниш и экосистем, формировалась в условиях сильных воздействий на Землю как со стороны космического пространства (электромагнитные излучения в широком диапазоне частот, солнечный и звездный ветер, гравитационные воздействия Солнца, Луны и планет, столкновения с макроскопическими объектами – частями астероидов, кометами), так и со стороны внутренних областей Земли (земной магнетизм, перемещения литосферных плит и земной коры, выбросы при крупных извержениях вулканов). Возникающее в таких условиях единство (физико-, био-, гео- и космохимическое) экосистем со средой их обитания [1–5] обусловливало модуляционную и модификационную изменчивость [6] организмов при вариациях интенсивности и вида сторонних факторов. Эволюция земных сообществ являла примеры устойчивости живого вещества при изменчивости его форм даже в условиях глобальных катастроф. Начиная с 30-х годов нашего столетия, и особенно в последние десятилетия, биосфера

подвергается антропогенным факторам с их аномально высокими (в сравнении с ранее имеющимися) локальными интенсивностями, а иногда и с новой сущностью. Согласно [7], по количеству выбрасываемого в настоящее время диоксида серы (~150 млн т/г) и углеводородов (~70 млн т/г) промышленность уже сравнялась с природными источниками, а по выбросам оксида углерода (~300 млн т/г) превосходит их. Показатели по другим видам и по количеству выбрасываемых в природную среду антропогенных загрязнений также неутешительны [8]. При этом наибольшая опасность антропогенных загрязнений и воздействий (в отличие от природных) состоит в их локально высоких концентрациях, вредных для живого вещества, или в локально повышенных уровнях (например, радиоактивных, электромагнитных излучений). Действительно, несмотря на значительную интегральную дозу радиации в расчете на биосферу, созданную космическими лучами, естественным распадом радиоактивных элементов в земной коре, общий фон поражающих излучений невелик и неопасен для экосистем. Вулканические выбросы при общем большом количестве выбрасываемых вредных компонентов (например, SO_2) рассеиваются обычно на значительных площадях, поскольку высота, на которой оказываются компоненты, весьма значительна. Так, из взаимосвязи между появлением серебристых облаков на высоте ~80 км и предшествующим этому мощным извержением Везувия был сделан вывод о выбросах в мезопаузу больших количеств водяного пара при извержении [11]. В серебристых облаках обнаружены также и сернистые соединения [12].

При антропогенных выбросах вредных компонентов такого масштабного рассеяния компонентов в атмосфере, гидросфере и почве не происходит, и локальные концентрации (или поражающие излучения) могут на много порядков превосходить естественный фон. Еще большая опасность связана с выбросом в биосферу чужеродных живым организмам веществ — ксенобиотиков, в том числе, ранее в природе не существовавших. Таковыми являются диоксины, образующиеся в хлорорганических производствах [13]. Уже к настоящему времени они представляют глобальную опасность для человечества и цивилизации из-за возможности долговременно-го заражения ими всей биосферы.

В этих условиях приоритетное значение приобретают экология и другие науки, которые могут занять свое место в решении комплексных проблем экологической направленности. Химическим наукам при этом отводится важная роль [14]. В данной статье сделана попытка представить основные связи, по которым может реализоваться и уже реализуется такое взаимодействие химии и экологии. Однако до перехода к обсуждению существа проблемы необходимо сделать некоторые общие пояснения.

В последнее десятилетие в связи с возникновением острых экологических проблем понятие «экология» стали трактовать расширительно, представляя ее как междисциплинарную синтетическую науку, и относить к ней охрану от загрязнения окружающей среды, разработку малоотходных ресурсосберегающих технологий, строительство очистных сооружений, планирование землепользования. Конечно, экология использует данные самых разнообразных дисциплин, но это относится к методической, а не к идейной стороне науки [15, 16].

Экология — часть биологической науки, исследующая структуру и функционирование систем надорганизменного уровня (экосистем или биогеоценозов) в их взаимосвязи друг с другом и со средой обитания [1–5, 15–17]. Это означает, что любая экологическая разработка должна включать анализ состояния или динамики биологических сообществ в среде их обитания. При этом отдельные особи традиционно изучаются в рамках генетики, физиологии, анатомии; уровень отдельных клеток изучает клеточная биология; механизмы взаимодействия молекулярных компонен-

тоз среды и различных излучений с субмикроскопическими элементами живых систем (биологические мембранны и их фрагменты, разнообразные ферменты, части наследственного аппарата и т. п.) — биохимия и молекулярная биология; состояние среды обитания, включая воздействие на среду (жидкую, газовую) излучений и частиц разной природы — различные разделы химии (аналитическая, неорганическая, органическая, высокомолекулярных соединений, коллоидная, физическая, радиационная), физики (химическая, конденсированной среды, ядерная, молекулярная, биологическая), математики [18]. Таким образом, эффективное решение проблем экологии подразумевает профессиональное знание и выполнение каждым из специалистов смежных областей своего согласованного «макронауки».

В частности, при построении и анализе моделей эволюции экосистем — экологическом моделировании [19] — наряду с постановкой проблемы и выявлением основных факторов для учета их в модели (экологическая задача) возникает комплекс физико-химических, физических, биохимических вопросов, связанных с установлением существа (генезиса) входящих в уравнения параметров и их зависимостей от состояния среды, которое может изменяться, а также математических, связанных с необходимостью анализа соответствующей системы уравнений (в общем случае нелинейных), нахождением стационарных состояний экосистемы и условий бифуркационных переходов [20] и т. д.

Задача данной статьи — представить в общей форме (при конкретизации на наиболее близких автору примерах) возможные связи химии и экологии с целью выявления наиболее актуальных направлений химической науки, способствующих решению экологических задач. Очевидно, что при такой постановке вопроса роль химической науки в первую очередь должна состоять в разработке природоохранных и ресурсосберегающих технологий с аналитическим контролем состава всех выбросов производства и качества конечных продуктов и изделий. Экологические проблемы при этом состоят в изучении воздействий указанных выбросов на экосистемы с выявлением возможных экологических модуляций и модификаций [6] для предотвращения возможных процессов деградации экосистем. Конечно, необходимо адекватно оценивать защитные возможности самих экосистем, буферные свойства среды их обитания, экологический ресурс биосфера в целом, ее «терпимость к оскорблению» [21, 22]. Это тем более важно, если исходить из объективно существующих тенденций расширения промышленных производств, дальнейших разработок полезных ископаемых, активных воздействий на биосферу.

Обычно экологический ресурс оценивается эмпирически и характеризуется экспериментально определяемыми (для данного региона, для определенного сезона и т. д.) величинами предельно допустимых выбросов (ПДВ) и предельно допустимых концентраций (ПДК). Однако выявление генезиса этих параметров, выяснение реакций на различные антропогенные воздействия самих живых систем, а также очистительных возможностей неорганической природы позволяет более обоснованно и всесторонне предусматривать последствия вредных влияний антропогенных факторов на экосистемы и предотвращать эти влияния. Как показано ниже, химическая наука может успешно анализировать и частично решать такие проблемы.

II. ПРИРОДООХРАННЫЕ ХИМИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ

Масштабы и характер производственной деятельности человека должны соотноситься с возможностями современной науки и технологий и не допускать нарушения состояния среды обитания экосистем планеты. Это означает, что технологические выбросы (газовые, жидкые) производств.

должны быть достаточно разбавлены по агрессивным и вредным для живых систем компонентам, чтобы при всем разнообразии постоянно выбираемых в природную среду веществ антропогенного и неантропогенного происхождения «буферность» среды обитания сохранялась, т. е. скорости деструкции или выведения из циклов кругооборота (при необратимом «складировании») обеспечивали переработку вредных веществ в неопасные, участвующие в природных кругооборотах. При этом в природной среде должны устанавливаться некоторые стационарные концентрации агрессивных компонентов, не превышающие ПДК (см. гл. IV).

Выявление механизмов связывания, обезвреживания и трансформации (химической, радио-, фотохимической, микробиологической) вредных веществ в природной среде, а также очистки от них (фильтрация, микро- и ультрафильтрация, обратный осмос [23, 24]) или от продуктов их разложения представляет важную природоохранную проблему, поскольку именно на этой основе должны вырабатываться требования к ПДВ и антропогенным загрязнениям среды (ПДК) в каждом конкретном регионе.

Особенно опасны высокие локальные загрязнения природной среды тяжелыми металлами, в первую очередь Pb, Cd, Hg, As [25], когда они могут накапливаться в живых организмах. Металлы и металлоиды поступают в атмосферу с аэрозольными и паровыми выбросами промышленных производств, в результате поднятия пыли с почвенного покрова, вследствие приноса пыли из космоса, при извержении вулканов и т. д. [26]. Вместе с дождем металлы попадают в почву и в открытые водоемы, где подавляющая часть ионов тяжелых металлов адсорбируется на микроскопических взвесях минерального происхождения, входящих в состав средне- и мелкоилистых частиц размером 0,05–0,005 мкм (до 70–80% от общего содержания в воде) [27].

Технологические процессы очистки производственных стоков и воды открытых водоемов от тяжелых металлов разнообразны. Эффективными оказываются мембранные (в том числе мембранны-сорбционные [23, 24] и мембранны-экстракционные [28]) и радиационно-сорбционные методы обезвреживания загрязненных вод. Последние часто используются в комбинации с традиционной химической обработкой активными агентами (Cl_2 , NH_3 , O_3), физическими воздействиями (нагрев, УВЧ-облучение). При этом возможна реализация синергизма в действии указанных факторов [29]. Радиационное облучение приводит к изменению химического (микробиологического) состава системы, а именно к разрушению или такому превращению находящихся в воде загрязнений, которые делают возможным их последующее удаление из очищаемой среды.

Решение проблемы обезвреживания водных стоков от тяжелых металлов может основываться также на использовании особенностей их комплексообразования с разнообразными лигандами среды. В процессе такого комплексообразования важную роль часто играет формирование так называемых вторичных связей [30], промежуточных по силе между ковалентными и ван-дер-ваальсовыми. Именно образованием вторичных связей тяжелых металлоорганических катионов с функциональными группами биополимеров обусловливаются процессы отравления живых организмов тяжелыми (например, $Hg(II)$) металлами. В то же время вторичные связи $Au(I)$ с органическими лигандами формируются в ряде лекарственных веществ, обладающих высоким врачебным эффектом.

Другие примеры использования современных достижений химической науки для обезвреживания природных и технологических вод содержатся в статьях данного сборника (см. также [31, 32]). Конечно, число нерешенных проблем пока еще очень велико. Серьезными источниками загрязнения природной среды являются целлюлозно-бумажные производства, пред-

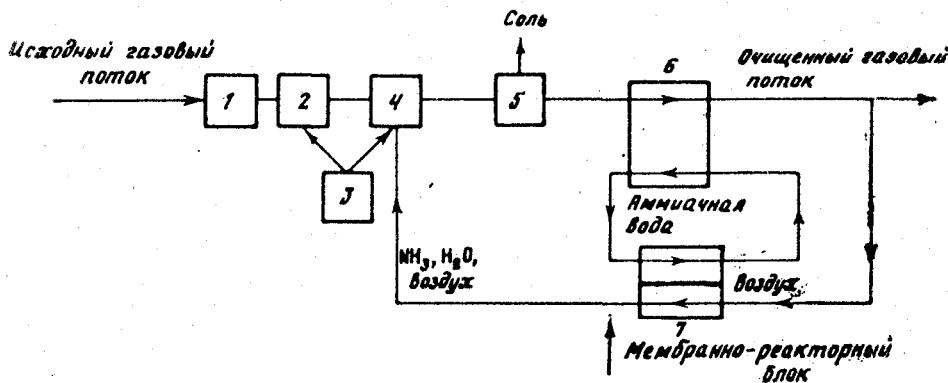


Рис. 1. Схема процесса нейтрализации аммиаком агрессивных компонентов газовых выбросов с мембранным блоком возвращения аммиака в цикл [36]. Основные компоненты блок-схемы: 1 – фильтр предварительной очистки газовой смеси; 2 – блок каталитической очистки (при наличии в газе NO_x , CO , H_2S); 3 – источник аммиака; 4 – турбулентный реактор для нейтрализации агрессивных компонентов влажным аммиаком, подаваемым со стехиометрическим избытком; 5 – система улавливания образующегося аэрозоля с выведением солевого продукта; 6 – система водной отмывки отходящего газового потока от избыточного аммиака, включающая водный абсорбер с подачей на него слабоконцентрированной аммиачной воды (2–4%) (на выходе концентрация аммиака – 4–5%); 7 – мембранный блок (аммиачная вода с концентрацией 4–5% подается в межволоконное пространство)

приятия цветной металлургии, теплоэнергетика, производство каустической соды и хлора. Хорошо известную экологическую опасность представляют выбросы в атмосферу фреонов, способствующих разрушению озона-вого слоя Земли, который защищает биосферу от поражающих воздействий УФ-излучений [33, 34].

Важно отметить, что успехи, достигнутые в области химических технологий, позволяют сделать многие из промышленных производств мало-отходными, энерго- и материалосберегающими. В частности, вредные компоненты, выбрасываемые в атмосферу (при условии их высокого концентрирования в процессе очистки), могут стать источниками ценного сырья для других производств. В настоящее время во многих производствах в атмосферу выбрасываются большие потоки отходящих газов, содержащих примеси вредных компонентов SO_2 , NO_x , HF , H_2S , CO [35]. В частности, на отдельных медно-цинковых предприятиях количество выбрасываемого в атмосферу диоксида серы превышает 100 тыс. т/г. Тем не менее в процессах нейтрализации газовых выбросов, содержащих SO_2 , H_2S , HF в малых количествах (<1%), серо- и фторсодержащие отходы практически не утилизируются.

Ниже приведена одна из возможных схем (рис. 1) обезвреживания локальных, относительно небольших по объему газовых выбросов, содержащих вредные компоненты (SO_2 , HF , HCl , NO_x , CO , H_2S), при их нейтрализации аммиаком с утилизацией полезных компонентов и мембранным блоком возвращения избыточного аммиака в цикл. При наличии в исходном газовом потоке наименее реакционноспособных компонентов – NO_x , CO , H_2S – следует внести в схему каталитический реактор [35] для нейтрализации этих компонентов аммиаком.

Эта схема предусматривает поглощение избыточного аммиака (обычно количество избыточного аммиака может составлять ~10–20% от подаваемого для нейтрализации) слабоконцентрированной аммиачной водой с последующим извлечением поглощенного аммиака и возвращением его (с регулируемым количеством паров воды) в реактор нейтрализации. Извлечение аммиака из аммиачной воды осуществляется при подаче неболь-

шой части αI ($\alpha \ll 1$) очищенного газового потока I внутрь полых волокон [36–38], при этом соотношение концентраций аммиака и воды на выходе мембранных блоков регулируется газодинамическим режимом течения газа внутри волокна [36, 37]. При величинах газовых потоков $\sim 10^2$ – 10^3 м³/ч с содержанием кислых компонентов ~ 1 об. % мембранные элементы должны возвращать аммиак в количестве $\leq 1,0$ м³ NH₃/ч, что представляет собой вполне приемлемую задачу, исходя из функциональных характеристик разработанных для этой цели поливолоконных мембран на основе перфторированного сульфокатионитового материала типа «Нафцион» [38].

Выделяемые из реактора смещения солевые соединения, улавливаемые в виде аэрозолей, могут представлять интерес как сырье. В частности, при нейтрализации диоксида серы аммиаком в присутствии паров воды образуются соли сернистой и серной кислоты, которые могут использоваться либо при получении минеральных удобрений, либо для выделения аммиака (при термическом разложении соли, электролизе растворов) с возвращением аммиака в цикл. Это придает данной технологии малоотходный характер. Конечно, при реализации такой технологии возникают проблемы, связанные с разработкой оптимальной конструкции реактора смещения с системой улавливания аэрозоля и отвода твердого или высококонцентрированного жидкого продукта.

Фактически каждый промышленный жидкий сток или газовый выброс может и должен стать источником получения ценных компонентов (или возвращения их в цикл): дефицитных тяжелых металлов (Cu, Cr), органических компонентов, кислот, щелочей. Успехи химической науки дают основания надеяться на реализацию новых высокоеффективных природоохранных и ресурсосберегающих технологий [39, 40].

При обсуждении вопросов, связанных с выбросами в среду обитания вредных компонентов, важно понимать, рассеиваются эти компоненты в пространстве равномерно (как молекулярные или ионные примеси) или концентрируются на каких-либо носителях (например аэрозолях, разнообразных субмикроскопических коллоидных частицах и т. д.). Хорошо известно, что просто знание химического состава среды не позволяет понять многие из явлений неорганической природы. Объединение даже малой доли некоторых компонентов среды (молекул воды, других неорганических молекул или атомов, органических молекул) в коллоидные образования принципиальным образом влияет на разнообразные физико-химические процессы в среде. Аэрозоли, количество которых (по массе) в атмосфере невелико (микрограммовые количества в кубическом метре воздуха) и находится на уровне содержания редких газов (кисон, криптон), определяют не только многие свойства и явления (в том числе образование зорь, радуг, ложных солнц, климат различных районов Земли), но и те формы и ритмы жизни на нашей планете, свидетелями которых мы являемся [41].

Более того, аэрозоли, равно как и коллоидные примеси в водных средах, могут сорбировать вредные компоненты среды, обусловливая тем самым их аномально высокое концентрирование: средние по объему аэрозоля значения концентраций этих компонентов могут на много порядков превосходить соответствующие средние значения в среде. Процессы такого концентрирования играют двойную роль. С одной стороны, происходит очистка среды от вредных (в том числе канцерогенных, радиоактивных и т. д.) компонентов со «складированием» их в относительно малом количестве макрочастиц. С другой стороны, эти «депо» представляют серьезную опасность для отдельных особей, так что разработка методов индивидуальной защиты организмов от поражающего действия активных аэрозолей [42] и других коллоидных частиц приобретает важное природоохранное значение.

Чрезвычайно актуальна разработка способов контролируемого химического, физического и физико-химического воздействия на среду с целью инициирования таких процессов складирования отдельных компонентов среды в коллоидно-химические депо. Можно, например, распылять в атмосферу специальные аэрозоли, вводить в водную среду специфические комплексообразователи, а затем концентрировать образующиеся комплексы методом ультрафильтрации [43]. Эффективны разнообразные способы флокуляции [44], коагуляции и т. д.

Одним из методов целенаправленного воздействия на водные системы может быть так называемая «магнитная обработка». Хотя такого типа пред подготовка воды для использования в паровых котлах с целью уменьшения накипи при их функционировании известна давно [45], отношение к разнообразным способам магнитной обработки водных систем (организация водного потока в постоянном магнитном поле с индукцией $\sim 1-10^3$ Гц [46, 47], действие переменного электромагнитного поля в диапазоне частот $1-10^3$ Гц [24]) весьма настороженное из-за дискуссионного характера теоретических интерпретаций эффектов таких обработок. Тем не менее некоторые представления о результатах воздействия магнитных полей на реальные водные системы уже сформировались. Согласно [46], при действии магнитного поля на движущийся, пересыщенный жесткими солями раствор в процессе кристаллизации формируются частицы с кристаллографической структурой, отличающейся (более рыхлой) от той, которая образуется в отсутствие магнитного поля, так что изменяется соотношение между скоростями кристаллизации в объеме раствора и на внутренней поверхности теплового аппарата (последнее нежелательно).

Дальнейший прогресс в выявлении механизмов действия магнитных полей на водные системы связан с постановкой экспериментов при необходимости аналитическом обеспечении, в том числе контроле водной среды по ионогенным примесям (стартуя от воды с удельным сопротивлением 18 Мом·см) и по числу коллоидных частиц (например, при использовании микрофильтрационных мембран с размером пор $\sim 0,1-0,2$ мкм) [48]. При этом несомненную эвристическую ценность могут представлять различные гипотетические модели механизмов таких воздействий [49].

III. ХИМИЧЕСКИЕ МЕМБРАННЫЕ СЕНСОРЫ

Реализация природоохранных ресурсосберегающих технологий возможна лишь при наличии на всех стадиях и циклах производств специальных систем промышленного мониторинга с контролем качества продуктов и отходов, а также непрерывного мониторинга окружающей среды с анализом специфических промышленных газовых и жидкых выбросов (на хлорсодержащие углеводороды, органические растворители, пестициды, тяжелые металлы и т. д.). Обычно используются разнообразные системы фиксации химических сигналов: традиционные аналитические (по специфическим химическим реакциям, в частности, цветным) и современные сенсорные, позволяющие осуществлять экспрессный и непрерывный контроль за химическим составом среды вплоть до определения предельно низких концентраций компонентов [50-52]. Чувствительными элементами регистрирующей системы сенсоров обычно являются напыленные слои оксидов металлов (ZnO , TiO_2 , NiO и др.), сопротивление которых изменяется при хемосорбции донорных или акцепторных компонентов [53]; полевые транзисторы, чувствительные к хемосорбционным процессам на затворе [50]; керамические слои, формируемые из смесей оксидов (Cr_2O_3 — Al_2O_3 — V_2O_3 — Ti_2O_3 , α - Fe_2O_3 — SnO_2 и др.) [54], изменяющие электропроводность при сорбции некоторых компонентов; световоды, сорбция специ-

физических компонентов на поверхности которых изменяет условия полного внутреннего отражения и тем самым влияет на распространение светового сигнала [55, 56]; тонкие металлические слои (Al, Cu), в которых могут возбуждаться поверхностные плазмоны в ИК-диапазоне, чувствительные к адсорбции специфических компонентов [57].

Характерные концентрации компонентов, фиксируемые при указанных способах регистрации, зависят от типа молекул, метода регистрации, состава среды и лежат в диапазоне 10^{-8} – 10^{-4} моль/л. В отдельных случаях достигается более высокая чувствительность: в [57] с помощью ИК-биосенсора зафиксированы концентрации антигена $\sim 2,5 \cdot 10^{-9}$ моль/л; в [58] при использовании оптобиосенсоров с возбуждением поверхностных плазмонов обнаружены в растворе белки в концентрации $\sim 10^{-11}$ – 10^{-12} моль/л; при использовании в регистрирующей системе чувствительных биоэлементов (голубого краба), в которых в процессе «узнавания» генерируются электрические импульсы, зафиксирована концентрация аминокислот $\sim 10^{-13}$ моль/л [59]. Для сравнения укажем, что насекомые могут различать молекулы полового аттрактанта при их содержании относительно других молекул воздуха $1 : 10^{17}$ [60].

Использование твердотельных систем для химических датчиков позволяет значительно уменьшить размеры последних путем размещения на одном кристалле или транзисторе нескольких чувствительных элементов вместе с электронными схемами предварительной обработки сигналов, хранения и преобразования информации. Широко используются высокочувствительные электрохимические сенсоры [61, 62], в которых реализуются электрохимические превращения адсорбируемых на электродах компонентов.

Прогресс в создании химических и электрохимических сенсоров в настоящее время весьма ощутим [50–52]. Разработаны и широко используются сенсоры для определения концентраций ионов (H^+ , K^+ , Na^+ , Ca^{2+} , Ag^+ , NH_4^+ , Fe^{2+} , Cu^{2+} , Ni^+ , Cd^+ , Pb^+ , F^- , Cl^- , Br^- , NO_3^-), молекул газов (H_2 , O_2 , NH_3 , CO_2), биологически активных веществ (глюкоза, мочевина, четвертичные аммониевые соединения, сахароза, лактоза, лизин, этанол, пенициллин, пируват, лактат, фосфорорганические соединения, карболаты, психотропные вещества) [63–66]. Так, полупроводниковые сенсоры на основе оксидов металлов (ZnO , TiO_2 , NiO) позволяют измерять микрокаличества кислорода в газах (10^{-5} – 10^{-1} об. %), определять концентрации органических и неорганических газов и паров (спирт, ацетон, аммиак, оксиды азота, оксид углерода), детектировать свободные атомы и радикалы (H , O , N , Cl , OH , CH_3 , C_2H_5 , NH , NH_2) с чувствительностью до 10^6 – 10^8 активных частиц в 1 см^3 [53]. Тем не менее требования (снижение уровня определяемых концентраций компонентов жидких и газовых сред, большая избирательность, быстродействие, стабильность характеристик), предъявляемые к таким системам, непрерывно повышаются, что связано с созданием новых производств, где могут синтезироваться опасные для экосистем компоненты, а также с некоторым прогрессом в установлении вредного влияния компонентов, которые ранее таковыми не представлялись. При этом возникают новые, пока еще практически неизученные вопросы, связанные с возможным обнаружением синергических эффектов при одновременном воздействии на экосистемы либо смеси вредных компонентов, либо отдельных компонентов на фоне полей разной природы (электромагнитных в различном диапазоне частот, низкочастотных звуковых).

Изучение такого типа эффектов, вероятно, приведет к пересмотру установленных значений ПДК (для различных регионов Земли, для различных времен года). Это означает, что работа по совершенствованию химических сенсоров должна продолжаться, и химическая наука должна способствовать прогрессу в данной области. Наряду с вопросом о химическом

составе среды (в первую очередь определением содержания вредных компонентов) необходимо ставить вопрос об адекватном описании состояния среды, о более полном наборе ее характеристик, влияющих на эволюцию отдельной особи и экосистемы в целом. Поэтому помимо чисто химических сенсоров, позволяющих определять химический состав среды, и сенсорных датчиков температуры и давления, следует использовать другие способы контроля состояния среды (например, счетчики аэрозольных частиц, радиоактивных излучений, чувствительные приемники электромагнитных излучений).

В данном разделе мы обсудим лишь вопросы, связанные с увеличением избирательности действия химических сенсоров. Проблемы повышения селективности детектирования отдельных компонентов смесей твердотельными сенсорами весьма актуальны, поскольку избирательность многих из существующих систем невелика. Так, изменение сопротивления полупроводниковых оксидных пленок зависит лишь от донорных или акцепторных свойств хемосорбируемых компонентов. Поэтому из совокупного эффекта изменения сопротивления при сорбции нескольких компонентов трудно сделать однозначные заключения о вкладе отдельных слагаемых. Причины изменения заряда на затворе полевого транзистора при хемосорбции одновременно нескольких компонентов также сложно анализировать. Селективность подобных сенсорных устройств может быть существенно повышена при использовании в качестве одного из элементов специальных прослоек, перегородок или покрытий, отделяющих анализируемую среду от регистрирующей системы. Такие композиционные устройства обычно называют мембранными сенсорами. Если перегородка (в частности, она может быть пористой) содержит биологически активные соединения, ферменты, фрагменты отдельных клеток, иммобилизованные антигены для детектирования соответствующих антител, фрагменты мембран с хромофорными группами и т. д. говорят о мембранных биосенсорах [55, 56, 67].

Покрытия, модифицирующие поверхность регистрирующей системы, повышают эффективность анализа в случаях, когда перенос компонентов через мембранный слой является лимитирующей стадией общего необратимого процесса фиксации этих компонентов, а именно при возникновении стационарных токов, связанных с электрохимическими процессами превращения компонентов анализируемой смеси (O_2 , H_2 , спирты и др.) [68]; при переходных режимах в процессе установления равновесного состояния при сорбции компонентов чувствительными элементами устройства; при химических и биохимических превращениях, катализируемых ферментами [66]; при генерации фототоков, величина которых может зависеть от сорбции компонентов среды [69]; при необратимом «складировании» или химическом связывании пропивающих компонентов в системах накопления информации и т. д. При формировании мембранных покрытий на поверхности сенсорных элементов могут быть использованы материалы (органические и неорганические), обычно применяемые в мембранных технологиях. Основная сложность при этом заключается в панесении мембранных покрытий оптимальной толщины: достаточно тонких, чтобы время отклика не превышало некоторую требуемую величину, и все же достаточно толстых, чтобы перенос через покрытие (или переходные процессы в нем — при нестационарных методах анализа) оставался лимитирующей стадией общего необратимого процесса фиксации компонента с его химическим или электрохимическим превращением. По-видимому, одно из оптимальных решений — создание достаточно плотных субмикроскопических барьерных мембранных слоев с $d \sim 0,01$ мкм [70].

В этом случае можно достичь аномально высоких значений избирательности по целевым компонентам при общем относительно малом времени задержки τ ($\tau \sim d^2/D \sim 1$ с при характерных для стеклообразных полимер-

ных материалов значениях коэффициентов диффузии D) в процессе фиксации химического сигнала. Возможность достижения высоких параметров селективного детектирования покажем на модельном примере [71]. Будем считать, что барьерный слой формируется на основе пленки толщиной d из материала с константой проницаемости $\Pi_{0i} = \gamma_{0i} D_{0i}$, в которой случайным образом (хаотически) распределены силовые отталкивающие (для проникающих компонентов i) центры. Представим потенциал отталкивания частицы i , находящейся на расстоянии r от центра, в виде

$$U_i(r) = U_{0i}(b_i/r)^{m_i},$$

где b_i — характерное расстояние, m_i — численный параметр. Пусть n — концентрация таких центров, тогда при $d \ll d_{0i}$, где

$$d_{0i} = [(U_{0i}/k_B T)^{1/m_i} b_i n^{1/m_i}]^{m_i/2} n^{-1/m_i}$$

для константы проницаемости имеем [71]:

$$\Pi_i \approx \Pi_{0i} \exp \left[-\pi \Gamma \left(1 - \frac{2}{m_i} \right) (U_{0i}/k_B T)^{2/m_i} b_i^2 n d \right]. \quad (1)$$

Аналогичная ситуация реализуется и при других модельных представлениях потенциалов отталкивательных центров.

Рассмотренный случай отвечает режиму переноса «ниже порога протекания» компонентов i [24]. При меньшей плотности рассеивающих центров, когда реализуется режим переноса «выше порога протекания» (подробнее см. [24, 71]), имеем:

1) при $d \leq L_i$ (L_i — длина корреляции, характеризующая топологию путей переноса частиц i в данном материале [24]) $\Pi_i \sim d^{3-D_i}$ — фрактальный перенос (D_i — фрактальная размерность);

2) при $d \gg L_i$ $\Pi_i = \text{const}$ — диффузионный перенос.

Смысл теоретических зависимостей (1) при малых d состоит в том, что при сильных отталкивательных потенциалах частицы эффективно проходят через мембрану лишь в тех областях, где флуктуирующее силовое поле ослаблено из-за меньшей локальной концентрации отталкивательных центров (в области «дефекта» упаковки центров). Поскольку для частиц разной природы параметры потенциала отталкивания различны, то селективность такой мембраны экспоненциально зависит от толщины мембраны. Поэтому в принципе можно добиться для целевой компоненты аномально высокой селективности при высокой (из-за малой толщины) проницаемости. Пока это лишь теоретический прогноз, предсказывающий уникальные возможности селективного выделения компонентов смесей с помощью субмикроскопических барьерных мембранных структур. Это могут быть слои из органических или неорганических (например, полифосфазиров) материалов, получаемые различными способами (методами Лэнгмюра — Блоджетт, плазмохимии, фотохимии и электрохимии, аллоксостехнологии и др.). Особенно перспективным представляется метод Лэнгмюра — Блоджетт, позволяющий реализовать в слое заданное размещение отдельных молекул (например, получение чередующихся ориентированных слоев доноров и акцепторов на расстоянии 2–3 нм друг от друга) [72–75].

Техническая культура создания таких барьерных структур и субтонких слоев должна быть высочайшей. Соответствующая сверхчистая технология (по материалам, по концентрации примесей и аэрозолей в камере приготовления) должна использовать опыт и методы электронной промышленности. Вероятно, чувствительность таких мембранных систем к детектируемым компонентам может быть повышена, если регистрация сигнала проводится при стороннем возбуждении регистрирующей системы (при

фотовозбуждении полупроводниковой пленки, при переводе мембранны в состояние переключения проводимости [24] и др.).

В случае электрохимических сенсоров в качестве дополнительного управляющего фактора, определяющего перенос частиц, выступает электрическое поле. Изменяя его напряженность в слое, по-видимому, можно регулировать режим «протекания» индивидуальных компонентов — ниже или выше порога. Поэтому анализ вольт-амперных характеристик таких электрохимических систем с барьерными мембранными слоями в широкой области изменения потенциалов может дать исчерпывающую информацию о примесях, присутствующих в электролитической среде.

IV. ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ПРИНЦИПЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ СОСТОЯНИЯ ЭКОСИСТЕМ

Одна из основных задач экологии состоит в выявлении динамических изменений в экосистемах с учетом многообразий жизненных циклов, сложных взаимодействий и внутренних связей (в том числе положительных и отрицательных обратных) в пищевых цепях [76]. Классические детерминистские модели характеризуют наиболее простые из ситуаций, такие как динамику роста популяций в замкнутой среде с учетом параметров плодовитости, реальной площади жизни и т. д., описываемую логистическим уравнением [77–79]; динамику взаимоотношений хищника и жертвы с учетом «эффективности поиска», «успешных» встреч хищника с жертвой и т. д., описываемую уравнением Лотки — Вольтерры [76, 80].

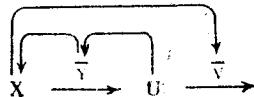
Такие модели позволяют выявить основные принципы существования и существования консументов в экосистемах, понять, как и насколько быстро антропогенные факторы могут вмешиваться в естественные закономерности развития популяций. Возможности современных ЭВМ позволили существенно расширить и углубить детерминистические модели, ввести в них различные функциональные связи, в том числе, разнообразные пищевые цепи [81, 82], проработать взаимодействия консументов со средой обитания, в том числе при наличии в ней токсикантов [83–85]. Возросли и пространственные масштабы экосистем, поддающихся моделированию: от уровней отдельных озер [86] до уровня больших регионов (с размерами до 500 км) [84]. Результаты таких модельных расчетов позволяют более целенаправленно и обоснованно планировать и вести хозяйственную деятельность человека, вырабатывать стратегию спасения терпящих экологическое бедствие регионов.

При таком моделировании, однако, возникает ряд принципиальных проблем [78]. Каждый исследователь связан с необходимостью выбора некоторых условных границ экосистем и граничных условий, что влияет на особенности эволюции системы, ее стационарные состояния, и, конечно, вносит элементы субъективности. Вторая, более принципиальная проблема состоит в нелинейной природе детерминистических уравнений динамики экосистем, что обуславливает практическую непредсказуемость, псевдохаотический характер поведения таких систем на больших интервалах времени из-за исключительной чувствительности решений к выбору начальных условий, которые не могут быть никогда достаточно точно зафиксированы или измерены. При этом высокоразмерные системы, каковыми являются реальные экосистемы с многообразием внутренних обратных связей (положительных и отрицательных, в том числе связей с запаздыванием) и внешних воздействий, в большей мере проявляют хаотический характер поведения с переходами между различными стационарными состояниями. Создается впечатление, что чем больше реальных факторов заложены в модель, тем больше при анализе возникает шансов для перехода к хаосу или, по крайней мере, к нестабильности [78].

Все сказанное означает, что сама формулировка модели должна ориентироваться не столько на выявление многофакторных воздействий на экосистемы, сколько на установление возможностей экосистемы (со всеми ее сложными взаимосвязями) к сохранению и на ее реагирование на отдельные факторы. В частности, это может быть реакция экосистем на изменение состояния среды обитания, например, под влиянием электромагнитных излучений, при внесении токсикантов, источников радиоактивного загрязнения. В последних случаях анализ экологических моделей позволит лучше представить физико-химический и биохимический смысл величин ПДК и ПДВ, в том числе, характер изменения состояний консументов при концентрациях вредных веществ, превышающих ПДК, и «экологический резерв» системы, определяющий величины ПДВ. Очевидно, что уравнения, описывающие эволюцию экосистем, должны учитывать возможности перехода консументов в новые состояния с измененными свойствами (в частности, с повышенным содержанием вредных веществ). Рассмотрим все эти вопросы несколько подробнее.

1. Модели эволюции экосистем при действии токсических веществ. Предельно допустимые выбросы

Для иллюстрации общих принципов учета воздействия токсических компонентов на эволюцию экосистем рассмотрим, следуя [83], модельный пример системы двух взаимодействующих популяций Y и V микробионов в пищевой цепи:



Здесь X – субстрат организма Y , являющийся токсикантом организма V , что отражено в схеме направлением стрелки от X к V . Полагается, что при малых концентрациях субстрата происходит процесс его деградации (потребление организмом Y), т. е. «очистка среды обитания» от вещества X . Однако с ростом концентрации субстрат подавляет функциональную активность Y и тем самым ограничивает образование продукта U , который в свою очередь ингибирует активность Y . Представленная схема, например, может описывать функционирование фенол-деградирующих бактерий (X – фенол, толуол, ненасыщенные углеводороды, жирные кислоты) [83], которое ингибируется самим субстратом X при повышенных его концентрациях (в рассмотренном в [83] случае при $x \geq 5$ ммол/л). Их метаболические партнеры – бактерии V (метаногены) – полностью прекращают образование продукта превращения их субстрата U (метана) при концентрациях $x \geq 20$ ммол/л.

Эволюция таких микробиологических популяций может быть описана следующей динамической системой уравнений формальной химической кинетики [83]:

$$\dot{x} = -\frac{\mu_1(x, u)}{\gamma_1} y + D(x_R - x), \quad (2a)$$

$$\dot{y} = [\mu_1(x, u) - D] y, \quad (2b)$$

$$\dot{u} = \frac{\mu_1(x, u)}{\gamma_1} y - \frac{\mu_2(x, u)}{\gamma_2} v - D u, \quad (2b)$$

$$\dot{v} = [\mu_2(x, u) - D] v, \quad (2g)$$

$$\gamma_1 > 0, \gamma_2 > 0, D > 0, x_R > 0.$$

Здесь x и u — соответственно концентрации субстратов X и U в среде; x_R — концентрация субстрата на поверхности источника (полагаем, что субстрат выходит в среду, растворяясь со скоростью \bar{D} , причем $\bar{D} = \alpha S$, где α — константа скорости растворения субстрата X , S — площадь поверхности субстрата); y и v — соответственно плотности популяций Y и V в культуральной среде; $\mu_1(x, u)$ и $\mu_2(x, u)$ — параметры (их модельные представления см. в [83]), определяющие скорости изменения плотности популяций Y и V ; γ_1 и γ_2 — параметры, связывающие изменения концентраций популяций Y и V .

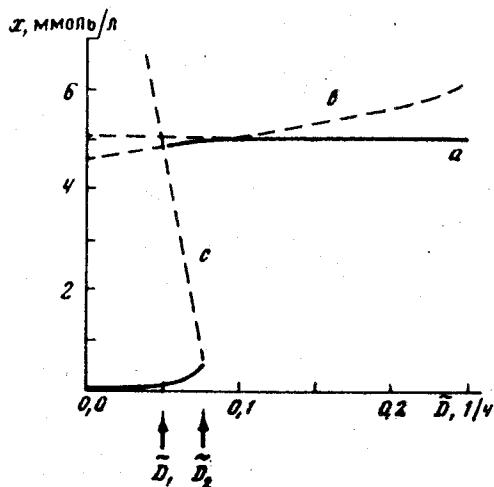


Рис. 2. Бифуркационная диаграмма для системы уравнений (2a)–(2e) [83]. Сплошные линии на ветвях a , b , c характеризуют стационарные состояния субстрата

раций популяций Y и V с концентрациями субстратов X и U . Вторые слагаемые в уравнениях (2б) и (2г) моделируют эффекты ингибирования со стороны субстрата X . Обратим внимание, что в схеме, описываемой уравнениями (2а)–(2г), рассматриваются чисто концентрационные эффекты без учета возможных изменений (см. ниже) функциональных параметров кинетической схемы в процессе эволюционной динамики.

В работе [83] проведен анализ устойчивости различных стационарных состояний системы нелинейных уравнений (2а)–(2г). При этом в качестве управляющего параметра рассмотрена скорость внесения субстрата-токсиканта X в среду. На рис. 2 представлена соответствующая системе (2а)–(2г) бифуркационная диаграмма в плоскости (\bar{D}, x) , построенная при некотором наборе параметров [83]. Сплошные линии на всех трех ветвях a , b , c характеризуют стационарные состояния субстрата X , достигаемые при любой эволюции системы, которая началась бы в окрестности этих состояний (устойчивые состояния). Интервал (\bar{D}_1, \bar{D}_2) — область бистабильности. С экологической точки зрения описываемый «бактериологический реактор» функционирует хорошо, если система находится в области устойчивости ветви c . Тем самым в модели определена величина возмущения, вынуждающая компоненты системы эволюционировать к стандартному состоянию на ветви b , в котором система уже не способна в нужной степени обеспечивать деградацию токсической субстанции X .

Очевидно, что при сопоставительном анализе параметр \bar{D} может характеризовать различные типы токсикантов, инжектируемые в среду источниками с одинаковой площадью растворяющейся поверхности, но с разной скоростью растворения. В то же время различия в величине \bar{D} мо-

гут быть обусловлены разным количеством находящегося в среде определенного токсиканта, т. е. различными величинами площади источника, инжектирующего с определенной скоростью токсикант. Это дает основание при наличии в среде лишь одного сорта токсиканта связывать значения параметра D , при котором реализуется переход с устойчивой ветви с на устойчивую ветвь b , с величиной ПДВ — предельно допустимого выброса компонента в среду, определяемой площадью поверхности S_{lim} , инжектирующей токсикант. При превышении мощности источника вредного компонента, когда $S > S_{lim}$, бактерии Y не справляются с «переработкой» токсиканта. В этом случае в экосистеме могут происходить необратимые изменения (см. ниже).

2. Модели функционирования защитных систем организма. Предельно допустимые концентрации

Как отмечалось во Введении, живые системы в течение всего хода эволюции подвергались достаточно сильным сторонним воздействиям разной природы. В таких условиях в организмах должны были возникнуть специфические защитные системы, предотвращающие губительные воздействия, по крайней мере, малых концентраций ксенобиотиков и других вредных компонентов, малых доз разнообразных поражающих излучений. Очевидно, что такая устойчивость биосистем при изменениях параметров среды возможна до определенного предела, при превышении которого функциональное состояние организма изменяется, при этом возможны экологические последствия для всей экосистемы из-за существующих взаимосвязей, в том числе, пищевых цепей.

Такие отклонения состояний отдельных особей от нормы естественно связать со структурными перестройками в отдельных фрагментах или системах организма (ферментах, мембранах, дыхательных или фотосинтетических цепях). В этом случае может оказаться полезной модель Агеева — Вершубского [87], предложенная ранее для описания кооперативных явлений, связанных с перестройкой полимерной матрицы при процессах сорбции-десорбции бинарных сред, содержащих поверхностно-активные и инактивные компоненты.

Рассмотрим эволюцию структурных изменений в некотором фрагменте живой системы, происходящую при сорбции этим фрагментом вещества токсиканта. В соответствии с [87] будем рассматривать уравнения эволюции двух связанных величин, характеризующих состояние рассматриваемого фрагмента: концентрации $c(t)$ сорбируемого фрагментом компонента-токсиканта и параметра структуры $a(t)$, определяемого как текущее значение доли полного объема V_0 фрагмента, претерпевающей при сорбции структурные перестройки. При этом полагаем: $0 \leq a(t) \leq a_{max} < 1$, где a_{max} — доля объема фрагмента, в которой могут происходить рассматриваемые структурные изменения при сорбции токсиканта. Считаем, что в сорбции участвует объем $(a_{max} - a)V_0$, еще не претерпевший превращения, и объем $V_0(1 - a_{max})$, не подверженный структурным перестройкам (константы скорости соответствующих сорбционных процессов обозначим через γ и η), а десорбция токсиканта в среду реализуется через объемы $(a_{max} - a)V_0$ и aV_0 с константами скорости десорбции β и α соответственно. Пусть k — константа скорости структурных перестроек, возможных в объеме $a_{max}V_0$ фрагмента при сорбции токсиканта. Очевидно, что физический смысл констант α , β , γ , η , k может быть раскрыт при построении моделей более элементарного уровня, учитывающих характер воздействия молекул токсиканта на фрагменты живой системы и детализирующих особенности механизмов структурных превращений, происходящих во фрагментах.

Согласно [87], система уравнений эволюции параметров $c(t)$ и $a(t)$ представляется в виде:

$$\dot{c} = \gamma \left[1 - \left(\frac{c}{c_s} \right)^n \right] (a_{\max} - a) + \eta (c_{0s} - c) (1 - a_{\max}) - \beta c (a_{\max} - a) - \alpha c a, \quad (3a)$$

$$\dot{a} = -ka \left[a^2 - a_{\max} \cdot a + \frac{1}{4} a_{\max}^2 \frac{c_{\max} - c}{c_{\max} - c_{\min}} \right] \quad \text{при } c \leq c_{\max} \quad (3b)$$

$$\dot{a} = 0, a = a_{\max} \quad \text{при } c > c_{\max}. \quad (3b)$$

Здесь c_s и n – соответственно сорбционная концентрация насыщения и параметр динамики сорбции токсиканта фрагментами системы, которые могут изменять при сорбции свою структуру; c_{0s} – сорбционная концентра-

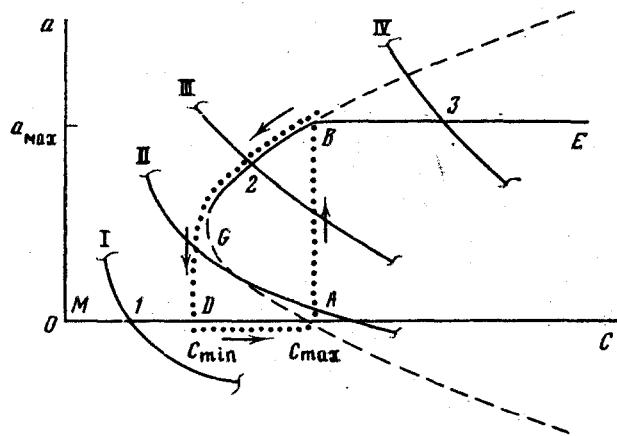


Рис. 3. Фазовый портрет модели [87]. Пунктирные линии – неустойчивые или нереализующиеся ветви; точки – возможная локализация предельного цикла. Стрелками показано направление движения изображающей точки. Номера решений 1–3 соответствуют номерам областей существования стационарных режимов (см. также текст)

ния насыщения фрагментов, не изменяющих при сорбции токсиканта своей структуры; c_{\max} и c_{\min} – критические концентрации токсиканта, при которых начинаются скачкообразные переходы системы в состояние с перестроенной структурой (из исходного неперестроенного) и в состояние с исходной структурой (из структурно перестроенного) соответственно.

Для определения всей совокупности возможных стационарных состояний системы (3a)–(3b) необходимо проанализировать фазовый портрет модели (рис. 3) в пространстве состояний (a, c) [87]. Стационарным решением на фазовой плоскости соответствует пересечение некоторой единственной для данной системы параболы параметров $\alpha, \beta, \gamma, \eta$ нуль-изоклины $\dot{c} = 0$ (на рис. 3 показано семейство возможных кривых такого типа I–IV) с различными ветвями нуль-изоклины $\dot{a} = 0$ (уравнение состояния структуры). Возможно пересечение трех устойчивых ветвей уравнения состояния MA, GB, BE – соответственно кривыми I, III, IV. Пересечению кривой II с неустойчивой ветвью GA отвечает неустойчивое решение системы с реализацией предельного цикла DABG и возникновением автоколебательного режима изменения структуры. На рис. 4 представлена кинетика выхода концентрации токсиканта на стационарный режим в областях MA, GB, BE.

В рамках данной модели контакт фрагмента живой системы со средой не приводит к изменениям его структуры, если сорбируемая концентрация токсиканта не превосходит c_{\max} . При динамическом достижении критической концентрации сорбируемого токсиканта ($c = c_{\max}$) начинаются процессы перестройки структуры фрагмента, которые либо выходят на колебательный режим (при параметрах системы, формирующих нуль-изоклины типа II) с периодическим изменением (от 0 до a_{\max}) структуры фрагмента и концентрации сорбируемого токсиканта (от c_{\min} до c_{\max}), либо завершаются установлением стационарного состояния (a_{st} , c_{st}) системы. При параметрах, формирующих нуль-изоклину I, система возвращается в исход-

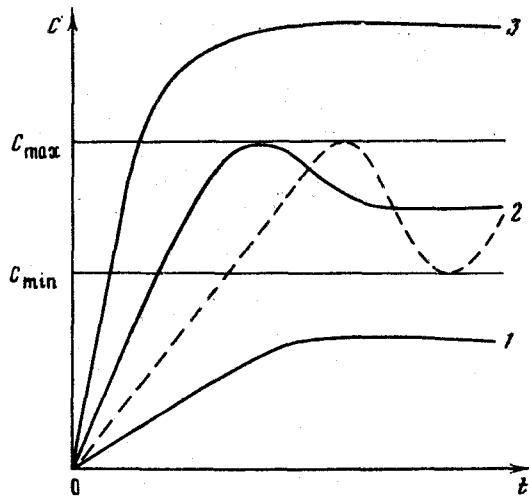


Рис. 4. Характерный вид кинетических кривых выхода концентраций токсиканта на стационарный режим [87]. Цифры у кривых соответствуют номерам областей существования стационарных режимов; пунктирной линией показана возможная реализация колебательной кинетики

ное неперестроенное состояние структуры $(0, c_1)$, в случае нуль-изоклины III формируется состояние (a_3, c_3) , в случае нуль-изоклины IV – (a_{\max}, c_4) .

Таким образом, если при некоторых концентрациях ρ_{lim} токсиканта во внешней среде во фрагменте рассматриваемой системы достигается концентрация c_{\max} , то естественно связывать ρ_{lim} с величиной предельно допустимой концентрации (ПДК). Иначе, ПДК для различных особей можно определить как значения концентраций вредных компонентов во внешней среде, при которых реализуются переходы организма в некоторое иное, отличное от нормального состояние. Такие изменения состояний могут быть или обратимыми или необратимыми в зависимости от того, возвращается или не возвращается состояние к исходному при удалении вредных компонентов из среды. В первом случае можно говорить об экологических модуляциях, во втором – об экологических модификациях и деградации системы [6]. При этом состояние организма можно характеризовать по разным признакам (содержанию вредного компонента, скорости процессов метаболизма, изменениям функциональной активности различных систем организмов, нарушениям в наследственном аппарате и т. д.). Очевидно, что отклонения состояний особей от нормы вызовут общие изменения в эволюции экосистем. В частности, повышение содержания вредного компонента (канцерогена) в некоторых особях может представлять опасность

для хищников, питающихся данными особями и т. д. Это должно быть отражено в системе уравнений эволюции экосистемы как изменение «уровня качества» пищи хищника. Возможная схема построения уравнений эволюции экосистем с учетом происходящих в них модуляционных или модификационных изменений при воздействии флюктуирующих внешних факторов представлена ниже.

3. Уравнения динамики экосистем с учетом различных состояний особей

Общий подход к моделированию экологических модификаций может быть сформулирован на основе кинетических уравнений для пространственно-временных функций распределения подсистем в совокупном пространстве характеристических параметров с введением функций случайных источников и стоков, моделирующих закономерности изменения состояния как за счет внутренней активности этих подсистем, так и за счет внешних для систем факторов [20]. Детерминистический характер кинетических уравнений позволяет заранее определить характер возможных состояний и оценить их относительную устойчивость, а флюктуационные воздействия на систему будут определять реализацию одного из нескольких возможных состояний вблизи точки бифуркации [77].

Поскольку биологические системы являются сильно неравновесными и открытыми, при анализе их эволюции необходимо учитывать два принципиальных обстоятельства. Во-первых, вероятность перехода системы в одно из устойчивых состояний за бифуркационным порогом термодинамической ветви при изменении какого-либо управляющего параметра λ зависит от конкретного состояния системы в данный промежуток времени. В качестве управляющего параметра может рассматриваться численность вида, солнечная активность, доза ионизирующего излучения, количество растворенной органики аллохтонного или автохтонного происхождения (если речь идет о водных системах) и т. д.

Во-вторых, на эволюцию экосистем, как систем сильно неравновесных, могут оказывать эффективные воздействия слабые внешние факторы. В принципе не оказывая никаких эффектов на равновесные системы, такие факторы могут определять предпочтительность в отборе того или иного стационарного состояния за точкой бифуркации («вынужденная бифуркация» [20]). В качестве таких факторов могут выступать, в частности, электромагнитные излучения в различных частотных интервалах (начиная от слабых низкочастотных воздействий [88]), изменения в качественном составе среды обитания и др. Накопление возникающих при этом изменений и последующие флюктуационные воздействия разного характера могут привести либо к незначительным, но принципиальным изменениям в экосистемах, либо к новым бифуркационным переходам.

Очевидно, что моделирование эволюции экосистем сопряжено с большими трудностями принципиального и математического характера. Каждая экосистема – это многокомпонентный объект со множеством внутренних связей (в том числе обратных), подверженный многофакторным воздействиям самой разной природы. Состояние каждой системы можно описать функцией распределения $f(t, r, \Gamma)$, где t – время, r – радиус-вектор, Γ – совокупность параметров, определяющих состояние данной системы. Для количественного анализа уравнений эволюции системы (кинетических уравнений для функции f), осложненных во многих случаях априорной неопределенностью и неоднозначностью совокупных параметров Γ , удобно пользоваться характеристиками, вводимыми при математическом описании хаотического движения в механических и гидродинамических системах.

Обычно рассматривают консервативные системы, для которых элемент

фазового пространства с течением времени изменяет только форму, но сохраняет объем, и диссипативные системы, для которых в процессе движения объем элемента фазового пространства сокращается, т. е. за счет внешнего возбуждения при увеличении управляющего параметра происходит структурообразование системы. Диссипативные системы когерентны. Они ведут себя как единое целое, так, как если бы каждая частица была «информирована» о состоянии системы в целом. При этом уменьшение значения управляющего фактора в классических диссипативных системах обратимо приводит к исходному состоянию консервативной системы.

В экосистемах ситуация может быть принципиально иной. Изменения, происходящие в сообществах при обратимом изменении некоторых управляющих параметров, могут быть обратимыми и необратимыми, т. е. характеризоваться своеобразным «гистерезисом». Обратимые изменения в экосистемах, в том числе характеризующиеся уменьшением объема элементов обобщенного фазового пространства (\mathbf{r}, Γ), будем определять как экологические модуляции. Необратимость происходящих в экосистеме изменений указывает на то, что величина управляющих параметров превысила адаптационные возможности биоценоза. В этом случае следует говорить об экологических модификациях, а при развитии процессов метаболического и экологического регресса [6] — о процессах деградации экосистем. Очевидно, что в каждом конкретном случае необходимо дополнительно определить минимальный уровень необратимых изменений, свидетельствующий о возникновении экологических модуляций, модификаций, экологического регресса. В частности, можно фиксировать изменения в генетическом аппарате.

К настоящему времени известно несколько систем (механических, гидродинамических и др.), для которых можно аналитически описать явления возникновения диссипативных структур под воздействием управляющих факторов (вынуждающая сила при возбуждении движения маятника, разность температур в системе Бенара, вносимая энергия в системе Хенона — Хайлеса [77] и др.). В экологических системах невозможно даже быть уверенным в адекватности описания стационарных состояний, и трудности возникают уже при моделировании детерминированного поведения таких систем. Поэтому будем говорить лишь о качественном анализе особенностей эволюции сообществ.

Представляют интерес характер перехода к бифуркационным точкам и факторы, которые определяют такие переходы к новым уровням организации сообществ. В этом случае достаточным может оказаться анализ более простой, нежели для функций распределения $f(t, \mathbf{r}, \Gamma)$, зависимости для корреляционной функции флуктуаций («коррелятора»):

$$\delta g_a = \int \langle \delta f_a(t_1; \mathbf{r}_1, \Gamma_1) \delta f_a(t_2; \mathbf{r}_2, \Gamma_2) \rangle d\Gamma_1 d\Gamma_2. \quad (4)$$

Здесь $\delta f_a = f_a - \bar{f}_a$, где \bar{f}_a — стационарная функция распределения подсистемы a . Символ $\langle \dots \rangle$ означает усреднение по всем возможным состояниям подсистемы. В случае пространственно-однородных систем усреднение включает интегрирование по одному из радиус-векторов и по одному из моментов времени. При этом вводятся переменные: $\mathbf{r} = \mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_2$, $\tau = t_1 - t_2$. В частности, для классической реакции Белоусова — Жаботинского — окисление малоновой кислоты в присутствии сульфата церия и бромата калия, когда спектроскопическими методами фиксируются временные колебания в концентрациях Ce^{3+} и Ce^{4+} , — внешним управляющим параметром является среднее время пребывания веществ в проточном реакторе. В этом случае введенная функция $\delta_g(\mathbf{r}, \tau) = \delta g_a(\tau)$ — есть мера корреляции между последовательными значениями фиксируемых по селективному поглощению света ионами Ce^{4+} изменений их концентраций. Для регулярного движения

функция $\delta\tilde{g}(\tau)$ постоянна или осциллирует, а в хаотическом режиме $\delta\tilde{g}(\tau)$ быстро (часто экспоненциально) спадает со временем [77, 89].

Конечно, уравнения, описывающие эволюцию функции $\delta g(\tau)$, в общем случае сложны и трудны для анализа, однако использование обычных для таких уравнений феноменологических приближений времен корреляций может стать основой для качественного анализа моделей экосистем. Действительно, решения уравнений для функций f при воздействии на систему стохастических факторов следует рассматривать либо в виде обобщенных функций [90], либо, следуя методу Ланжевена [91], в вероятностном виде — как функций плотности вероятности реализации различных значений f . В то же время анализ релаксационных уравнений, конечно, не столь информативных, как уравнения для f , может оказаться более легкой задачей. При этом удобнее анализировать уравнения для Фурье-компонент:

$$\delta\varphi_a(\mathbf{k}, \omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int \delta g_a(\mathbf{r}, t) \exp[-i(\mathbf{kr} - \omega t)] d\mathbf{r} dt. \quad (5)$$

Это отчасти связано с простым аналитическим видом Фурье-компонент стохастических внешних воздействий.

Приведем простейший пример введения релаксационных уравнений для корреляторов в линейном приближении, когда «уравнение движения» для функции $\delta\tilde{f}_a(t)$ имеет вид

$$\frac{d}{dt} \delta\tilde{f}_a = - \sum_b \lambda_{ab} \delta\tilde{f}_b, \quad (6)$$

где λ_{ab} — постоянные коэффициенты. Таким же линейным уравнениям удовлетворяют и корреляторы величин $\delta\tilde{f}_a$ [92]:

$$\frac{d}{dt} \langle \delta\tilde{f}_a(t) \delta\tilde{f}_c(0) \rangle = - \sum_b \lambda_{ab} \langle \delta\tilde{f}_b(t) \delta\tilde{f}_c(0) \rangle, \quad t > 0 \quad (7)$$

(индекс c в этой системе уравнений свободный). При значительном отклонении системы от равновесия, а также при действии на нее хаотических факторов, способных вывести ее из рассматриваемого исходного стационарного состояния, уравнения, описывающие развитие системы, оказываются нелинейными.

Применительно к эволюции экосистем чаще всего анализируются простейшие нелинейные уравнения с обратными связями [76, 93, 94], в которых учитываются межвидовые взаимодействия, а также воздействия на систему абиотических факторов. Ниже предложен несколько отличающийся от [76, 93, 94] способ описания состояния системы, позволяющий использовать указанные выше синергетические подходы [20, 77] для анализа эволюции экосистем с учетом всех имеющихся внутренних связей (в том числе положительных и отрицательных обратных) и внешних факторов.

Состояние экосистем может характеризоваться наличием определенного количества трофических уровней. Припишем каждому организму данной экосистемы два числа (ij) . Индексом i ($i=1, 2, \dots, l$) будем характеризовать порядок трофического уровня, начиная с уровня консументов высшего порядка ($i=1$) и кончая уровнем продуцентов ($i=l$). Нумерацию особей в каждом из трофических уровней i будем задавать индексом j ($j=1, 2, \dots, N_i$, где N_i — число особей уровня i). Будем полагать, что каждая особь находится в одном из нескольких возможных состояний (эти состояния s можно охарактеризовать с точки зрения физиологии, биохимии и т. д. в зависимости от постановки задачи и уровня рассматриваемой проблемы).

Пусть θ_{ij}^s — относительные заселенности каждого из состояний $s(ij)$ для особей (ij) с условием нормировки $\sum \theta_{ij}^s = 1$. При этом состоянию экосистемы в норме отвечают некоторые стационарные состояния заселенности θ_{ij}^s . Состояния s_0 и соответствующие значения θ_{ij}^s в общем случае зависят от естественного возраста всей экосистемы и ее предыстории и изменяются с достаточно большими характерными временами в соответствии с запрограммированной наиболее вероятной эволюцией данной экосистемы, вплоть до ее существенных модификаций с переходом в климаксное состояние. Поскольку нас будут интересовать эволюционные изменения, связанные с воздействием внешних факторов на сообщество и происходящие в течение гораздо меньшего времени, чем естественная сукцессия, то будем рассматривать эволюцию экосистемы как квазистационарный процесс и не вводить явно зависимость s_0 от времени. Представим уравнения эволюции экосистемы в виде:

$$\frac{d\theta_{ij}^s}{dt} = \sum_{i'j';s'} \hat{D}[\theta_{ij}^s | \{\theta_{i'j'}^{s'}\}] + \\ + \sum_{s'} \hat{L}[W(ij; s' \rightarrow ij; s) \theta_{ij}^{s'} - W(ij; s \rightarrow ij, s') \theta_{ij}^s] + (g_{ij}^s - r_{ij}^s). \quad (8)$$

Здесь \hat{D} — нелинейный оператор, определяющий эволюцию экосистемы вследствие имеющихся в ней внутренних взаимосвязей при стандартных внешних условиях, обеспечивающих естественную эволюцию. Второе слагаемое, характеризуемое действием линейного оператора \hat{L} , определяет влияние на эволюцию системы флюктуаций во времени внешних факторов и воздействие факторов новой (для данной экосистемы) природы, выражаемое через вероятности W перехода системы из состояния s в смежные состояния s' и обратные переходы из возможных состояний s' в состояние s .

Например, при внесении в среду обитания биоцидных ионогенных добавок происходит внедрение ионных примесей в разнообразные системы организма, в частности в системы активного транспорта ионов, что может принципиальным образом повлиять на кинетику их функционирования вследствие изменений исходных распределений локальных электростатических полей в окрестности ионных каналов биологических мембран, а также возможных конформационных перестроек в белок-липидных комплексах [24]. Это обстоятельство может быть учтено изменением входящих в уравнение (8) вероятностей $W(ij; s \rightarrow ij, s')$ и должно повлиять на заселенности θ_{ij}^s , а, следовательно, на эволюцию всей экосистемы. Очевидно, что аналогичным образом (через изменение вероятностей $W(ij; s \rightarrow ij, s')$) может быть описано воздействие на структурные элементы биологических систем ионизирующего излучения.

В качестве флюктуирующих факторов в уравнении (8) могут выступать изменяющиеся во времени величины pH, интенсивности теплового и УФ-излучений, концентрация питательных веществ (если речь идет о водных ценозах) и др. Включение во второе слагаемое «новых» факторов подразумевает возможность их существенного воздействия на эволюцию экосистемы. Третье слагаемое в уравнении (8) характеризует скорость изменения заселенности θ_{ij}^s за счет внешних источников (g_{ij}^s) и стоков (r_{ij}^s) и может содержать быстро флюктуирующую во времени составляющую. Поэтому во втором и третьем слагаемых удобно иногда выделять флюктуационные составляющие и представлять их в виде обобщенных функций,

например:

$$g_{ij}^s - r_{ij}^s = \sum_k a_{ij,k} \theta(t - t_k), \quad \theta(x) = \begin{cases} 1 & \text{при } x > 0 \\ 0 & \text{при } x < 0 \end{cases} \quad (9)$$

или

$$g_{ij}^s - r_{ij}^s = \sum_k b_{ij,k} \delta(t - t_k). \quad (10)$$

Здесь $\delta(x)$ — дельта-функция.

Считая второе и третье слагаемые возмущающими факторами, можно проанализировать развитие экосистемы в условиях действия этих факторов, если эволюция невозмущенной системы, выражаемая в общем случае системой нелинейных уравнений для заселенности $\bar{\theta}_{ij}^s$, считается известной, т. е. известны зависимости $\bar{\theta}_{ij}^s = \bar{\theta}_{ij}^s(t)$. Для получения этих зависимостей в каждом конкретном случае необходимо составить и разрешить соответствующую модельную систему нелинейных уравнений, параметры которой могут быть получены в ходе специальных исследований. Как указывалось выше, нас будет интересовать временное поведение разностных величин $\delta\theta_{ij}^s = \theta_{ij}^s - \bar{\theta}_{ij}^s$. Мы не считаем в общем случае эти изменения малыми ($\delta\theta_{ij}^s \ll 1$). Вследствие нелинейных взаимосвязей в системе изменение заселенности состояний s (с переходом $s_0 \rightarrow s_1$) для особей (ij) из-за воздействия «слабых» факторов может существенно повлиять на эволюцию всей системы.

Очевидно, что каждой совокупности ξ внешних факторов (естественных для данной экосистемы) должно соответствовать вполне определенное состояние s_0^{ξ} . Если можно говорить о взаимно однозначном соответствии состояний s_0^{ξ} состояниям среды, то изменения значений s_0^{ξ} (переход в смежные состояния s из состояния s_0) будем квалифицировать как модуляционные. Если же происходят необратимые изменения состояний s_0 (например, реализуется переход в состояние s' с изменением наследственных структур), то будем говорить о модификации или о деградации состояния (ij) . В этом случае могут произойти принципиальные изменения во всей экосистеме из-за существования в ней внутренних взаимосвязей. Проблемы эволюции экосистем состоят именно в выявлении возможностей таких необратимых изменений, фиксируемых через функции $\delta\theta_{ij}^s(t)$. Как отмечалось выше, удобнее анализировать эволюцию корреляторов $\delta g_{ij}^{ss'}(t) = \langle \delta\theta_{ij}^s(t) \delta\theta_{ij}^{s'}(0) \rangle$, где s' — любое из возможных состояний, или компонентов их частотного спектра $\delta\Phi_{ij}^{ss'}(\omega)$.

V. ВЛИЯНИЕ ПРОЦЕССОВ МАССОПЕРЕНОСА В СИСТЕМЕ ЗЕМЛЯ — АТМОСФЕРА НА СОСТОЯНИЕ БИОСФЕРЫ

Сохранение жизни на Земле в условиях продолжающихся интенсивных антропогенных воздействий в значительной степени может зависеть от ряда глобальных факторов, влияющих на эволюцию крупных экосистем (морей и океанов, части материков). При этом имеются в виду явления, происходящие не только в биосфере Земли, но и в верхних слоях атмосферы, в глубинных слоях Земли. Прежде всего, это круговорот воды и биологически важных элементов (C, O, N, P и некоторых других) в природе. Реализация соответствующих циклов разнообразна и помимо перемещений воды в атмосфере, потоков подземных вод, несущих разнообразные компоненты неорганической и органической природы, может включать циркуляцию вод в океанах [95, 96] и круговорот океанической коры (формирование ее из расплавов мантийного резервуара при их частичной дегазации с последующей субдукцией океанической литосферы [97]).

1. Процессы в верхних слоях атмосферы

В данном разделе будет обсуждена возможность существования достаточно интенсивных потоков воды, молекулы и кластеры которой могут увлекать с собой и другие компоненты неорганической и органической природы из нижних слоев атмосферы в стратосферу, а далее в ионосферу и космическое пространство. Выявление и количественный анализ величин таких направленных потоков веществ крайне необходимы для построения моделей эволюции крупных экосистем, для понимания эволюции всей биосферы в целом.

Очевидное влияние верхних слоев атмосферы на эволюцию биологических сообществ реализуется через озоновый слой, предохраняющий биоценозы от поражающих воздействий интенсивного УФ-излучения [33]. Именно с глобальным характером опасности разрушения этого слоя при фотодиссоциации фреонов в стратосфере было связано появление международных соглашений, ограничивающих производство и широкое использование этих реагентов, которые, не взаимодействуя с тропосферными радикалами, беспрепятственно поступают в стратосферу.

В верхних слоях атмосферы на высотах ~ 100 км зафиксировано наличие многих неорганических и органических соединений [98–100], что указывает на непригодность использования равновесных барометрических представлений для определения плотности и состава атмосферы. На указанных высотах в аномально больших количествах может присутствовать вода, образуя серебристые облака, причем источники этой воды далеко не всегда связаны с вулканическими выбросами. Были зафиксированы сезонные изменения соотношения концентраций Na и K в серебристых облаках, которое летом совпадает с соотношением, характерным для морской воды [99]. Это указывает, что Na и K попадают в серебристые облака при ветровом распылении морской воды, и свидетельствует скорее о земных, а не о космических (вследствие взаимодействия солнечного ветра и ионосферы) причинах появления на указанных высотах серебристых облаков.

Скорость доставки разнообразных компонентов из тропосферы в верхние слои атмосферы прежде всего определяется турбулентным перемешиванием атмосферы по крайней мере до высот ~ 110 км [101]. Доказательства существования интенсивных перемещений воздушных масс на высотах 80–90 км (скорость ветровых сдвигов $\sim 1 \div 2$ км/ч) были получены, в частности, при анализе форм серебристых облаков, а также на основе спектроскопических данных [102]. Возможным источником турбулентности, обеспечивающим указанный перенос компонентов, являются внутренние гравитационные волны, распространяющиеся из областей активных метеорологических процессов, происходящих в нижней атмосфере (фронты, зоны повышенной активности), а также из горных районов [101].

Перенос воды в верхние слои атмосферы могут осуществлять заряженные кластеры воды в электрических полях, возникающих между грозовыми облаками и ионосферой [98]. Согласно оценкам [98], с ионными кластерами, содержащими 10 молекул H_2O , с площади 1 км² за 1 ч при характерном суммарном токе $\sim 0,1$ А может быть перенесено ~ 1 г H_2O , что соответствует содержанию воды в серебристом облаке объемом ~ 1 км³, составленном из ледяных частиц диаметром $\sim 0,12$ мкм, с концентрацией $\sim 0,1$ частица/см³. Очевидно, что такой «дождь наверх», «дождь на ионосферу» должен очищать атмосферу от аэрозольных частиц и растворенных в воде газовых компонентов.

Последующий перенос молекул воды и примесных частиц, которые частично диссоциируют, ионизуются, во внешние слои ионосферы может

происходить под действием конвективных потоков плазмы, развивающихся в системе ионосфера-магнитосфера при ее дрейфе в скрещенных электрических и магнитных полях. Электрические поля в пограничных областях ионосферы возникают безотносительно к возможным полям между мощными грозовыми облаками и ионосферой [103, 104]. Как показывает анализ [105], в системе ионосфера-магнитосфера могут реализовываться различные типы распределения крупномасштабного электрического поля, каждому из которых будет соответствовать определенный тип конвективных движений плазмы. Существующие при этом характерные неоднородности ионосферы с пространственным масштабом $\sim 10-10^3$ км [106], могут сильно влиять на кинетику выноса компонентов к внешним слоям ионосферы, в том числе в область экзосферы (выше 500 км), где интенсивно идут процессы теплового разогрева частиц за счет поглощения молекулами кислорода и азота УФ квантов солнечного света. При этом часть молекул и атомов приобретает тепловые скорости, превосходящие величину 11,2 км/с, достаточную для выхода частиц за пределы земной атмосферы.

Унос компонентов земной атмосферы (преимущественно молекул воды и образующихся атомов и ионов кислорода, атомов и молекул азота) за пределы действия гравитационного поля Земли реализуется также при взаимодействии солнечного ветра — потока заряженных частиц (преимущественно протонов, ядер гелия и электронов), испускаемых Солнцем, — с обращенными к этому потоку внешними слоями ионосферы, формирующими границу магнитосферы [103]. В переходных слоях, которые образуются на границе области сильного магнитного поля (магнитосферы) и быстroredвижущейся плазмы возникают сильные электрические поля [107–108]. Эти поля могут вызывать магнитосферную конвекцию, ускорение плазменных потоков, способствующих выносу нейтральных и заряженных компонентов в область непосредственного влияния солнечного ветра, «сдувающего» частицы атмосферы в космос. Высокозергетические компоненты солнечного ветра проникают в атмосферу вплоть до высот 40–60 км, так что процессы «сдува» могут идти с разной степенью эффективности по толще атмосферы — с мезосферы и вплоть до высот, превышающих $\sim 1000-1500$ км, где еще фиксируются современными приборами заметная концентрация ($\sim 10^2$ см $^{-3}$) ионов кислорода и азота [109]. На возможность реализации такого механизма уноса частиц атмосферы в космическое пространство указывают данные о воздействии солнечного ветра на космические лучи. В условиях пересечения Землей части рекуррентного высокоскоростного потока солнечного ветра часть потока «предназначенных» Земле космических лучей сносится и не попадает на Землю [110].

Эффективность эффектов «сдувания» возрастает с увеличением скорости частиц солнечного ветра, если энергия частиц достаточна для генерации вторичных частиц и образования ливней, поскольку при этом могут передаваться большие суммарные импульсы частицам (ионам, молекулам, кластерам) атмосферы. В связи с этим представляет интерес анализ явлений, происходящих на Солнце, обусловливающих повышение скорости частиц солнечного ветра. Принято считать, что высокоскоростные потоки солнечного ветра возникают в корональных дырах или в униполярных магнитных областях с открытой конфигурацией магнитного поля [111]. Другая возможность генерации высокоскоростных потоков солнечного ветра может быть связана с нестационарными процессами в активных областях Солнца или в окрестности активных образований [111–113]. Ускорение испускаемых Солнцем протонов может, в частности, вызываться формированием на расстояниях ~ 2000 км от поверхности Солнца, где резко падают температура и плотность, магнитогидро-

динамических альфеновских волн [114], в которые преобразуются нелинейные акустические волны, генерируемые слоями фотосфера Солнца.

Именно с альфеновскими волнами, возникающими при мощных солнечных вспышках, связывают генерацию потоков солнечного ветра с аномально высокими, вплоть до релятивистских значений, энергиями. На то, что величина энергии E_p , испускаемых Солнцем протонов может составлять $E_p \leq 3000$ МэВ, указывают зафиксированные после некоторых солнечных вспышек (например, 21 июня 1980 г., 3 июня 1982 г.) потоки нейтронов (образовывались в атмосфере вместе с π -мезонами) с энергиями до 1000 МэВ [115, 116].

Поскольку высокоскоростные потоки солнечного ветра могут усиливать процесс «сдувания» компонентов атмосферы в космос, выяснение адекватных механизмов формирования таких потоков и их связи с видимыми явлениями и процессами на Солнце (см. также ниже сноску²) имеет большое значение для анализа процессов частичной «замены» компонентов атмосферы и ее очищения (см. ниже), влияющих на эволюцию биосферы Земли. Это особенно актуально в связи с усилением антропогенных воздействий на ионосферу Земли мощных КВ-излучений, химических веществ, инжектируемых при полетах сверхзвуковых самолетов, запусках мощных ракет [117, 118], а также в связи с возможностями стимулирования процессов в ионосфере (например, при возбуждении в ней плазменно-волновых разрядов [119]).

Конечно, величины потоков и состав уносимых с Земли компонентов изменяются со временем и зависят от многих факторов. Обсуждение в данном разделе всего комплекса проблем «массопереноса вверх», за пределы гравитационного влияния Земли представляется необходимым, поскольку априори неясно, какая из стадий переноса компонентов атмосферы (прежде всего воды, кислорода, азота) в космическое пространство является лимитирующей. Можно думать, что каждая из рассмотренных выше стадий может при определенных условиях оказаться определяющей. В следующем разделе будет обсужден круг проблем, связанных с выявлением процессов во внутренних областях Земли, которые обуславливают существующее стабильное состояние атмосферы, несмотря на описанные процессы «очищения» атмосферы за счет уноса ее компонентов в космос.

2. Процессы во внутренних областях Земли

Глубинные слои Земли оказывают не только прямое воздействие на экосистемы (при землетрясениях или выбросах в атмосферу продуктов вулканической деятельности), но и опосредованное, определяя магнитное поле Земли. Влияние магнитного поля на эволюцию экосистем реализуется при его воздействии на функционирование биологических объектов [24, 88, 120], а также на состояние водных систем как среды обитания [24, 48, 49].

Ниже будет показано, что к экологическим последствиям могут приводить также процессы, с которыми связывается генерация магнитного поля Земли. Согласно существующим представлениям [121–125], наблюдаемое магнитное поле обусловлено возникающими при вращении Земли конвективными движениями проводящей среды — жидкотвердого металлического ядра Земли, заключенного в сферическом слое $0,19 R_0 < R < 0,57 R_0$ между мантией и твердым внутренним ядром (R_0 — радиус Земли). Необходимым условием функционирования такого механизма («дипамо-механизм») является гиротропность (отражательная неинвариантность) конвективных потоков, в которых должно преобладать либо правовинтовое, либо левовинтовое движение. Математически это выражается ненулевым значением средней спиральности возникающих потоков: $\langle \mathbf{v} \cdot \mathbf{rot} \mathbf{v} \rangle \neq 0$, где

v — вектор локальной скорости потока. Магнитное поле Земли имеет полоидальную (меридиальную) компоненту с силовыми линиями в меридиальной плоскости и тороидальную (азимутальную) компоненту с направлением силовых линий по параллелям. При этом лишь меридиальное поле имеет радиальную компоненту и продолжается в окружающую среду. Конвективные движения в жидкостно-металлическом ядре при отличающейся угловой скорости вращения его различных слоев приводят к трансформации указанных магнитных полей, в том числе к переходам указанных компонентов друг в друга [121, 122]. При этом энергия, которая расходуется на диссипацию при функционировании динамо, выделяется в процессах гравитационной сепарации в жидком ядре Земли — при выпадении тяжелых веществ, прежде всего железа, на нижней границе жидкого ядра и легких веществ, содержащих элементы S, O, Si, на его внешней границе.

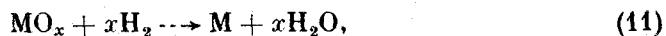
Важно подчеркнуть, что динамо-механизм является лишь механизмом усиления некоторых затравочных магнитных полей, которые генерируются в жидком ядре Земли. Согласно [122], наиболее вероятные механизмы генерации таких полей связаны с гальваноэлектрическими явлениями, в частности с «батарейным» эффектом. Последний характерен для лоренцовой плазмы [92] при непараллельности градиентов концентрации и давления электронов. В условиях Земли батарейное поле естественным образом связано с крупномасштабными неоднородностями температуры и химического состава на границе раздела мантии и жидкого ядра. При этом происходящие в течение геологических эпох изменения величины и знака геомагнитного поля (данные получаются из анализа величины намагниченности древних пород), согласно [122], связаны с изменением состава межфазной границы из-за обмена веществом между мантией и ядром (ср. [124]).

Несмотря на всестороннее развитие теории земного магнетизма, вопрос о характере конвекции в земном ядре, о природе затравочных магнитных полей до сих пор однозначно не решен. Ниже мы остановимся на одной из возможных гипотез [24] о природе затравочного геомагнитного поля, из которой вытекает ряд глобальных следствий, относящихся к эволюции экосистем Земли и к особенностям образования ряда полезных ископаемых, оптимальный поиск и рациональное использование которых составляют важный аспект природоохранной деятельности человека.

Предполагается [24], что в области границы внешнего жидкостно-металлического ядра Земли с нижней мантией, где высокие давления сочетаются со сдвиговыми деформациями и разрушением (перемалыванием) пород, протекают эндотермические химические превращения. Один из исходных реагентов — водород — растворен в высоких концентрациях ($\sim 10^{21} \text{ см}^{-3}$) в жидкостно-металлическом ядре Земли (эта гипотеза не противоречит возможным представлениям об образовании нашей планеты) [126]¹. Согласно такому предположению, ядро Земли представляет собой достаточно емкий источник водорода, действующий, по крайней мере, на протяжении более 2 млрд. лет, т. е. во все время существования гидросфера. При указанных значениях плотности растворенного в ядре Земли водорода его масса ($\sim 2 \cdot 10^{28} \text{ г}$) превосходит общую массу водорода в гидросфере ($1,8 \cdot 10^{23} \text{ г}$) на 3 порядка. Основанием для этой гипотезы служит многообразие вытекающих из нее (см. ниже) следствий, часть которых поддается, по-видимому, непосредственной проверке. В указанных условиях водород, находящийся в атомарном ионизированном со-

¹ Из модели [126] может следовать также, что в ядре Земли растворены гелий, азот, кислород (в меньших количествах, чем водород).

стоянии в расплаве каталитически активных элементов группы железа и других тяжелых элементов, может эффективно восстанавливать оксиды MO_x металлов нижней мантии с образованием воды



взаимодействовать с карбидами металлов в нижней мантии, образуя метан



Вода возникает также при взаимодействии водорода с кислородом, подходящим к границе ядро — мантия. Образующиеся продукты, а также выходящие из ядра гелий и азот отводятся в верхние слои мантии и далее в земную кору.

Можно предположить, что межфазная граница ядро Земли — мантия не является идеальной сферой, она скорее «изрезана» по радиусу от центра и является неоднородной по составу граничащих с жидким ядром пород. При высокой скорости указанных каталитических процессов в ряде областей такой неоднородной границы в жидкой фазе ядра могут инициироваться конвективные массовые потоки, обусловливающие перенос водорода в реакционные зоны, а за счет градиентов температур, формирующихся при эндотермических химических превращениях (прежде всего при протекании реакции (11)), могут возникать некоторые пространственно зафиксированные диссипативные структуры. При этом из-за формирования неоднородных по межфазной поверхности скачков температур $\Delta T(r)|_{s_i} = T_{s_i}(r) - T_0 < 0$, где $T_{s_i}(r)$ — локальная температура межфазной поверхности нижняя мантия — жидкое ядро (поверхность S_i), $T_0 = T_{s_0}$ — температура «на дне» (поверхность S_0) рассматриваемой конвективной зоны, могут образовываться структуры смешанной природы — Бенара [77] и Марангони [127]. Очевидно, что из-за неоднородности (химической, температурной) поверхности должны возникать несимметричные, нерегулярные диссипативные структуры (валы, вихри). Такая нерегулярность будет обусловливать ненулевую среднюю спиральность генерируемых потоков жидкостной среды, что необходимо для возникновения затравочного магнитного поля.

В таких конвективных структурах из-за наличия градиента температуры в радиальном направлении температура в каждом сечении, параллельном межфазной поверхности, изменяется в пределах ячейки [77] от некоторой максимальной величины на границе ячейки S_u , где конвективный поток направлен из глубины ядра вверх — к межфазной поверхности, до минимального значения на границе S_d , где поток направлен вниз — в глубь ядра. Тем самым создаются условия для реализации термодиффузионных потоков (эффект Соре) высокоподвижной электронной компоненты по направлению от границы S_u к границе S_d . Вследствие этого в области между указанными границами возникают компенсирующие термодиффузионный поток электронов электрические поля E_c . Эти поля должны характеризоваться не только компонентами E_c^\perp , нормальными поверхности S_u и S_d (следствие эффекта Соре), но и компонентами E_c^{\parallel} , параллельными указанным поверхностям (из-за изменения средней температуры в радиальном направлении). При этом на границах S_u , S_d , S_i , S_0 , а также в сечениях S_m конвективной зоны, где значения $T(r)|_{s_m}$ характеризуются локальными минимумами или максимумами, формируются двойные электрические слои.

Можно ожидать, что перераспределение лабильной электронной плотности вследствие эффекта Соре и формирование электрических полей E_c приведет к дополнительной стабилизации диссипативных структур. Помимо этого из-за возникновения компоненты электрического поля E_c^{\parallel} ,

в каждой диссипативной ячейке формируются замкнутые контуры L , в которых протекают вихревые токи:

$$\oint_L \mathbf{E}_c \, d\mathbf{l} = -\frac{1}{c} \frac{d}{dt} \int_S \mathbf{B} \, d\mathbf{S} \neq 0,$$

где \mathbf{B} – вектор электромагнитной индукции; $d\mathbf{l}$ – дифференциальный элемент замкнутого контура L ; S – поверхность, опирающаяся на контур L .

Очевидно, что в диссипативной ячейке, смежной к рассматриваемой, формируется вихревой ток противоположной направленности. Однако из-за отмеченной неоднородности образующихся конвективных структур в изучаемой системе индуцируется результирующее магнитное поле, которое может рассматриваться наряду с другими анализируемыми полями [122] как затравочное. Ориентация контуров L будет зависеть от геометрических характеристик химических неоднородностей межфазной границы и от дифференциальной скорости вращения жидкок-металлической фазы ядра в области формирования рассматриваемых диссипативных структур².

Очевидно, что геомагнитное поле (при адекватности рассматриваемой модели) должно быть связано с наибольшими по пространственному масштабу конвективными потоками массы в ядре Земли, которые создаются при восстановлении оксидов – наиболее распространенных соединений в мантии, – сопровождающимся образованием воды. При критическом анализе этой гипотезы необходимо принять во внимание известные данные о распределении воды в земной коре и гидросфере в различные геологические эпохи и о стохастических изменениях магнитного поля Земли, происходящих в данной модели вследствие уменьшения скорости химической реакции (либо из-за исчерпания оксидов на рассматриваемом участке границы ядро – мантия, либо из-за лимитирования стадий отвода продуктов). В то же время на основе данных о стохастическом характере изменений геомагнитного поля, по-видимому, могут быть сделаны заключения о структуре межфазной границы жидкое ядро – нижняя мантия и о кинетике протекания в этой области эндотермических превращений, инициирующих образование диссипативных структур в жидком ядре Земли. Это в свою очередь позволит пойти к прогнозированию дальнейших изменений геомагнитного поля, что имеет несомненное значение для экологического моделирования.

Из изложенного вытекает еще ряд следствий экологической и природоохранной направленности, относящихся к проблемам образования полезных ископаемых. Выявление механизмов образования залежей руды, нефти, газа, угля полезно с позиций не только их эффективного поиска, но и рационального вскрытия и использования этих месторождений, что особенно важно, поскольку ресурсы Земли в значительной мере уже истощены. На основе гипотезы о реализации процессов (11) и (12) может быть развита теория о смешанной неорганической и органической природе образования нефти.

Возникающий по реакции (12) метан может участвовать в цепи дальнейших каталитических процессов неполного окисления (с участием молекул воды и кислорода) и гидрирования. В результате этих реакций,

² Электрические поля указанного типа могут формироваться также в конвективной зоне Солнца и в относительно устойчивых конвективных структурах солнечной атмосферы [128]. Эти поля не только обеспечивают дополнительную стабильность структур в солнечной плазме, но и действуют как фактор, ускоряющий заряженные частицы (протоны, электроны), обусловливая повышение энергии частиц солнечного ветра (внешний эффект) и неизотермический ядерный синтез в области нижней границы конвективной зоны (внутренний эффект).

протекающих в субмикропорах пород нижней мантии Земли при более умеренных температурах, нежели образование метана, синтезируются алканы (возможно, через образование CO [129]), алкены, алкадиены, алкины, арены, ацены [130–134], являющиеся простейшими компонентами нефти.

Дальнейший путь превращений этих компонентов в более сложные и тяжелые нефтяные фракции связан с переносом компонентов по системе транспортных каналов под действием градиентов статических давлений в области, где может происходить их органическая (возможно, при наличии «складированных» в этих участках ископаемых остатков веществ органической и биоорганической природы) и микробиологическая трансформация в условиях диагенеза.

Проблемам био- и геохимии процессов нефтеобразования посвящено много специальных исследований [135–141]. По-видимому, предлагаемая схема дает возможность согласовать теории органического и неорганического происхождения нефти. Во-первых, она естественным образом включает в себя органические и микробиологические стадии превращений [138–140], в том числе выявляемые при исследовании биомаркеров нефти [140]. Во-вторых, развиваемая схема позволяет понять глубинное неорганическое происхождение нефти и газа [141]. Считается установленным [142], что для существования месторождений нефти и газа необходима подпитка полезного ископаемого подтоком природных газов, прежде всего метана, из глубины с их частичным оттоком и расщеплением в тропосфере земли («восходящий массоперенос»), где происходит окисление углеводородов в фотохимических реакциях до CO₂. Приток газообразных углеводородов вместе с водородом и гелием в скважины, углубленные в кристаллический фундамент, был зафиксирован на глубинах 2–12 км [130, 143].

С этих позиций несомненный эвристический интерес представил бы анализ карт известных месторождений нефти и газа (с дискриминацией их по типам и возрасту) с целью возможного включения их в единую систему «пор» (мест скопления нефти и газа) и «каналов» (транспортных путей). Такие системы пор и каналов должны начинаться в областях межфазной границы жидкок-металлического ядра с нижней мантией, проходить через мантию и земную кору и заканчиваться месторождениями. При этом транспортные пути могут включать в себя каналы субмикроскопических размеров, а также макротрещины — флюидоразрывы [144], через которые транспортируется сплошная углеводородная фаза. Очевидно, что необходимо анализировать карты разного масштаба для выявления «самоподобных», масштабно-инвариантных фрактальных закономерностей [145].

Естественно, что при конкретизации предложенной схемы должна быть отражена генетическая связь новейших смещений земной коры и формирования различных типов скоплений нефти и газа, а также зависимость фазового и химического составов залежей углеводородов от направленности и активности новейших смещений, от интенсивности теплового потока. Материалы глубинного сейсмического зондирования, тектонических исследований свидетельствуют (что не противоречит модели) о расчлененности земной коры на блоки различной формы и размеров вследствие образования вертикальных и паклонных зон разломов и трещиноватости, многие из которых прослеживаются вплоть до верхней мантии.

Аналогично можно рассмотреть и процессы рудообразования. Известно, что они зависят в значительной мере от распределения в земной коре конвективных потоков геотермальных вод и минерального состава пород, через которые осуществляется транспорт вод к зонам рудообразо-

вания. При взаимодействии воды с породами происходит эволюция состава флюида, в том числе изотопного состава кислорода воды. Последнее обстоятельство дает эффективный инструмент для анализа процессов формирования руд. В частности, для конкретных месторождений таким образом были сделаны заключения о характере структуры потоков флюидов на пути к зонам рудообразования, о количестве воды, прошедшей по разнообразным породам за определенные периоды времени, о скорости остывания пород, об особенностях пространственного распределения температуры в зонах рудообразования для различных моментов времени, о последовательности формирования различных участков месторождений [146–148].

В общем случае картину формирования рудных месторождений следует дополнить представлениями о генезисе геотермальных источников, об особенностях взаимодействия вода – порода, определяющего, в частности, скорости фильтрации, микрофильтрации, ультрафильтрации, обратноосмотического проникновения потоков воды в мантию Земли. Обычно подземные воды рассматриваются в единой системе естественного кругооборота воды: испарение с поверхности открытых водоемов – накопление в атмосфере – выпадение в виде осадков – стадии переноса воды, выпавшей на почвы, к подземным хранилищам и далее к открытым водоемам и т. д. В соответствии с уравнением (11) систему кругооборота воды следует расширить, включив в нее источники воды, действующие в области межфазной границы жидкое ядро – нижняя мантия, и системы транспортных каналов в мантии Земли.

Как уже отмечалось, в мантии, неоднородной по составу, структуре, трещиноватости и разломам, может формироваться разветвленная сеть пор и каналов с различными характерными размерами для восходящего переноса воды под действием градиентов внутреннего давления, которая в области земной коры включается в обычную систему кругооборота воды [130, 131]. Топологию таких путей переноса воды от земного ядра можно характеризовать длиной корреляции L_E , соизмеримой по величине с радиусом Земли. Из фрактального характера переноса жидкого флюида через мантию Земли следуют имеющие эвристическую ценность заключения о возможной локализации подземных потоков воды [149] и основных разломов, по которым происходит подпитка водой гидросферы.

Такой анализ, подкрепленный экспериментальным поиском, может оказаться полезным не только для рационального использования и сохранения уже открытых природных богатств, но и для более эффективного поиска новых полезных ископаемых, для выработки общих концепций разумного потребления природных богатств в будущем. Действительно, сами процессы поиска полезных ископаемых и вскрытие найденных месторождений наносят ущерб природе, повреждают экологические ниши. На начальных этапах использования природных богатств эти обстоятельства сказываются в меньшей степени. Так, освоение в настящее время океанских глубин с целью сбора железно-марганцевых конкреций [150, 151] как богатого источника меди, никеля, кобальта и др. металлов не представляет опасности для природной среды. В то же время продолжение интенсивной разработки каменного угля, нефтяных и газовых месторождений ведет к нарушению естественных балансов по твердым, жидким и газовым компонентам в больших по объему подземных резервуарах, что чревато серьезными последствиями, прежде всего, из-за нарушения естественных экологических ниш.

В отношении нефти и газа, а также пресной воды человечество подошло к той грани, когда возникла необходимость сократить добычу этих веществ до воспроизводимых в природных условиях количеств. Тем са-

мым актуальным становится выработка понятия «предельно допустимое потребление» (ПДП) и введение соответствующих нормативов в расчете на воспроизведение данного вещества в природе. Для решения таких задач необходимо адекватно представлять механизмы формирования и «созревания» полезных ископаемых, подходить к пониманию условий инициирования и ускорения этих процессов в природных условиях. Не исключено, что уже сегодня необходимо думать о «закладке» месторождений нефти и газа для потомков, используя для этой цели уже «отработанные» месторождения, но сохранившие всю естественную систему «подземных коммуникаций», включая транспортные системы в мантии Земли. Возможно, что для этого необходимо закачивать в оставшиеся скважины определенные вещества, микроорганизмы, использовать другие методы химических, биохимических и физических воздействий.

3. Земля как термодинамически открытая система

Остановимся еще на одном важном замечании. Если предположить, что процессы образования воды и некоторых химических соединений органической природы из неорганических компонентов продолжаются и в настоящее время, то квазистационарность уровня Мирового океана достигается при существовании определенного потока молекул воды, атомов и ионов кислорода от Земли в космическое пространство. Эти молекулы увлекают за собой другие компоненты атмосферы, в том числе более крупные органические молекулы (мочевина, аминокислоты, нуклеотиды и др.) и кластеры (возможные механизмы «сдува» таких молекул в космос были обсуждены в разделе V.1). Очевидно, что экспериментальное обнаружение таких квазистационарных потоков, если они существуют, позволило бы уточнить некоторые концептуальные представления о круговороте воды и некоторых биологически значимых элементов (N, C, P и др.) в природе, а также модели эволюции экосистем в глобальных масштабах (например, при изучении процессов очищения атмосферы от крупных вулканических выбросов, тем более, что компоненты выбросов могут достигать стратосферы (см. гл. I), при анализе последствий глобальных радиоактивных заражений, сценариев ядерной зимы [152] и т. д.).

Выше подчеркивалось, что направленные потоки молекул воды и других веществ в стратосферу, а затем в космос должны выступать как дополнительный (действующий наряду с кругооборотом веществ, процессами деградации и фотодеградации вредных веществ и т. д.) очищающий атмосферу фактор, поскольку вместе с такими потоками за пределы области притяжения Земли могут выноситься и вредные компоненты.

Для оценки теряемых Землей количеств воды предположим, что за все время существования гидросферы (2 млрд. лет) содержание водорода в ядре Земли уменьшилось на 0,1%, т. е. потери водорода в год составляли $\sim 10^{14}$ г. Тогда средние количества уносимой в космос воды составят $\sim 10^{15}$ г/год (величина потока $\sim 10^{11}$ молекул $\text{H}_2\text{O}/(\text{см}^2 \cdot \text{с})$ при общей массе гидросферы $\sim 1,6 \cdot 10^{24}$ г и массе атмосферы $\sim 0,5 \cdot 10^{22}$ г. Отметим, что средние значения падающего на Землю потока частиц солнечного ветра составляют $\sim 10^{10} - 10^{12}$ частиц/($\text{см}^2 \cdot \text{с}$). Генерация на Солнце сверхскоростных потоков протонов и электронов приводит к возрастанию указанных величин на 2–3 порядка с очевидными следствиями для процесса «сдувания» частиц атмосферы³.

³ Имея в виду экологическую проблематику статьи, укажем на возможную аналогию таких очищающих земную атмосферу кратковременных интенсивных воздействий извне с очищающим действием больших наводнений в Санкт-Петербурге.

При рассмотрении Земли как термодинамически открытой системы, обменивающейся с космосом энергией и веществом, возникает ряд теоретических проблем, требующих модельного обоснования. В частности, необходимо установить механизм генерации дополнительного момента импульса ΔM в системе Земля – атмосфера для компенсации разницы между терявшим ΔM_{out} потоком вещества с Земли в космос и вносящим ΔM_{in} (проникающим из космоса на Землю) веществом – метеорные потоки, компоненты солнечного ветра. Существуют и другие механизмы, «возмущающие» динамическое поведение системы Земля – атмосфера. Один из факторов связан с положением Земли на орбите, поскольку суммарный вектор скорости орбитального движения Земли и скорость движения Солнечной системы в Галактике и Метагалактике изменяются в течение года. Это приводит к сезонным вариациям скорости вращения Земли вокруг своей оси, что обуславливает изменение упругих напряжений в земной коре [153]. Следует также указать на меняющийся характер приливных сил, связанный с непостоянством момента сил лунного и солнечного притяжения, что приводит к колебаниям земной оси (нutation) [153]. Флуктуирующие воздействия на движение Земли оказывают и процессы на Солнце, часть которых характеризуется определенной цикличностью.

Уравнения динамики, описывающие систему Земля – атмосфера, должны учитывать всю совокупность указанных возмущающих внешних факторов и включать слагаемые, отвечающие «источникам» и «стокам» момента импульса, чтобы обеспечивать устойчивый характер движения Земли как термодинамически открытой системы. При этом вся Солнечная система должна рассматриваться как сложная иерархия самоорганизующихся подсистем, насыщенных источниками энергии и обладающих удивительным богатством коллективных процессов [154]. Устойчивые состояния системы Земля – атмосфера реализуются в окрестности локальных минимумов некоторых обобщенных функционалов со стабилизацией суммарного момента импульса Земли и атмосферы вблизи среднего значения. По-видимому, такие локальные минимумы характеризуют совокупное состояние всей Солнечной системы, равно как и «резонансную» стабилизацию Луны, экзотическое «обратное» вращение Венеры [155], кольца в спутниковых системах планет – гигантов [154].

Важно отметить, что момент количества движения Солнца (на долю Солнца приходится около 2% момента количества движения всей Солнечной системы, при около 99,9% общей ее массы), а также моменты количества движения каждой планеты в Солнечной системе как едином целом не остаются неизменными в процессе изменения взаимного расположения Солнца и планет [156]. Центр масс Солнечной системы может смещаться из центральных областей Солнца почти на $2 R_{\odot}$, где R_{\odot} – радиус Солнца, т. е. за пределы Солнца. Поэтому указанная устойчивость состояний Земли и других элементов Солнечной системы может быть частично обусловлена вполне детерминированными (по локализации, по времени включения) внутренними локальными перестройками в каждом из небесных тел, проявляющимися для планет в «планетотрясениях», в локальных перестройках в ионосфере («ионосферотрясениях»), в вулканической деятельности, а для Солнца – в локальных процессах в его приповерхностной области. К последним можно отнести генерацию солнечных пятен, приводящую к необходимой коррекции собственного момента количества движения Солнца и его атмосферы. С этой точки зрения эвристическую ценность могли бы представить численные расчеты вариаций Солнечной активности (относительного числа солнечных пятен – числа Вольфа или «индексов солнечной активности», определяющихся потоком волнового излучения Солнца в радиодиапазонах от метров

до сантиметров, чаще на длине волны 10,7 см [156]) вследствие лишь изменения взаимного расположения Солнца и планет, а также выявление солнечно-планетного вклада в инициирование природных катастроф на нашей планете (вследствие эффектов изменения момента количества движения Земли в Солнечной системе и сил тяготения со стороны других небесных тел).

Следует отметить, что изменения водных режимов больших регионов, в частности, колебания уровней крупных бессточных озер (Каспий, Аral, Балхаш, Чаны), связанные с естественными долгопериодическими вариациями скорости вращения Земли [157], равно как и перемещения тектонических плит в ходе геологической эволюции Земли могут приводить к пространственной перестройке источников и стоков момента импульса, т. е. к изменению локализации областей наивысшей сейсмической и вулканической активности. Возможны одновременные «включения» атмосферных и внутриземных источников и стоков момента импульса, приводящие к крупным природным катастрофам, описываемым с древнейших времен: «... произошло великое землетрясение, и солнце стало мрачно... И звезды небесные пали на землю... и всякая гора и остров двинулись с мест своих» (Откровение Иоанна Богослова: 6, 12–6, 14).

Важно отметить, что внешние воздействия, приводящие к катастрофам, могут носить и антропогенный характер. В качестве инициирующих факторов, вероятно, следует рассматривать крупные ядерные испытания, запуски мощных ракет, резкие изменения гидрологических режимов отдельных регионов, связанные с постройкой больших плотин. Кроме того, бессистемная и расточительная разработка земных ресурсов (воды, полезных ископаемых) приводит к нарушению сложных систем природных гидротермальных и других коммуникаций, определяющих процессы переноса массы (воды, простых неорганических и органических соединений) в земной коре, что необходимо для естественных процессов формирования новых и долговременного существования имеющихся месторождений природных ресурсов. Происходящие перераспределения масс могут оказывать влияние и на геологическую активность отдельных регионов и также инициировать природные катастрофы.

В силу объективной необходимости дальнейшего использования природных ресурсов и расширения объема промышленных и сельскохозяйственных производств человечество вынуждено разрабатывать стратегию своего существования. При этом важное значение приобретает прогнозирование возможных ситуаций (в том числе, природных катастроф) на основе математических моделей, описывающих изменения системы Земля – атмосфера под воздействием стохастических внешних факторов. В будущем можно говорить даже о системе мероприятий, направленных на ослабление нежелательных природных явлений, их частичное регулирование или даже полное исключение – при специальных запусках мощных ракет или при ядерных взрывах в сверхглубоких скважинах.

Для выработки таких подходов необходим адекватный анализ имеющихся и вновь получаемых данных о взаимосвязях [158] явлений антропогенного и неантропогенного характера в ионосфере с сейсмической и вулканической активностью в различных регионах, подкрепленный экспериментальными обоснованиями предложенной концепции – исследованием химических процессов в условиях высоких температур, давлений и деформаций сдвига; изучением процессов массопереноса в верхних слоях атмосферы, и др. Заметим, что непосредственную экспериментальную информацию о сдуваемых с ионосферы в космос массовых потоках, характеризующих дополнительные очистительные возможности атмосферы, можно получить из сопоставительного анализа компонентов солнечного ветра,

падающего на Землю и прошедшего после взаимодействия с атмосферой Земли. Уносимые с Земли в космос потоки вещества несут определенную информацию о нашей планете, поскольку в их состав могут входить фрагменты органических и биоорганических молекул.

Можно думать, что термодинамически открытыми (конечно, в разной степени), «дышащими» в космос [21, 22] являются все планеты с жидкокометаллическими ядрами всех звезд Вселенной. Можно представить себе и исключительные ситуации, — при взрывах «новых» или «сверхновых» звезд — когда вместо «дыхания» происходит гибель соответствующих планетных систем с выбросом содержимого атмосфер планет в космос. Правда, такая участь нашей планете не грозит. Обнаружение в космическом пространстве областей с повышенной концентрацией фрагментов органических молекул может стать указанием на произошедшие катастрофы других миров.

Таким образом, можно говорить о динамическом единстве Земли с окружающим космическим пространством, а это означает, что загадки появления живых организмов на Земле смещаются из чисто земных в космические. Жизнь, возникнув (или будучи созданной) где-либо, могла охватить те области Вселенной, где существовали необходимые условия для ее развития. Мы приходим тем самым к конкретизации общих идей В. И. Вернадского [1] о взаимодействии неорганического вещества планеты и живого вещества на всех пространственно-временных уровнях организации материального мира, о постоянном взаимодействии космического органического вещества с живым веществом на планетах, о широком по масштабам распространении во Вселенной живого вещества, о его космическом значении.

VI. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Усилия химической науки в связи с проблемами экологии традиционно направлены на актуальные разработки ресурсосберегающих и малоотходных технологий, на повышение эффективности систем мониторинга природной среды. В то же время возможности химии и смежных с ней наук в решении экологических задач могут быть расширены. В данном разделе мы остановимся на одном классе пока еще плохо разработанных проблем, экологическая значимость которых, по-видимому, не осознана в полной мере. Речь пойдет об электромагнитных загрязнениях природной среды [88, 159]. Вследствие экспериментальных и теоретических сложностей возникающих задач многие из излагаемых ниже положений еще не оформлены в современной науке как завершенные, и их следует рассматривать как дискуссионные.

В настоящее время спектральная плотность антропогенных источников электромагнитного излучения (ЭМИ) во многих диапазонах частот, прежде всего, в радиодиапазонах, на порядки превышает естественный фон (создается радиоизлучением солнца, планет и других космических источников, явлениями в земной атмосфере и т. д.) и собственный спектральный шум естественных приемников излучения (нативные биологические системы, в том числе мозг и нервная система человека).

В то же время надежно установлены многочисленные эффекты воздействия на биологические системы ЭМИ различных частотных диапазонов, начиная с долей Гц и вплоть до СВЧ (длины волн $\lambda \sim 1-10$ см) и КВЧ ($\lambda \sim 0,1-1$ см) диапазонов. Наряду с терапевтическими и лечебными воздействиями на человека ЭМИ ряда диапазонов [88, 159] обнаружены специфические (нетепловые) негативные эффекты при длительном облучении, вследствие чего были определены предельно допустимые уровни (ПДУ) воздействия ЭМИ. ПДУ облучения радиоволнами на производстве составляют 10 мкВт/см^2 — в СССР, 1 мВт/см^2 — в Канаде, 10 мВт/см^2 — в США

и ряде других стран [159]. Существующие разбросы в установленных нормах (до 3-х порядков по мощности!) указывают на недостаточный уровень сегодняшнего понимания специфики воздействия ЭМИ различных диапазонов на биологические системы, на мозг и нервную систему человека. В тоже время залогом существования цивилизации является выявление всех факторов, влияющих на состояние и функциональную деятельность человека, прежде всего, на функционирование мозга. Не случайно Сенат и Палата представителей Конгресса США объявили десятилетие, начавшееся 1 января 1990 года, «Десятилетием мозга».

Мозг человека, будучи самой неравновесной из систем организма, в наибольшей степени способен к «переключениям» своего состояния («вынужденная бифуркация») под воздействием слабых внешних (световых, звуковых и др.) сигналов. По-видимому, мозг является в высшей степени организованной многопараметрической динамической системой, каждое из состояний которой формируется как когерентная (согласованная) совокупность ансамбля из десяти и более нейронов и характеризуется определенным набором метастабильных уровней. Переходы между такими обобщенными состояниями реализуются через систему перемежаемостей [77] под действием слабых сигналов. О многообразии состояний системы мозга свидетельствует практически «нестирающаяся» и легко вызываемая, в т. ч. в виде зрительных образов, память, проявляющаяся в творческой активности человека, в жизнедеятельности, в сновидениях.

Световые и слуховые рецепторные системы человека, передающие информацию в мозг, как и обонятельные системы биохимической рецепции обладают уникально высокой чувствительностью. Экспериментально показано, что ЭМИ радиодиапазонов также оказывают прямое воздействие на чувствительные сильно неравновесные системы мозга [159]. В биологических системах нет специализированных органов восприятия радиосигналов (в отличие от световых). Поэтому можно думать, что первичные механизмы рецепции радиоволн достаточно неспецифичны и одинаковы для всех биосистем.

Эти воздействия могут реализовываться либо через изменение состояния водной компоненты биосистем, в которой при действии ЭМИ радиодиапазонов может измениться активность свободной, несвязанной воды [49], либо через изменение функционального состояния ионных каналов биологических мембран из-за повышения степени гидратации каналов и потеря вследствие этого избирательности относительно переноса ионов разного сорта [24]. Дальнейшие исследования должны с большей определенностью установить не только первичные механизмы воздействия на человека ЭМИ различных частот, но и системы дальнейшей переработки в мозге несущей такими излучениями информации.

Это тем более актуально, что негативные воздействия на человека могут оказывать не только антропогенные источники ЭМИ, но и значительные флуктуации естественного фона ЭМИ радиодиапазонов. В частности, увеличение солнечной активности при возрастании относительного числа солнечных пятен и вспышек на Солнце, обусловливающих рост интенсивности солнечного ветра и потоков облаков плазмы от Солнца, приводит не только к увеличению интенсивности собственного ЭМИ Солнца в радиодиапазонах (радиоволны типов I–V), но и к генерации магнитосферных бурь и суббурь с сильными вариациями геомагнитного поля при взаимодействии потоков солнечной плазмы с магнитосферой и ионосферой Земли. При этом в магнитосфере Земли возбуждается широкий спектр волн электромагнитной природы: «бури» и «бухты» ($\sim 10^{-5}$ – 10^{-2} Гц); устойчивые и иррегулярные геомагнитные пульсации ($\sim 10^{-2}$ – 10 Гц); атмосферные шумы (~ 1 – 10^2 Гц); низкочастотные излучения ($\sim 10^2$ – 10^4 Гц). Это является следствием разнообразных явлений при магнитосферных бурях и суб-

бурях: турбулентных движений в магнитосферной плазме, развития плазменных неустойчивостей, генерации интенсивных электрических токов в десятки тысяч ампер в ионосфере (на высотах ~ 100 км) и др. [109, 156]. Хорошо известно о негативных влияниях на состояние человека таких магнитных бурь. Хотя солнечная активность отчасти может быть связана с взаимным расположением Солнца и планет (см. раздел V), каждая планета является источником собственного характерного излучения в сверхдлинноволновом радиодиапазоне, генерируемого при взаимодействии солнечного ветра и потоков солнечной плазмы с магнитосферой и атмосферой планеты. Можно думать, что дальнейший прогресс науки о мозге, выявление механизмов рецепции слабых информационных электромагнитных сигналов организмом позволит в большей мере понять все реализующиеся воздействия космоса и окружающей среды на человека.

Сделаем еще одно замечание. История науки показывает, как трудно предугадать истинный ход научного прогресса. Достаточно вспомнить классическое высказывание лорда Кельвина, произнесенное в канун наступления XX века, о двух «облачках» (отрицательный результат опытов Майкельсона, аномалии в спектре поглощения абсолютно черного тела), которые тогда не позволяли в «окончательной форме» сформулировать физическую науку. Теория относительности и квантовая механика были созданы на этой основе. Завершающееся столетие формулирует свои проблемы и загадки. Одно из — «облачков» — для физиков — уже определено: меньшая почти в три раза величина измеряемого потока «солнечных» нейтрин по сравнению с предсказываемой величиной в рамках стандартной модели Солнца. Парадоксальность ситуации состоит в том, что наряду с блестящими астрофизическими открытиями природы многих звездных и квазизвездных объектов, удаленных от Солнца на миллиарды световых лет, процессы в нашей Звезде в полной мере еще не поняты!

Здесь хотелось бы напомнить о двух других больших «облачах» (сформировались за много веков до «облачков» лорда Кельвина), внутренняя сущность которых до сих пор угадывается плохо, причем настолько плохо, что многие естествоиспытатели всерьез их не рассматривают. Речь идет об астрологии как науке о связях состояния и эволюции отдельных живых организмов (в т. ч. человека) и экосистем с взаимным расположением небесных тел, а также о телепатии как науке о процессах передачи информации без специальных сигналов и технических средств (в т. ч. «передачи мысли») на расстоянии с включением организмом собственных систем запоминания и воспроизведения зрительных образов.

Выше мы уже обсудили возможную связь солнечной активности с взаимным расположением Солнца и планет. Хорошо установленное влияние состояния Солнца на функционирование живых систем должно реализовываться прежде всего посредством генерируемых ЭМИ различных радиодиапазонов и низкочастотных переменных магнитных полей. При этом остаются, однако, нерешенными проблемы, как именно указанные радиоизлучения влияют на психику, состояние здоровья человека. Что касается информационных сигналов биообъектов, в т. ч. человека, то если не вводить в рассмотрение новых сущностей (в соответствии с принципом Оккама), в частности, гипотезу о существовании «пока неизвестных биополей» [160], можно допустить, что передача и прием таких сигналов реализуется также на радиочастотах, скорее всего в санти- или дециметровых диапазонах [159]. В настоящее время тепловое радиоизлучение человека (указанных и более длинноволновых — декаметровых, километровых и др. диапазонов), интенсивность которого строго связана с температурой излучающих внутренних органов, эффективно используется для дистанционной диагностики, равно как и равновесное излучение тела в ИК-диапазоне ($\sim 8-14$ мкм) [161]. Последнее характеризуется высокой мощностью.

(~ 10 мВт/см 2), так что мощность излучения всего тела человека в ИК-диапазоне превосходит 100 Вт [162].

Очевидно, что для передачи информационных сигналов мозга человека в радиодиапазонах, как и обеспечения высочайшей чувствительности для приема слабых сигналов необходимо формирование в мозге макроскопических ($\sim 1-10$ см) доменных структур, все нейроны которых функционируют в когерентном режиме. В этом случае мощность передающих сигналов может на порядки превышать равновесный тепловой фон. Принципиальных запретов на реализацию такой «телепатической связи» нет — ни по энергетическим характеристикам, ни по возможной высокоспецифической индивидуальной чувствительности природных систем. Конечно, существуют большие трудности в экспериментальной локации передаваемых мозгом сигналов, что отчасти связано с достаточно случайным характером и практической неконтролируемостью наиболее ярких проявлений спонтанной телепатии. Существуют и принципиальные трудности в понимании механизмов кодирования информации в доменах активной возбудимой среды мозга, трансформации информации в радиоволновые сигналы, рецепции сигналов в принимающих системах и др.

При таких гипотетических подходах к астрологии и телепатии проблемы этих наук приобретают единую сущность и должны решаться на пути выявления механизмов рецепции человеком слабых информационных сигналов различных радиодиапазонов. Развеются ли упомянутые выше «облака» и утвердятся ли астрология и телепатия как естественнонаучные дисциплины или еще долго останутся *terra incognita*, чтобы будоражить воображение впечатлительных исследователей и неисследователей.

Загадки природы всегда существовали и будут существовать. Более того, уровень осознанного незнания увеличивается (по крайней мере, не уменьшается) по мере накопления достоверных знаний, и в этом процессе осознания человеком глубины своего незнания частично реализуется научный прогресс. Но даже безотносительно к обсуждаемым трудностям астрологии и телепатии выявление информационных связей, проявляемых при рецепции живыми организмами ЭМИ радиодиапазонов и низкочастотных переменных магнитных полей, — один из новых и важных ориентиров экологической науки.

Данная статья представляет собой попытку проанализировать многообразие проблем, возникающих при формировании концепции выживания человечества с выбором экологических приоритетов, и преследует цель привлечь внимание химиков, а также специалистов других областей — экологов, медиков, биохимиков, физиков, математиков — к совместному поиску и решению общих и, по-видимому, наиболее важных сегодня для всех проблем спасения нашего дома.

Какое же будущее нас ожидает? «И увидел я новое небо и новую землю; ибо прежнее небо и прежняя земля миновали и моря уже нет» — писал Иоанн Богослов (Откр.: 21,2). Какой новый мир виделся Евангелисту? Весь Новый Завет пронизан идеей многовариантности будущего, понимания мира как субъекта, с которым человечество ведет диалог, и как открытой системы с «открытым будущим» [163]. В мире действуют не только силы разрушения, но и созидания, очищения («конь белый», Откр.: 6,2, 19,11), при этом символом неоднозначности путей развития человека и человечества в целом может служить мера в руке всадника на «коне вороном» (Откр.: 6,5).

Такой взгляд на мир представляется адекватным особенно сейчас, когда широко используются технологии, наносящие непоправимый вред биосфере, когда накоплено ядерное и химическое оружие в количестве, достаточном для полного уничтожения цивилизации. Видения Иоанна Богослова могут оказаться реальностью, что уже показала Чернобыльская ката-

строфа: «... и упала с неба большая звезда, горящая подобно светильнику, и пала на третью часть рек и на источники вод. Имя сей звезде полынь; и третья часть вод сделалась полынью, и многие из людей умерли от вод, потому что они стали горьки.» (Откр. 8,10; 8,11).

Человечество стоит на перекрестке возможных путей и именно от выбора приоритетов (экологических, социальных, идеологических и др.) при разработке стратегии выживания будет зависеть лицо «новой» Земли: либо будет найден и реализован путь конвергенции мировых общественно-политических систем, так что история человечества не прервется, либо цивилизация погибнет и возродится вновь через многие тысячи или миллионы лет (возможно, «без моря»?).

ЛИТЕРАТУРА

1. *Вернадский В. И.* Живое вещество. М.: Наука, 1978. 358 с.
2. *Сукачев В. Н.* // Почвоведение. 1960. № 6. С. 1.
3. *Tansley A. G.* // Ecology. 1935. V. 16. P. 218.
4. *Горшков В. Г.* // Докл. АН СССР. 1988. Т. 301. С. 1015.
5. *Уетткегер Р.* Сообщества и экосистемы. М.: Мир, 1980. 327 с.
6. *Абакумов В. А.* // Научные основы мониторинга пресноводных экосистем: Тр. сов.-франц. симпозиума. Астрахань 1988. Л.: Гидрометеиздат, 1988. С. 6.
7. *Матрос Ю. Ш., Носков А. С.* // Успехи химии. 1990. Т. 59. С. 1700.
8. *Ласкорин Б. Н., Лукьяненко В. И.* // Вестн. АН СССР. 1990. № 10. С. 14.
9. *Криволуккий Д. А., Тихомиров Ф. А., Федоров В. А. и др.* Действие ионизирующей радиации на биогеоценоз / Под ред. М. С. Гилярова и Р. М. Алексахина. М.: Наука, 1988. 240 с.
10. *Кудельский А. В.* // Вестн. АН СССР. 1990. № 12. С. 59.
11. *Красовский В. И., Семенов А. И., Соболев В. Г., Шефов Н. Н.* // Геомагнетизм и аэрономия. 1989. Т. 29. С. 689.
12. *Подмошенский И. В., Александров В. Я., Саль С. А.* // Там же. 1989. Т. 29. С. 876.
13. *Федоров Л. А., Мясоедов Б. Ф.* // Успехи химии. 1990. Т. 59. № 11. С. 1818.
14. *Молин Ю. Н.* // Там же. 1990. Т. 59. № 10. С. 1585.
15. *Алимов А. Ф.* // Экология. 1989. № 6. С. 4.
16. Mathematical Ecology. An Introduction / Eds T. G. Hallen and S. A. Levin. Biomathematics, 17 Berlin; New York: Springer Verlag, 1986.
17. Ecosystem theory and application / Ed. N. Polunin. Chichester (G. Brit.): Wiley, 1986.
18. *Fenchel T.* Ecology of protozoa: The biology of free-living phagotropic protists. Madison (Wis.): Science. Tech. Publ. Berlin etc.: Springer, 1987. 197 p.
19. Ecological Modelling. Subject. Index. V. 25–30. 1990. V. 50. P. 231.
20. *Пригожин И., Стенгерс И.* Порядок из хаоса. М.: Прогресс, 1986. 431 с.
21. *Lovelock J. E.* A New Look at Life and Earth. N. Y.: Oxford University Press, 1987.
22. *Lonsdale H.* // J. Membrane Sci. 1990. V. 50. P. 1.
23. *Хванг С.-Т., Коммермейер К.* Мембранные процессы разделения / Пер. с англ.; Под ред. Ю. И. Дытнерского. М.: Химия, 1981. 464 с.
24. *Timashev S. F.* Physical Chemistry of Membrane Processes. N. Y. etc.: Ellis Horwood, 1991. 246 p.
25. *Израэль Ю. А., Ровинский Ф. Я., Черханов Ю. П.* // Мониторинг фонового загрязнения природных сред / Под ред. Ю. А. Израэля. Л.: Гидрометиздат, 1984. С. 3.
26. *Малахов С. Г., Махонько Э. П.* // Успехи химии. 1990. Т. 59. С. 1778.
27. *Линник П. Н.* // Гидрохимические материалы. 1989. Т. 106. С. 78.
28. *Юргов Е. В., Королева М. Ю.* // Успехи химии. 1991. Т. 60. С. 2422.
29. *Дягилев С. А., Шубин В. Н.* // Радиобиология. 1989. Т. 29. С. 605.
30. *Кузьмина Л. Г., Бурцева О. Ю., Дворцова Н. В. и др.* // Координац. химия. 1990. Т. 16. С. 70.
31. *Кузьмина Л. Г., Дворцова Н. В., Бурцева О. Ю. и др.* // Металлоорган. химия. 1990. Т. 3. С. 364.
32. Успехи химии. 1991. Т. 60. № 3.
33. *Гершензон Ю. М., Пурмаль А. П.* // Успехи химии. 1990. Т. 59. С. 1729.
34. *Пененко В. В., Скубневская Г. И.* // Там же. 1990. Т. 59. С. 1757.
35. *Исмагилов З. Р., Керженцев М. А., Сушарина Т. Л.* // Там же. 1990. Т. 59. С. 1676.
36. *Timashev S. F.* // Intern. Symposium on Membranes for Gas and Vapour Separation: Prepr. Suzdal. USSR, 1989. P. 18.

37. Timashev S. F., Kirichenko V. I., Bobrova L. P., Bondarenko A. G. // Ibid. P. 75.
38. Timashev S. F., Vorobjev A. V., Kirichenko V. I. et al. // J. Membrane Sci. 1991. V. 59. P. 117.
39. Успехи химии. 1988. Т. 57. № 6.
40. Журн. Всесоюз. хим. о-ва им Д. И. Менделеева. 1987. Т. 32. № 6.
41. Петрянов И. В., Сутугин А. Г. Бездесущие аэрозоли М.: Знание, 1990.
42. Петрянов И. В., Кощеев В. С., Басманов П. И. и др. Лепесток (легкие респираторы). М.: Наука, 1984. 216 с.
43. Святцов А. А., Абылгазиев Т. Ж. // Успехи химии. 1991. Т. 60. С. 2463.
44. Кирш Ю. Э. Экологическая химия водной среды: Матер. II Всесоюз. шк. Ереван. Москва: ИХФ АН СССР, 1988. С. 294.
45. Классен В. И. // Докл. АН СССР. 1968. Т. 183. С. 1123.
46. Михельсон М. Л. // Коллоид. журн. 1983. Т. 45. С. 352.
47. Lin I. J., Votrat J. // J. Magnetism and Magnetic Materials. 1990. V. 83. P. 525.
48. Herzog R. E., Shi Oihong, Patil J. N., Katz J. L. // Langmuir. The ACS Journal of Surfaces and Colloids. 1989. V. 5. P. 861.
49. Тимашев С. Ф. // Журн. физ. химии. 1990. Т. 59. С. 1142.
50. Proceedings of the 3rd Int. Meeting of Chem. Sensors. Cleveland. Ohio. US. 1990.
51. Krull U. J. // Chem. Techn. 1990. P. 372.
52. Scheller F., Schubert F., Pfeiffer D. et al. // Analyst. 1989. V. 114. P. 653.
53. Myasnikov I. A., Gutman E. E. // Proc. 2nd Int. Meeting. on Chem. Sensors. Bordeaux. France. 1986. P. 243.
54. Takano M., Bando Y., Sakai M. et al. // Ibid. P. 263.
55. Sutherland R. M., Dahne C. // Biosensors: Fundamentals and Application / Eds. A. P. F. Turner, I. Karube, G. S. Wilson. Oxford: Univ. Press, 1989. P. 655.
56. Turner A. P. F. // Sensors and Actuators. 1989. V. 17. P. 433.
57. Силин В. И., Кудис Ю. Ю., Жижин Г. Н. // Биофизика. 1990. Т. 35. С. 58.
58. Koouman R. P. H., Kolkman A., Van Gent J., Creve J. // Anal. Acta. 1988. V. 213. P. 35.
59. Belli S. L., Rechnitz G. A. // Anal. Lett. 1986. V. 19. P. 403.
60. Stieve H. // Sensors and Actuators. 1983. V. 4. P. 689.
61. Badwall S. P. S., Ciacchi F. T., Haylock J. W. // J. Appl. Electrochem. 1988. V. 18. P. 232.
62. Kimura J., Murakami T., Kurlyama T. // Sensors and Actuators. 1988. V. 15. P. 435.
63. Van der Schoot B. H., Van der Viekert H. H., de Rooij N. F. // Proc. 3rd Int. Meet. Chem. Sensors. Cleveland. Ohio. USA. 1990. P. 58.
64. Heiland G., Kohl D. // Chem. Sensors Technol. 1988. V. 1. P. 15.
65. Kohl D. // Sensors and Actuators. 1989. V. 18. P. 71.
66. Vadgama P. // Ibid. 1990. V. B1. P. 1.
67. Yamanchi S. // Proc. 3rd Int. Meet. Chem. Sensors. Cleveland. Ohio. USA, 1990. P. 13.
68. Whelan P. T., Borbridge W. E. // J. Appl. Electrochem. 1988. V. 18. P. 188.
69. Максимычев А. В., Тимашев С. Ф. // Журн. аналит. химии. 1990. Т. 45. № 7. С. 1456.
70. Itoh Y., Kan T. // Proc. 3rd Int. Meet. Chem. Sensors. Cleveland. Ohio. USA, 1990. P. 62.
71. Бурлацкий С. Ф., Ошанин Г. С., Тимашев С. Ф. // Хим. физика. 1990. Т. 9. С. 1283.
72. Ливов Ю. М., Ерохин В. В., Зайцев С. Ю. // Биол. мембранны. 1990. Т. 7. С. 917.
73. Ерохин В. В., Фейгин Л. А. // Там же. 1990. Т. 10. С. 1065.
74. Aizawa M., Owaku K., Matsuzawa M. et al. // Thin Solid Films. 1989. V. 180. P. 227.
75. Owaku K., Shinohara H., Ikariyama Y., Aizawa M. // Ibid. 1989. V. 180. P. 61.
76. Бигон М., Харнер Дж., Таунсенд К. Экология. Особи, популяции и сообщества. М.: Мир, 1989. Т. 1. 667 с.; Т. 2. 477 с.
77. Шустер Г. Детерминированный хаос. М.: Мир, 1988. 240 с.
78. Allen J. C. // Ecological Modelling. 1990. V. 51. P. 281.
79. Gatto M., Muratori S., Rinaldi S. // Ibid. 1988. V. 42. P. 155.
80. Smale S. // J. Mathematical Biol. 1976. V. 3. P. 5.
81. Patten B. C. // Ecological Modelling. 1985. V. 28. P. 1.
82. Herendeen R. A. // Ibid. 1988. V. 42. P. 75.
83. Kreikenbohm R., Bohl E. // Ibid. 1988. V. 43. P. 287.
84. Paterson S., Mackay D. // Ibid. 1989. V. 47. P. 85.
85. Matthies M., Brüggemann R., Münen B. et al. // Ibid. 1989. V. 47. P. 115.
86. Riley M. J., Stefan H. G. // Ibid. 1988. V. 43. P. 155.
87. Азев Е. П., Вершубский А. В. // Теор. основы хим. технологии. 1989. Т. 23. С. 600; 1988. Т. 22. С. 183.
88. Механизмы биологического действия электромагнитных излучений. Пущино: НЦ биол. исслед., 1987. 202 с.
89. Roux I. C., Rossi A., Bachelast S., Vidal C. // Physica. 1981. V. 2D. P. 395.

90. *Timashov S. F., Krykin M. A.* // *Phys. Status Solidi.* 1976. V. 76. P. 67.
91. *Овчинников А. А., Тимашев С. Ф., Белый А. А.* Кинетика диффузионно-контролируемых химических процессов. М.: Химия, 1986. 287 с.
92. *Лифшиц Е. М., Питаевский Л. П.* Физическая кинетика. М.: Наука, 1979. 528 с.
93. *Планка Э.* Эволюционная экология / Пер. с англ. Под ред. М. С. Гиллярова. М.: Мир, 1981. 399 с.
94. *Straskraba M., Gnauck A. H.* Freshwater Ecosystems. Modelling and Simulation. Amsterdam etc.: Elsevier, 1989. 309 p.
95. *Подлоски Дж.* Геофизическая гидродинамика. М.: Мир, 1984. Т. 2. 409 с.
96. *Исаев Г. В.* // Докл. АН СССР. 1990. Т. 310. С. 461.
97. *Азбел И. Я., Толстикин И. Н.* // Геохимия. 1989. № 9. С. 1219.
98. *Подмошенский И. В., Александров В. Я., Салль С. А.* // Геомагнетизм и аэрономия. 1989. Т. 29. С. 876.
99. *Власов М. Н., Зиновьев К. Л., Тулинов Г. Ф.* // Там же. Т. 29. С. 141.
100. *Фогл Б.* // Термосферная циркуляция / Под ред. У. Узбба. М.: Мир, 1975. С. 100.
101. *Чунчузов Е. П.* // Геомагнетизм и аэрономия. 1989. Т. 29. С. 641.
102. *Соболев В. Г.* // Там же. 1989. Т. 29. С. 143.
103. *Пудовкин М. И., Семенов В. С.* Теория пересоединения и взаимодействие солнечного ветра с магнитосферой Земли. М.: Наука, 1985. 128 с.
104. *Альвен Х.* Космическая плазма. М.: Мир, 1983. 216 с.
105. *Усаров В. М., Барашков П. Д.* // Геомагнетизм и аэрономия. 1989. Т. 29. С. 621.
106. *Всехсвятская Н. С., Евстратова Е. А., Калинин Ю. К., Романчук А. А.* // Там же. 1989. Т. 29. № 4. С. 691.
107. *Липеровский В. А., Пудовкин М. И.* Аномальное сопротивление и двойные слои в магнитосферной плазме М.: Наука, 1983. 181 с.
108. *Заславский Г. М., Сагдеев Р. З.* Введение в нелинейную физику. М.: Наука. 1988. 368 с.
109. *Мизун Ю. Г.* Полярные сияния. М.: Наука. 1983. 135 с.
110. *Каминер Н. С., Кузьмичева А. Е., Мамырина М. Е.* // Геомагнетизм и аэрономия. 1990. Т. 30. № 6. С. 884.
111. *Руднева Н. М., Свидский П. М., Оль Г. И.* // Там же. 1990. Т. 30. № 3. С. 376.
112. *Мустель Э. Р.* // Астрономический журнал. 1980. Т. 57. С. 225.
113. *Гринин В. П., Соболев В. В.* // Астрофизика. 1989. Т. 31. С. 527.
114. *Debrunner H., Flückiger E., Chupp E. L., Forrest D. I.* // Proc. 18th Int. Cosmic Ray Conference. 1983. V. 4. P. 75.
115. *Lockwood I. A.* // Proc. 20th Int. Cosmic Ray Conference. 1987. V. 3. P. 17.
116. *Филиппов А. Т., Басалаев М. Л., Руднев Ю. Ф. и др.* // Геомагнетизм и аэрономия. 1990. Т. 30. С. 381.
117. *Благовещенская Н. Ф., Выставной В. М., Шумилов И. А. и др.* // Там же. 1990. Т. 30. С. 512.
118. *Бойко Г. Н.* // Там же. 1990. Т. 30. С. 520.
119. *Агафонов Ю. Н., Бажанов В. С., Исякаев В. Я. и др.* // Письма в ЖЭТФ. 1990. Т. 52. С. 1127.
120. *Данилов В. И.* // Биофизика. 1990. Т. 35. С. 985.
121. *Зельдович Я. Б., Рузмайкин А. А.* // Успехи физ. наук. 1987. Т. 152. С. 263.
122. *Долгинов А. З.* // Там же. С. 231.
123. *Никитина Л. В., Рузмайкин А. А.* // Геомагнетизм и аэрономия. 1990. Т. 30. С. 127.
124. *Рузмайкин А. А., Соколов Д. Д., Шукров А. М.* // Там же. 1990. Т. 29. С. 1001.
125. *Соэ R. S., Prevot M.* // Earth Planet Sci. Lett. 1989. V. 92. P. 292.
126. *Озима М., Зашу Ш.* // 27-й Межд. геол. конгресс. Геохимия и космохимия: М.: Наука. 1984. Т. 11. С. 87.
127. *Головин А. А., Рабинович Л. М.* // Теоретические основы химической технологии. 1990. Т. 24. № 5. С. 592.
128. *Giltman P. A.* // Physics of the Sun. Ed. P. A. Sturrock, T. E. Holzer, D. M. Mihalas, R. K. Ulrich. V. 1. D. Reidel Publishing Company. Dordrecht – Boston – Lancaster – Tokyo. 1986. P. 95–160.
129. *Сливинский Е. В., Войцеховский Ю. П.* // Успехи химии. 1989. Т. 58. С. 94.
130. *Кропоткин П. Н., Валеев Б. М.* // 27-й Межд. геол. конгресс. Месторождения нефти и газа: М.: Наука. 1984. Т. 13. С. 173.
131. *Голд Т.* // Там же. С. 197.
132. *Соколовский В. Д., Юрьева Т. М., Матрос Ю. Ш. и др.* // Успехи химии. 1989. Т. 58. С. 5.
133. *Синев Ю. М.* // Там же. 1989. Т. 58. С. 38.
134. *Исаев Я. И., Миначев Х. М.* // Нефтехимия. 1990. Т. 30. № 3. С. 291.
135. *Advances in Organic Geochemistry: Proc. 14th Int. Meeting. on Organic Geochemistry* / Eds Durand B., Behar. F. Paris, 1989. Pt. 1. Organic Geochemistry in Petroleum Exploration.
136. *Хант Дж.* Геохимия и геология нефти и газа. М.: Мир, 1982. 702 с.
137. *Tucco B., Вельте Д.* Образование и распространение нефти. М.: Мир, 1981. 501 с.

138. Трофимчук А. А. и др// 27-й Международный геол. конгресс «Месторождения нефти и газа»: Тез. докл. М.: Наука, 1984. Т. 13. С. 84.
139. Галимов Э. М. // Геохимия. 1989. № 2. С. 163.
140. Петров А. А., Арефьев О. А.// Там же. 1990. № 5. С. 704.
141. Высоцкий С. И., Высоцкий В. И.// Геология нефти и газа. 1990. № 5. С. 2.
142. Аммосов С. М., Войтов Г. И., Коробейник Г. С. и др// Докл. АН СССР. 1990. Т. 315. № 2. С. 332.
143. Пущаровский Ю. М., Казанский В. И., Губерман Д. М., Кузнецов О. Л. // Вест. АН СССР. 1990. № 11. С. 49.
144. Галимов Э. М., Кодина Л. А., Власова Л. Н., Кузнецова Л. В.// Геохимия. 1989. № 8. С. 1101.
145. Неймарк А. В. // Журн. эксперим. и теорет. физики. 1989. Т. 96. № 4(10). С. 1386.
146. Спасенных М. Ю., Банникова Л. А.// Геохимия. 1986. № 10. С. 1386.
147. Спасенные М. Ю., Банникова Л. А.// Изотопная геохимия процесса рудообразования. М.: Наука, 1988. С. 21.
148. Богданов Ю. В., Берлянд-Кожевников П. В., Розинова Е. Л., Симороз Н. П.// Докл. АН СССР. 1990. Т. 315. С. 438.
149. Brown D. M., Lloyd J. W., Jacobson G.// Austral. J. Earth. Sci. 1990. V. 37. P. 245.
150. Савенок В. С., Черебнichenko А. П., Никулин В. В., Астафурова С. А.// Докл. АН СССР. 1990. Т. 315. С. 474.
151. Корж В. Д.// Океанология. 1990. Т. 30. С. 406.
152. Харгулл М., Хатчинсон Т. Последствия ядерной войны. Воздействие на экологию и сельское хозяйство. М.: Мир, 1988. 551 с.
153. Алексеев В. А.// Геохимия. 1990. № 4. С. 599.
154. Горьковый Н. Н., Фридман А. М.// Успехи физических наук. 1990. Т. 160. С. 169.
155. Хентов А. А.// Астрономический журнал. 1989. Т. 66. № 1. С. 202.
156. Мизун Ю. Г. Процессы в геосфере. М.: Знание. 1988. 64 с.
157. Котляр П. Е., Кузнецов В. В.// Геология и геофизика. 1990. № 4. С. 118.
158. Ольховатов А. Ю.// Известия АН СССР. Физика Земли. 1990. № 12. С. 101.
159. Холлодов Ю. А. Мозг в электромагнитных полях. М.: Наука. 1982. 121 с.
160. Мигдал А. Е., Нетесова Е. В.// Кибернетика живого. Биология и информация. М.: Наука. 1984. С. 73.
161. Троицкий В. С.// Там же. С. 131.
162. Гулагов Ю. В., Годик Э. Э.// Там же. С. 111.
163. Moltmann J.// Entwürfe der Theologie / J. B. Baur (Hg.). Graz. Wien. Köln, 1985. S. 235.

Научно-исследовательский физико-химический институт
им. Л. Я. Карпова, Москва