

ДОКЛАДЫ ЛАУРЕАТОВ БОЛЬШОЙ ЗОЛОТОЙ МЕДАЛИ
ИМЕНИ М.В. ЛОМОНОСОВА РАН 2018 ГОДА

БИОФИЗИКА – ЭКОЛОГИИ

© 2019 г. И.И. Гительзон

Институт биофизики Сибирского отделения РАН, Красноярск, Россия

E-mail: gitelson@ibp.ru

Доклад поступил в редакцию 16.07.2019 г.

Поступил после доработки 28.07.2019 г.

Принят к публикации 06.08.2019 г.

В докладе представлены некоторые новые методические возможности, которые может предложить биофизика для решения фундаментальной задачи планетарной экологии – расшифровки механизма, поддерживающего равновесное состояние биосферы. В Институте биофизики СО РАН, где работает автор доклада, развиваются два взаимодополняющих направления в экологической биофизике: первое – мониторинг оптическими методами жизнедеятельности природных и сконструированных экосистем на примере биолюминесценции моря и замкнутых экосистем; второе – исследование закономерностей параметрического управления биосинтезом и создание биотехнических систем управления этими процессами для конструирования ноосфероподобных экосистем, в частности, для жизнеобеспечения людей в экстремальных условиях на Земле и в космосе.

Ключевые слова: биофизика, биотехнология, биосинтез, биополимеры, биолюминесценция, биолюминесцентный анализ, водородный биосинтез, ноосфера, жизнеобеспечение, замкнутая экосистема.

DOI: <https://doi.org/10.31857/S0869-587389121185-1197>

На берегу Енисея, великой сибирской реки, расположен Красноярск, где прошла почти вся моя сознательная жизнь. Так сложилось, что на протяжении десятилетий удалось поработать на кораблях науки в четырёх океанах, повидать нашу маленькую планету, побывать во многих странах и каждый раз возвращаться в свой город на Енисее, где в незапамятно далёком 1946 г. довелось стать студентом Красноярского медицинского института. Как не похож нынешний с замахом на столичность Красноярск на тот, казалось, придавленный к земле 50-градусными холодами рекордно суровой зимы, скрытый в морозно-дымной мгле город!

Невозможно представить себе современный Красноярск без Академгородка, Научного ака-

демического центра с его институтами и дендрарием, без прекрасно выстроенного кампуса Сибирского федерального университета, без ведущей к нему улицы академика Киренского. Мне вспоминается Красноярск начала 1950-х годов, когда ничего из перечисленного не было и отмечая разительные перемены, убеждаешься в силе человеческого разума, направленного на созидание. Инициатором формирования в Красноярске центра академической науки и университетского образования был Леонид Васильевич Киренский. Мне посчастливилось быть его учеником и помощником в ту пору. Его роль в истории Красноярска, во всей интеллектуальной жизни города и края столь велика, что его по праву можно назвать красноярским Ломоносовым.

Предмет классической биофизики – низшие уровни органической жизни: от молекулярного до организменного со всеми промежуточными ступенями. Биофизику организменного уровня иногда называют биофизикой сложных систем, подразумевая, что это высшие по уровню организации живые системы. Но в процессе эволюции возникли ещё более сложные формы организации жизни – состоящие из множества особей. К таким формам относятся колониальные организмы, популяции и экосистемы вплоть до биосферы, объединяющей всю жизнь на планете. Для изу-



ГИТЕЛЬЗОН Иосиф Исаевич – академик РАН, советник РАН, главный научный сотрудник ИБФ СО РАН.

чения этого уровня организации жизни биофизика пока не сформировала сплошного фронта, но отдельными успешными десантами уже вторгается в эту область. Как говорил великий физиолог И.П. Павлов, "наука движется толчками в зависимости от успехов, делаемых методикой".

Задача моего доклада — рассказать о некоторых новых методических возможностях, которые может предложить биофизика для решения фундаментальной задачи планетарной экологии — расшифровки механизма, поддерживающего равновесное состояние биосферы, и о наших работах в этом направлении.

В Институте биофизики СО РАН (ИБФ) развиваются два взаимозависимые направления экологической биофизики: одно — мониторинг оптическими методами жизнедеятельности природных и сконструированных экосистем на примере биолюминесценции моря и замкнутых экосистем жизнеобеспечения человека, другое исследование закономерностей параметрического управления биосинтезом в популяциях и экосистемах и создание биотехнических систем управления этими процессами для конструирования экосистем, в частности, для жизнеобеспечения людей в экстремальных условиях на Земле и в космосе. При всём различии объектов в основе обоих направлений лежит один подход — использование для анализа состояния живых организмов изменений в состоянии окружающей среды, которые вызывает их жизнедеятельность. Оба направления предполагают разработку и использование физических методов мониторинга для анализа как природных, так и конструируемых экосистем и управления ими. Эти методы реализуются нашей академической школой, поддержанной президентским грантом и мегагрантами в Сибирском федеральном университете (СФУ). Математическое моделирование свойств природных и конструируемых экосистем, обобщающее оба традиционных для института направления, развивает школа академика А.Г. Дегерменджи, поддержанная грантами РФФИ и РНФ.

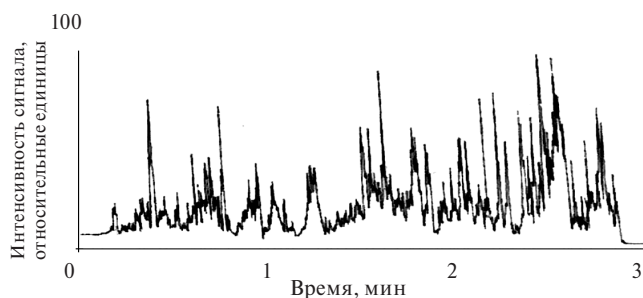


Рис. 1. Море полно света

Регистрация биолюминесцентром световых вспышек за 3 мин.

ИССЛЕДОВАНИЕ БИОЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ

Объектом первого направления наших работ по экологической биофизике стало исследование биолюминесценции — способности многих видов организмов излучать видимый свет в результате ферментативных реакций при окислении специфических субстратов — люцифериннов — специфическими ферментами люциферазами. "Море светится — море живёт", — говорил выдающийся океанолог член-корреспондент АН СССР В.Г. Богоров, которому в немалой степени принадлежит заслуга возрождения династии "Витязей" — славных кораблей российской науки. Свечение моря иногда выходит на поверхность, причём бывает таким ярким, что его видят даже из космоса. Явление это эпизодическое, но если погрузить светочувствительный прибор в толщу морской воды, то свечение разной интенсивности фиксируется им постоянно. На рисунке 1 представлен результат регистрации возбуждённого импульсного биолюминесцентного свечения всего за 3 мин. на глубине 55 м. Море действительно полно света [1].

Этот холодный свет ещё в древности удивлял наблюдавших его отсутствием привычной связи света с теплом. О свечении моря упоминали Аристотель и Плиний Старший, но научное его изучение началось лишь в XVII в. с работы Р. Бойля (1668), показавшего необходимость присутствия воздуха (как мы теперь понимаем, кислорода) для свечения. Веком позже К. Бенке (1768), участник экспедиции Дж. Кука на паруснике "Индевор", обнаружил, что источником света в море служат мелкие животные — медузы и рачки. Существенный вклад в понимание природы биолюминесценции внёс Ч. Дарвин во время кругосветного путешествия на корабле "Бигль" (1831—1836). Из его дневника: «...Перед носом корабля вздымались две волны как бы из жидкого фосфора, а за ним тянулся млечный след. Кругом, на сколько было видно, светился гребень каждой волны, а на горизонте воздух, отражая блеск этих синеватых огней, не был так тёмным, как отдалённый небесный свод... Чем далее мы продвигались к югу, тем реже нам встречалась эта фосфоричность. Это обстоятельство находится, вероятно, в тесной связи с малым количеством организмов в этой части океана» [2, с. 142, 143].

На протяжении XIX и первой половины XX в. был собран огромный материал по систематике, экологии и функциям биолюминесценции (он обобщён в монографии Е. Харвея [3]), но только во второй половине XX в. прогресс инструментальных методов биоорганической химии и биофизики позволил приступить к расшифровке молекулярного механизма этого явления.

К настоящему времени выяснен молекулярный механизм не более 15 видов биоломинесцентных систем, но в природе их разнообразие, по-видимому, значительно больше.

Биоломинесцентные системы организмов разных видов оказались настолько отличными друг от друга, что об их независимом, полифилитическом происхождении можно говорить с уверенностью. По-видимому, способность излучать свет оказалась выигрышной в борьбе за выживание, и эволюция неоднократно развивала её на разной химической основе. Однако все уже исследованные системы используют для излучения энергию окисления специфических субстратов, получивших общее название *люциферины*, специфическими ферментами люциферазами, оксидазами по функции. Их химическая структура различна, но всех объединяет замечательное свойство: при их работе энергия почти идеально (до 90%) защищена от диссипации в тепло и выделяется излучением в виде кванта света. Некоторые из систем, например у кишечнополостных, усложнены вторичными излучателями: энергия возбужденного состояния безызлучательно переходит на эмиттер, который и излучает. Таков знаменитый зелёный флуоресцентный белок (GFP – Green Fluorescent Protein) светящейся медузы *Aequorea*, оказавшийся чрезвычайно удобным универсальным биохимическим маркером. За его открытие и разработку методов использования Осаму Шимомура, Мартин Чалфи и Роджер Тсиен были удостоены Нобелевской премии по химии 2008 г.

Доктор О. Шимомура в 2013–2016 гг. руководил работой по мегагранту в СФУ. Созданная под его руководством лаборатория в Красноярске продолжает изучение функциональных закономерностей биоломинесценции, а именной грант, финансируемый за счёт его личных средств, используется для ежегодного поощрения выполненных студентами и аспирантами университета лучших работ в этой области биофизики. С благодарностью вспоминаю многие годы дружбы и сотрудничества с этим светлым человеком.

Способность излучать свет присуща многим видам преимущественно морских организмов – от бактерий до рыб. Вклад биоломинесценции в оптическое поле океана бывает измерим даже на фоне света астрономического происхождения, а на километровых глубинах излучение живых организмов – единственный источник света, за исключением редких событий, вызываемых черенковским излучением при поглощении нейтрино водой. Фотоны солнечного света никогда не проникают на эти глубины, там царит абсолютная тьма, разрываемая лишь вспышками "живого света".

На предположение, что измерение люминесценции может стать высокоинформативным

источником знания о жизни экосистем моря на различных глубинах, нас натолкнули опубликованные в 1950-х годах работы Д. Кларка [4], Е. Кампы и Б. Бодена [5], измерявших подводную освещённость погружаемыми фотометрами. На плавных кривых снижения освещённости с глубиной видны короткие миллисекундные подьёмы, очевидно, вызываемые биоломинесцентными вспышками. Частота вспышек оправдывала надежду на их высокую информативность, что побудило нас попытаться создать аппаратуру для измерения биоломинесценции *in situ* – в толще морской воды. Особенности явления: слабость на фоне астрономического света, импульсность, зависимость от возбудителя заставили разработать специализированную конструкцию биоломинометров, существенно отличную от обычных батифотометров, предназначенных для измерения подводной освещённости, хотя по инерции мы долгое время и свои новые приборы называли в печати батифотометрами. Развитие океанологического направления экологической биофизики в ИБФ началось с создания в лаборатории фотобиологии под руководством доктора биологических наук Л.А. Левина и доктора технических наук А.П. Шевырнова комплекса аппаратуры для измерения биоломинесценции. Для разных задач сконструировано

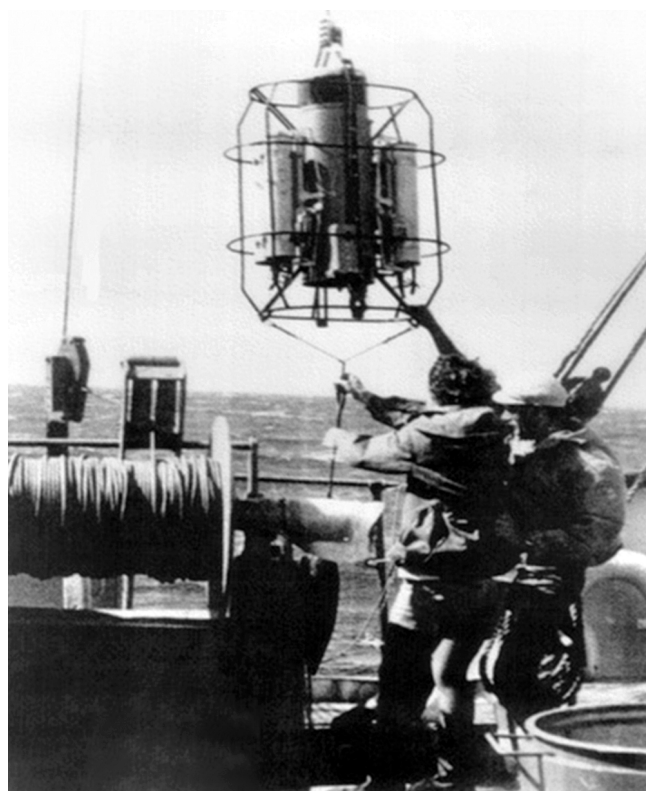


Рис. 2. Спуск за борт прибора "Ромашка" – зондирующего аппаратного комплекса для прицельного отбора в режиме реального времени планктонных и гидрхимических проб по показаниям биоломинометра



Рис. 3. Экспедиционное судно "Витязь" Института океанологии Академии наук

несколько вариантов погружаемых биолюминометров, измеряющих биолюминесценцию *in situ* в толще морской воды [6]. Были изготовлены:

- зондирующий биолюминометр для определения вертикального распределения биолюминесценции;
- факсимильный биолюминометр, позволивший регистрировать формы импульсов живых излучателей *in situ* без их поимки и извлечения на борт судна;
- маршрутный проточный биолюминометр для измерения горизонтального распределения биолюминесценции на ходу судна;
- автономный глубоководный биолюминометр для измерения биолюминесценции до максимальных глубин океана;
- комплекс "Ромашка", позволяющий прицельно, безынерционно отбирать пробы батометрами

на разных глубинах по показаниям зондирующего биолюминометра для исследования структуры и динамики морских планктонных экосистем пелагиали (рис. 2).

С этим комплексом аппаратуры сотрудники ИБФ многократно участвовали в совместных с сотрудниками Института океанологии РАН экспедициях на судах Академии наук, гидрографии и рыбного хозяйства, в том числе и на корабле "Витязь"¹ (рис. 3).

В результате экспедиционных работ в четырёх океанах и окраинных морях выявлены следующие закономерности биолюминесценции моря [6]:

- биолюминесценция встречается повсеместно – её сигналы зарегистрированы от Северного полюса до тропических широт Тихого, Атлантического, Индийского океанов и до прибрежных вод Антарктиды, от подповерхностных до абиссальных глубин;
- биолюминесценция угасает только в водах с солёностью ниже 11‰, в водах, содержащих сероводород (например, во всём Чёрном море на глубинах более 80 м биолюминесценция отсутствует полностью), а также при дефиците растворённого кислорода (например, в некоторых районах Персидского залива);

¹ Отслуживший свой срок славный корабль науки "Витязь" (его имя запечатлено на фронте Института океанографии в Монако) благодаря усилиям энтузиастов из Калининграда в 1992–1994 гг. отремонтирован, в настоящее время это главный экспонат Музея Мирового океана. Правда, остаётся сожалеть, что вопреки мнению учёных, корабль не был поставлен на якорь в Санкт-Петербурге, откуда и вышла династия исследовательских судов с названием "Витязь".

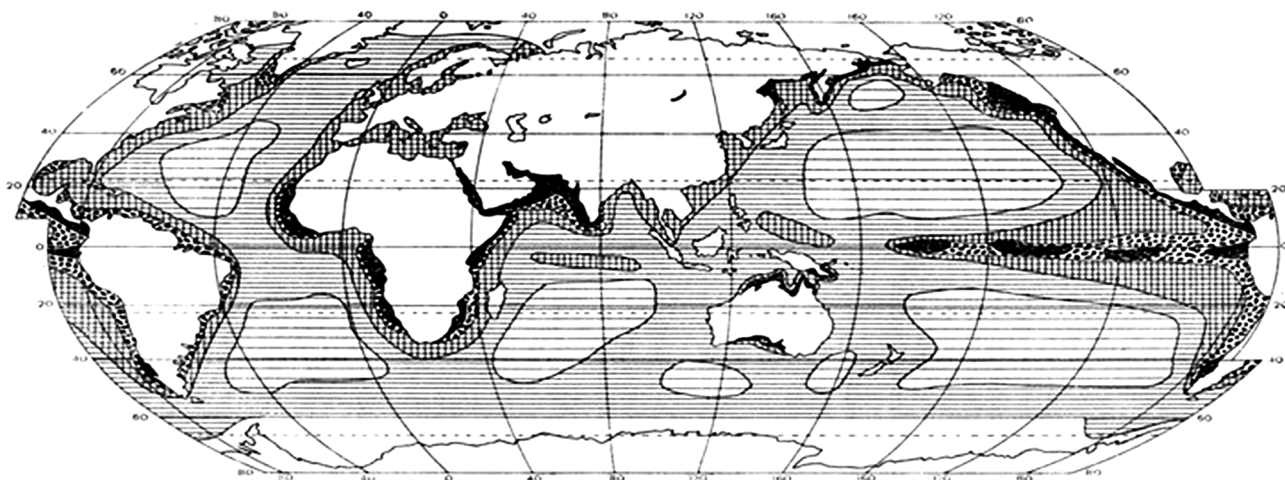


Рис. 4. Первый эскиз биолюминесцентного поля Мирового океана по данным экспедиций Института физики (биофизики) СО РАН на судах Института океанологии РАН

Плотность закрашки соответствует интенсивности биолюминесцентного свечения

- основной вклад в свечение моря вносят одноклеточные простейшие животные – жгутиковые и радиолярии, эпизодически регистрируется излучение бактерий и мелких ракообразных [7];
- распределение интенсивности биолюминесценции отражает вертикальную стратификацию планктонного сообщества в момент измерения;
- биолюминесценция моря обладает выраженным суточным ритмом, который определяется сочетанием двух факторов: эндогенным суточным ритмом у одних видов и вертикальной миграцией у других. Живой свет репрессируется астрономическим светом, но никогда до нуля, и достигает максимума в тёмное время суток;
- горизонтальное распределение биолюминесценции неоднородно, оно проявляется "облачностью" с характерными размерами от сотен метров до километров в зависимости от трофности вод;
- большинство биолюминесцентных излучателей светит короткими импульсами миллисекундной продолжительности.

По результатам сотен выполненных дрейфовых станций и маршрутным измерениям осуществлено первое картирование Мирового океана по биолюминесценции, нуждающееся в дальнейших уточнениях (рис. 4); описаны типы вертикального распределения биолюминесценции, которое чётко стратифицировано и сосредоточено в основном в фотическом слое вод от поверхности до критической максимальной глубины для фотосинтеза 80–150 м.

Особенность биолюминесцентного поля океана состоит в том, что оно не проявляется в виде постоянного свечения, но "потенцировано" в форме химической энергии, запасённой в излучающих

органоидах живых организмов, способных к биолюминесценции. У большинства видов импульс светоизлучения возникает только в ответ на внешнее раздражение. Очевидно, что это специфическое явление, присущее морским экосистемам, заслуживает дальнейшего изучения как одна из фундаментальных особенностей биологии моря. Как маркер морских экосистем она применима в морском рыбном хозяйстве, во флоте. Особенно привлекательна возможность его использования для безынерционного слежения за антропогенным воздействием на морские экосистемы. Патрулирование уязвимых в этом отношении акваторий может быть организовано сравнительно легко и малозатратно путём размещения маршрутных биолюминометров на патрулирующих судах, объединённых космической связью. Важно отметить, что стоимость такой системы пренебрежимо мала в сравнении с доходами от эксплуатации морских ресурсов, а получаемая информация могла бы быть весьма полезна для их сбережения.

К сожалению, деятельность самого большого в мировой океанологии научного флота Академии наук была парализована в 1990-е годы. В этих обстоятельствах основное развитие в ИБФ получили лабораторные исследования биолюминесценции – изучение её молекулярного механизма и разработка биолюминесцентных методов для аналитических применений в медицине, экологии, биотехнологии. Морскими экспедициями ИБФ собраны культуры светящихся бактерий, составившие, вероятно, самую большую в мире их коллекцию [8, 9]. Собраны образцы морских излучателей, позволяющие продолжить в лаборатории изучение молекулярных механизмов биолюминесценции.

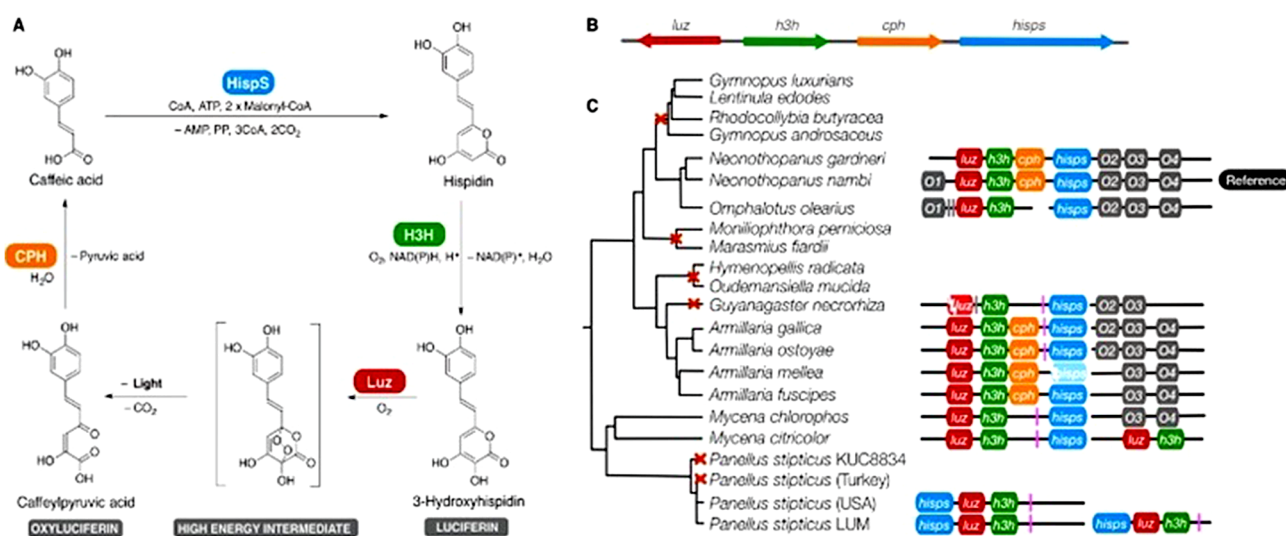


Рис. 5. Кластер генов, кодирующих ферменты цикла кофейной кислоты – биохимического каскада, отвечающего за свечение грибов

Источники: [10, 11]

Из известных на сегодня 15 молекулярных механизмов биолюминесцентных систем разных видов три расшифрованы учёными ИБФ в лаборатории фотобиологии (заведущий — кандидат биологических наук Е.С. Высоцкий) и лаборатории нанобиотехнологии и биолюминесценции (заведующий — доктор биологических наук В.С. Бондарь) в сотрудничестве с Институтом биоорганической химии им. академиков М.М. Шемякина и Ю.А. Овчинникова РАН (отдел академика РАН С.А. Лукьянова, лаборатория доктора химических наук И.В. Ямпольского). При участии групп из Испании и Бразилии удалось расшифровать молекулярные механизмы свечения грибов (рис. 5) [10–12]. Кандидаты биологических наук В.Н. Петушков и Н.С. Родионова (лаборатория фотобиологии ИБФ) многие годы отдали изучению свечения сибирских почвенных олигохет и были вознаграждены открытием совершенно различных молекулярных механизмов биолюминесценции у двух близких родов этих кольчатых червей.

Работы по расшифровке молекулярных и генетических механизмов биолюминесценции приобрели большое значение в связи с исключительно широкими перспективами их использования для создания новых методов в аналитике. Возможность присоединять биолюминесцентный маркер практически к любой биохимической системе и к геному в пробирке или в организме открыла пути для визуализации этих систем и измерения функционирования с точностью и чувствительностью, присущими физическим методам.

Поле новых методических возможностей для изучения жизни моря открывает зондирование толщи морских вод биолюминометрами. Упомянем лишь некоторые из них. Вертикальная стратификация биолюминесценции чётко коррелирует с гидрохимическими и гидробиологическими параметрами образцов воды, захваченных батометрами "Ромашки" при прицеле её по показаниям биолюминометра, которые видит оператор на экране монитора в лаборатории на борту судна. Регистрация биолюминесценции глубоководным прибором подтверждает возможность исследовать жизнь на абиссальных глубинах без помех, вносимых орудиями лова или присутствием человека. Пойманные животные попадают к исследователю мёртвыми, "взорванными" разностью давлений в сотни атмосфер между абиссалью и поверхностью океана. Погружение человека на эти глубины требует создания сложных дорогостоящих аппаратов, оно кратковременно и небезопасно. Альтернативную возможность открывает сочетание биолюминометра с телевизионной камерой, управляемой биолюминесцентными сигналами.

Исследователь при этом не ограничен временем, он может находиться в лаборатории на борту судна или на суше в своём кабинете в тысячах миль от моря, изучая жизнь в его глубинах.

Непрерывное зондирование биолюминометром с борта дрейфующего судна помогло выявить микроструктуру полей планктона, позволило измерять их "облачность" — неоднородность, размеры которой зависят от трофности вод. Вероятно, сама возможность выживания планктона в ультраолиготрофных водах при почти нулевой концентрации биогенных элементов обеспечила преимущество жизни в облаке для фито- и зоопланктеров.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ЗАМКНУТЫЕ ЭКОСИСТЕМЫ

В ходе разработки методов параметрического управления биосинтезом и создания замкнутых экосистем [13, 14] получен фундаментальный результат: определены генетические пределы скорости биосинтеза и редупликации клеток у ряда видов одноклеточных организмов при устранении внешнего лимитирования. Для гетеротрофных бактерий *Photobacterium sp.* они составляют десятки минут [15]; для хемоаутоотрофных бактерий *Hydrogenomonas sp.* 2–3 часа; для фотосинтезирующих одноклеточных водорослей *Chlorella vulgaris* и *Spirulina sp.* 5–10 часов. Достижение таких высоких скоростей биосинтеза стимулировало развитие работ по созданию биотехнологических реакторов, в которых скорости роста популяций близки к генетически предельным и сохраняются сколь угодно долго на постоянном уровне при поддержании параметров среды в не лимитирующем диапазоне за счёт их автоматической коррекции. Такой культиватор автоматически управляет через обратную связь коррекцией питательной среды в зависимости от скорости роста популяции, которая отслеживается непрерывно по изменению физических параметров среды, например, по оптической плотности. Исключительно надёжна защищённость проточной культуры от повреждения и гибели неотвратимо действующим в ней механизмом дарвиновской селекции по скорости роста. Это свойство использовано при создании замкнутых экосистем.

Высочайшие скорости непрерывного роста микроорганизмов стимулировали развитие этих работ в прикладном направлении. Интенсивная культура фотосинтезирующих микроводорослей, изучаемая в ИБФ, показала, что всего 2–3 кг живой биомассы хлореллы в непрерывной культуре при оптимальных для фотосинтеза условиях достаточно для устойчивого постоянного производства O_2 и потребления CO_2 в количествах,

Таблица 1. От БИОС-1 к БИОС-3

Год	Установка	Длительность эксперимента, сутки	Число членов экипажа	Рабочий объём, м ²	Звено-регенератор	Биологическая регенерация компонентов среды, % регенерации для экипажа
1964	БИОС-1	1	1	12	Водоросли	CO ₂ – 100
1966	БИОС-1	45	1	12	Водоросли	O ₂ – 100 H ₂ O – 100
1968	БИОС-2	30	1	20,5	Водоросли, высшие растения, запас воздуха	O ₂ – 100 H ₂ O – 100, пища – 7 (хлеб)
1969, 1970	БИОС-2	30	1	20,5	Водоросли, высшие растения (пшеница)	O ₂ – 100 H ₂ O – 100, пища – 4 (хлеб)
1969, 1970	БИОС-2	90	1	20,5	Водоросли, высшие растения (овощи)	O ₂ – 100 H ₂ O – 100, пища – 8,2 (овощи)
1972, 1973	БИОС-3	180	3	237	Высшие растения, высшие растения + водоросли	O ₂ – 100 H ₂ O – 100, пища – 12–30 (хлеб, овощи)
1977	БИОС-3	120	3 и 2	237	Высшие растения, сжигание растительных отходов	O ₂ – 100 H ₂ O – 100, пища – 48 (растения – 61)
1983, 1984	БИОС-3	120	2	315	Высшие растения, сжигание растительных отходов	O ₂ – 100 H ₂ O – 100, пища – 77,5 (всё)

обеспечивающих дыхательные потребности одного человека. Перспективность этих работ для космических систем жизнеобеспечения была быстро замечена и оценена академиком С. П. Королёвым – "Главным конструктором", как он безымянно именовался в прессе в ту пору всеобщей секретности. При его решающей финансовой поддержке и при интенсивной работе в Институте физики СО АН СССР, а позднее в Институте биофизики Сибирского отделения Академии наук² за несколько лет последовательно были созданы полномасштабные экспериментальные системы жизнеобеспечения человека: БИОС-1 с замкнутым кругооборотом атмосферы, БИОС-2 с кругооборотом атмосферы и воды и, наконец, БИОС-3 (табл. 1) (конструктор – доктор биологических наук Б.Г. Ковров), который действует по настоящее время (рис. 6) [16, 17].

Уникальная особенность БИОСа-3 в том, что управление всеми процессами осуществляется изнутри обитающим в БИОСе экипажем испытателей из трёх человек. Люди – управляющее и метаболическое звено замкнутой экосистемы.

² Институт биофизики был основан в 1981 г. на базе отдела биофизики, функционировавшего в составе Института физики им. академика Л.В. Киренского СО АН СССР.

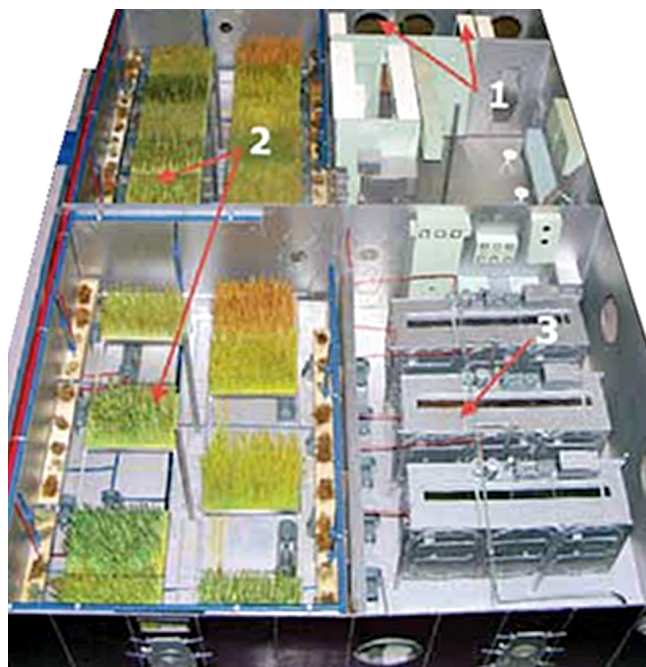


Рис. 6. Макет БИОС-3

1 – жилая часть: три кабины для экипажа, санитарно-гигиенический модуль, кухня-столовая; 2 – фитотрон с высшими растениями: два с площадями посева 20 м² в каждом; 3 – водорослевый культиватор: три фитобиореактора объёмом 20 л каждый для выращивания *Chlorella vulgaris*

Таблица 2. Результаты, полученные в БИОС-3

Площадь	102 м ²
Объём	315 м ³
Общая продолжительность экспериментов	≈ 2 года
Наибольшая непрерывная продолжительность	6 месяцев
Площадь фитотрона в расчёте на одного человека	30 м ²
Регенерация атмосферы	100%
Регенерация воды	до 100%
Регенерация растительной части рациона испытателей	80–100%
Поглощение CO ₂	100%
Переработка жидких выделений человека (круговорот компонентов без NaCl)	100%
Переработка обезвоженных твёрдых выделений человека	0%
Оценка трудозатрат экипажа на управление системой (чел/час/день)	7
Расчётная замкнутость круговорота	80–95%

Они питаются в основном плодами растений, выращиваемых ими внутри системы, а их выделения поглощаются этими растениями. Такой управляемый человеком круговорот веществ в замкнутой экосистеме служит минимизированной моделью биосферы Земли по свойству замкнутости. Но поскольку он управляется разумом обитающих в нём людей, то в этом смысле БИОС-3 представляет собой первую реально осуществлённую модель не только биосферы, а ноосферы Вернадского, то есть биосферы, управляемой разумом.

Доктором биологических наук Г.М. Лисовским в проводившихся в ИБФ СО РАН опытах с пшеницей и другими сельскохозяйственными растениями было показано, что при устранении внешних лимитирующих факторов их урожайность не уступает продуктивности микроводорослей [18]. Это позволило выйти из тупика в развитии замкнутых экосистем из-за несъедобности биомассы водорослей. Таким образом, была открыта возможность дальнейшего повышения замкнутости экосистем: к круговороту атмосферы и воды в БИОС-3 впервые добавился круговорот растительной пищи, что сразу подняло замкнутость выше 85%.

Продуктивность пшеницы, выращиваемой при непрерывном освещении без почвы в субирригационной конвейерной культуре, такова, что 30 м² площади, занятой растениями, обеспечивают потребности одного человека в кислороде, воде

и растительной пище (табл. 2). По сути, это ответ биотехнологии на извечный вопрос: сколько земли человеку надо? Только животный белок и липиды добавляются в БИОС извне, что определяет остаточную незамкнутость экосистемы.

Полученные в опытах результаты послужили основанием для конструирования БИОСа-3 (см. рис. 6) и подтверждены экспериментами в нём. Экипажи из трёх испытателей обитали в БИОСе-3 почти два года при максимальной длительности непрерывного эксперимента 180 дней. Интегральный показатель динамически равновесного состояния замкнутой экологической системы с человеком — это концентрация кислорода, CO₂ и других газов в атмосфере кабины. На протяжении всего опыта они сохранялись на приемлемом уровне: кислород — не менее 21%, CO₂ — не более 1%. Состояние здоровья испытателей контролировалось многосторонними обследованиями в ходе опыта, и за длительные время после его завершения не было обнаружено значимых изменений [19]³.

Перед ИБФ в настоящее время стоит стратегический вопрос: как наиболее эффективно и быстро использовать фундаментальные и практические результаты работ, полученных в БИОСе?

Сегодня наблюдается определённое снижение международного интереса к созданию обитаемых постоянных лунных и других баз, где подобные БИОСу системы жизнеобеспечения будут востребованы. Расчёт показывает, что использование круговоротных систем жизнеобеспечения становится оправданным при отрыве от земной биосферы более чем на 1–2 года. В США, насколько нам известно, NASA почти приостановило работы по биологическим системам жизнеобеспечения. Японское агентство по авионавтике и развитию космических исследований также не сообщает о новых работах. Поддерживается на минимальном уровне европейская программа "Melissa", в которой ИБФ принимает участие. На этом фоне выделяется Китай, где создана биологическая система жизнеобеспечения "Moon Palace". Китайские исследователи идут по российским следам, начав с перевода и издания в Китае нашей монографии "Manmade Closed Ecological Systems" (2003). Идут быстро, используя государственное финансирование, превосходящее российское многократно. А что же мы? Полагаем, финансирование программы Института биофизики при минимальной поддержке со стороны Европейского космического агентства откроет возможность осуществлять экспериментальную работу

³ Результаты работ по БИОСу опубликованы в десятках статей в российской и зарубежной научной печати и двух монографиях [13, 14], они вызвали живой профессиональный интерес и признание лидерства в решении проблемы.

по системам жизнеобеспечения и реализовать в институте проект БИОС-4, или МикроБИОС (его масштаб предполагает удовлетворение 1/30 потребности одного человека). Отмечу, что в нынешних стеснённых финансовых условиях лаборатория доктора биологических наук А.А. Тихомирова ухитряется успешно развивать звено деструкции – процессы деградации тупиковых продуктов для их возвращения в замкнутый круговорот в БИОСе [20].

Если в обозримом будущем ситуация с финансированием БИОСа не будет улучшена радикально, наша страна неизбежно потеряет лидерство и в этой научной области, из немногих оставшихся, где оно ещё бесспорно. Нет сомнения, что китайские исследователи скоро догонят нас. Сумеют ли перегнать? Это вопрос не только финансовой, но и интеллектуальной мощи.

Но есть и земная область, в которой актуально использование элементов разработанной технологии жизнеобеспечения, – это обитание в экстремальных условиях, в пустынях, на альпийских высотах, под землёй и водой. Для нашей страны в первую очередь актуально радикально улучшить условия жизни людей на Севере – в арктических широтах. В ИБФ с использованием элементов технологий БИОСа предложен проект северного энергоавтономного экожиля. Совместно с Сибирским федеральным университетом этот проект может быть осуществлён при заинтересованной поддержке потребителей. Совместно с Якутским научным центром СО РАН планируется строительство экспериментального дома в арктической части Якутии.

Фундаментальная проблема дальнейшего развития обитаемых замкнутых систем – повышение их замкнутости до теоретически возможного предела, по-видимому, близкого к 99%. Поскольку проблемы регенерации атмосферы, воды и растительной пищи можно считать решёнными, для повышения степени замкнутости остаётся задача производства внутри системы веществ, которые человек получает с животными пищевыми продуктами. Но введение составляющих животноводства в замкнутую экологическую систему неприемлемо по ряду технологических, технических и даже этических ограничений. Отказ от животных продуктов, перевод человека на вегетарианский рацион также неприемлем, несмотря на наличие одиночных примеров полного вегетарианства. Экосистема жизнеобеспечения человека должна быть направлена на оптимальное, а не на компромиссное, за счёт человека, обеспечение его пищевых потребностей. При отказе от продуктов животноводства продуцентами всех потребных человеку продуктов должны стать растения и хемисинтезирующие микроорганизмы.

Видны два способа управления направленно-стью биосинтеза, которые могут быть использованы для этой цели.

1. Параметрическим управлением даже без изменения генотипа можно глубоко перенаправлять биосинтез. Например, у водородных бактерий и микроводорослей доминирующий синтез протеинов можно в фенотипе перенаправить более чем на 80% на синтез других полимеров, управляя лишь параметрами внешней среды.

2. Успехи молекулярной биологии последних лет открыли возможность направленного глубокого изменения генотипа, его редактирования. Общество с настороженностью встречает это новшество, но за ним будущее. В генетической модификации хемобиосинтетиков предвидится эффективный инструмент биотехнологического производства многих необходимых человечеству биологических продуктов с большими экономическими и экологическими преимуществами в сравнении с современными агрополевыми способами их получения.

Замкнутая экосистема – это удобная ниша, в которой использование генетически модифицированных растений не должно встретить возражений в силу её замкнутости. Здесь сочетание генетического и параметрического управления биосинтезом может обеспечить синтез полного спектра всех необходимых человеку пищевых веществ растениями, грибами и микроорганизмами без использования животных. Может быть, окажется осуществимым культивирование одноклеточных животных, использующих симбиотические водоросли. Это задачи следующего этапа проекта БИОС. Воспроизводство полного рациона питания человека без использования сельскохозяйственных животных – цель проекта БИОС-5 – полнозамкнутой экологической системы жизнеобеспечения человека. Не следует упускать из виду, что значение его предполагаемого результата далеко превосходит первоначальную задачу. Результат может стать значительным вкладом в преодоление голода и в первую очередь дефицита потребления животного белка, от чего сегодня страдает значительная часть человечества.

Использование только первого звена трофической цепи – фотосинтеза растений и хемосинтеза водородными бактериями – при переходе человечества к автотрофному жизнеобеспечению сокращает пищевую цепь с большим выигрышем в энергетической эффективности со всеми положительными социальными последствиями, предсказанными В.И. Вернадским. Это дело не близкого будущего, однако создание экспериментальной замкнутой системы автотрофного жизнеобеспечения космического назначения может стать убедительной демонстрацией возможностей перехода

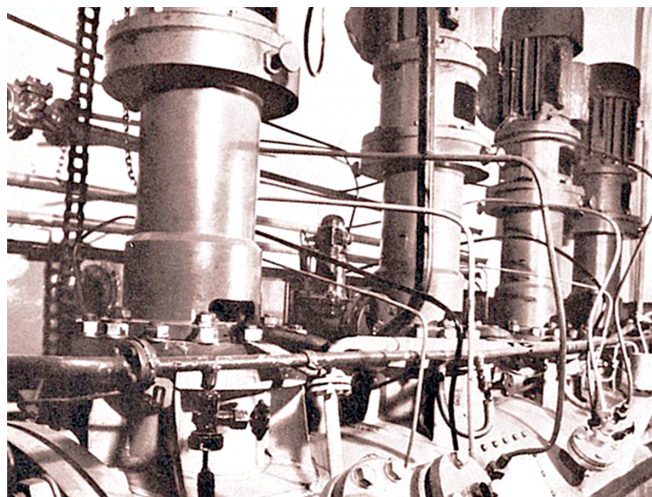


Рис. 7. Пилотный культиватор для биосинтеза белковой биомассы водородными бактериями (Институт биофизики СО РАН)

к этому более разумному хозяйствованию человека в земной биосфере [21, 22]. Более строгую математическую форму идее Вернадского о ноосфере придал позже академик Н.Н. Моисеев [23].

Сочетание водородного биосинтеза с применением солнечной энергии для получения водорода электролизом воды представляется исключительно привлекательным новым путём использования солнечной энергии в синтезе белков, липидов, многих иных биологически значимых веществ, минуя фотосинтез. Два основных фактора обеспечивают преимущества этого нового пути: он экологически нейтрален, так как не требует привлечения никакого иного источника энергии, кроме Солнца, и, помимо бактериальной биомассы, производит только воду, а коэффициент использования солнечного излучения этим путём через хемобиосинтез превосходит кратно КПД использования солнечной энергии в фотосинтезе. Если этот процесс будет реализован в промышленных масштабах, то для человечества впервые откроется возможность превзойти предел эффективности биосинтеза, поставленный эволюцией для фотосинтеза.

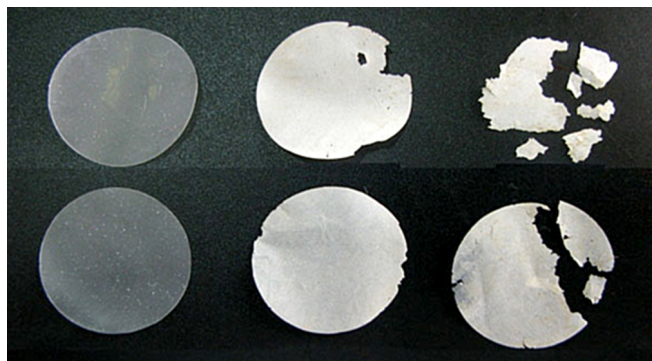


Рис. 8. Разрушение таблетированного биопластика в море

В Институте физики СО АН СССР (в настоящее время — Институт физики им. Л.В. Киренского СО РАН) работа с водородными бактериями началась в 1960-е годы. По моей просьбе Г.А. Заварзин, впоследствии известный микробиолог, академик, любезно передал в отдел биофизики свой штамм водородных бактерий Z1. На наших установках по параметрическому управлению биосинтезом было реализовано непрерывное высокопродуктивное культивирование водородных бактерий (рис. 7). Создана также установка полузаводского масштаба по выращиванию водородоокисляющих бактерий на электролизном водороде (руководитель — доктор физико-математических наук Ф.Я. Сидько) [24]. В многочисленных опытах на животных показана эффективность полученной биомассы в качестве источника кормового белка. К сожалению, с развалом в нашей стране микробиологической промышленности в 1990-е годы эта работа лишилась адресации и была вынужденно остановлена. Значимость и возможности биотехнологического производства белка весьма высоки, ими обосновывается целесообразность возрождения этих работ.

Другое направление хемоавтотрофного синтеза развивается доктором биологических наук Т.Г. Воловой в ИБФ и СФУ [25]. Её работа, получившая государственную поддержку в виде двух мегагрантов, сосредоточена на хемоавтотрофном синтезе биополимеров, в частности, полиоксиалканоатов, которые по физическим свойствам подобны химическим пластикам, но, в отличие от них, биодegradуемы, то есть разрушаются до CO_2 и H_2O микробами в природных средах (рис. 8). Это открывает перспективу выхода из экологического тупика, созданного ежегодным производством многих миллионов тонн почти не разрушаемых в природе химических пластиков. Они стали одним из основных, глобального масштаба загрязнителей природной среды — суши и океана.

Перспективы применения биополимеров исключительно широки: медицина, биотехнология, агротехнология, многие отрасли промышленности, бытовые нужды [25], что обосновывает целесообразность открытия на базе ведущихся работ в Красноярском научном центре Института биотехнологии. К осуществлению такого проекта необходимо привлечь средства промышленности, для которой создание в стране производства биополимеров исключительно перспективно, так как мировые потребности в них быстро растут и в будущем будут составлять миллионы тонн, хотя сегодня их выпуск ограничивается десятками, в лучшем случае сотнями тонн. На этом ещё не занятом конкурентами поле создания, в частности в Красноярске, больших производств биополимеров, основанных на проводимых Ин-

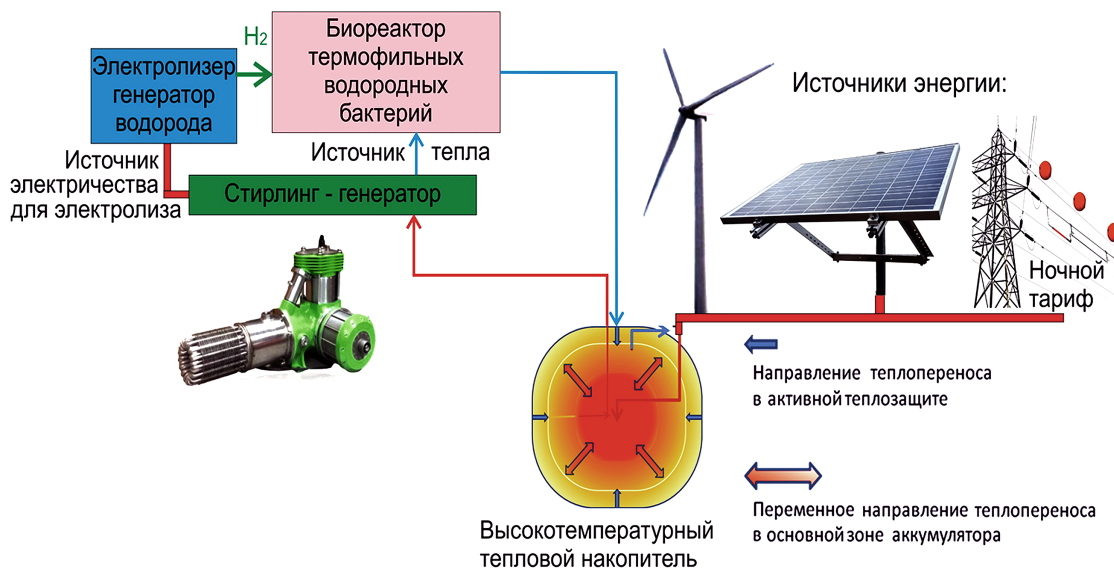


Рис. 9. Проект комплекса мегабиосайнс "Телиоводородный биосинтез"
 Автор схемы – инженер В.М. Подлесный (ИБФ)

ститутом биофизики работах по водородному биосинтезу, весьма перспективно для российской промышленности. Следует добавить, что строительство биотехнологического корпуса ИБФ предусматривалось ещё в 1980-е годы соответствующим постановлением ЦК КПСС и Совета министров СССР, но было остановлено к 1990-м годам. Завершение строительства корпуса и развитие биотехнологических работ Красноярского научного центра и Сибирского федерального университета обеспечат научную базу для промышленного производства биопластиков на основе водородного биосинтеза.

Имея многолетний опыт исследований в этой области, ИБФ готовит для представления Академии наук проект разработки технологии солнечно-водородного биосинтеза. Его принципиальная схема представлена на рисунке 9. Можно утверждать, что по значимости достигнутых результатов и перспективности он заслуживает масштаба биологического "мега сайнс проекта", хотя не требует таких мегавложений средств, как в физические проекты. Успеть бы увидеть академический Институт биотехнологии в Красноярске действующим инструментом реализации этого проекта!

Объединяющее наш научный коллектив представление о многостороннем будущем науки о биосфере и её актуальных уже сегодня приложениях⁴ даёт рисунок 10.

⁴ В качестве примера упомяну любопытную историю открытия погонофор, населяющих оазисы жизни на дне океана вокруг чёрных курильщиков. (И они, и связанные с ними очаги независимой от солнечного света хемоавтотрофной жизни

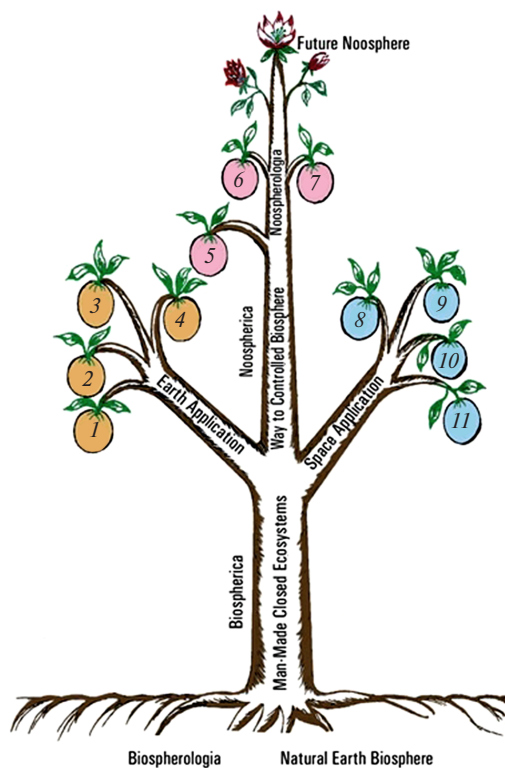


Рис. 10. Древо познания биосферы–ноосферы. Перспектива роста и плодоношения на благо человечества (вольное художественное представление)

1 – технология замкнутых экосистем, 2 – агротехнология для пустынь, 3 – регенерация атмосферы, 4 – жизнеобеспечение человека в Арктике и Антарктике, 5 – дистантный мониторинг биосферных процессов, 6 – моделирование биосферы, 7 – моделирование ноосферы, 8 – обитаемые орбитальные станции, 9 – жизнеобеспечение полётов в Солнечной системе, 10 – лунная база, 11 – марсианская база

Рисунок В.Г. Леоновой

* * *

Хотелось бы на оптимистической ноте закончить рассказ о том, что удалось сделать за 70 лет непрерывной работы, но не покидают беспокоящие мысли о будущем Академии наук, её Сибирского отделения, Научного центра в Красноярске и, конечно, Института биофизики после печально известного реформирования Академии в 2013 г.

Абсолютное неприятие вызывает ныне популярное среди чиновничества определение роли Российской академии наук как учреждения, оказывающего научные "услуги". Услуги оказывает слуга, то есть пассивный исполнитель чужой воли — заказчика услуг. Функция же Академии наук в обществе и государстве уникальна — она источник нового знания, добываемого не по заказу, а по собственной инициативе и внутренней логике. Новое знание — главный двигатель эволюции человеческого общества. Добывание знания и есть главная функция академии. В числе её других важнейших функций — выращивание прикладной науки на почве новых фундаментальных результатов, а также участие в научном образовании новых поколений учёных и просвещение общества в целом. Дополнительная функция — экспертная. Но если академия не работает на переднем крае науки, не добывает новые знания, то и авторитетным экспертом она быть не сможет. А действовать в полную силу она не в состоянии потому, что оторвана реформой 2013 г. от своих институтов — инструментов экспериментальной работы.

Как убедительно показал опыт постреформенных пяти лет, менеджерское управление наукой не-

на дне океанов — пожалуй, самое поразительное открытие океанологов, сделанное сравнительно недавно, в середине XX в.) Погонофоры — это обитатели океанических глубин, теснящиеся вокруг чёрных курильщиков — гидротермальных источников горячих вод, обогащённых восстановленными соединениями: водородом, сероводородом, метаном и др. Погонофоры озадачили открывших их зоологов отсутствием пищеварительной системы. Как оказалось, они живут за счёт внутриклеточного питания бактериальными симбионтами, культивируемыми у погонофор в щупальцевидных отростках, которые они протягивают к горячим струям, извергаемым курильщиками. Эти бактерии оказались хемоавтотрофами, к ним относятся и водородокисляющие бактерии. По-видимому, это древнейшие формы жизни, возникшие и развившиеся в океанских бессолёчных глубинах задолго до появления фотосинтеза и выхода жизни к свету, к солнцу, а затем и на сушу. Таким образом, хемо-водородный биосинтез, который предстоит сделать новым многообещающим инструментом биотехнологии, был изобретён эволюцией за миллиарды лет до нас и, по-видимому, до другой, более поздней находки эволюции — фотосинтеза, который открыл путь к использованию солнечной энергии для жизни на Земле. В гелио-водородном биосинтезе открывается перспектива объединить потенциалы этих двух путей.

эффективно ни для науки, ни для страны, заинтересованной в её результатах. Готовится новый Закон о науке и новый закон об Академии наук. Это вселяет надежду, что к приближающемуся 300-летию Российская академия наук придёт в своём естественном полном составе, включающем академическое общество и учреждённые ею институты "как первенствующее учёное сословие России" (устав академии 1836 г.). Замечательно, что этот статус науки в обществе, а стало быть, Академии наук, с прозрением гения и исчерпывающей лаконичностью тремя столетиями ранее сформулировал М.В. Ломоносов: "*Науки благороднейшими человеческими упражнениями справедливо почитаются и не терпят порабощения*". Сказано ещё в XVIII веке!

ЛИТЕРАТУРА

1. Гительзон И.И. Отчёт о работе отряда биолуминесценции в 38-м рейсе экспедиционного судна "Витязь" // Архив Института океанологии АН СССР, 1966.
2. Дарвин Ч. Дневник изысканий по естественной истории и геологии стран, посещённых во время кругосветного плавания корабля её величества "Бигль" под командой капитана Королевского флота Фиц Роя. М.-Л.: Биомедгиз, 1935.
3. Harvey E.N. Bioluminescence. N.Y.: Acad. Press, 1952.
4. Clark G.L., Backus R.H. Measurements of light penetration in relation to vertical migration and records of luminescence in deep-sea animals // Deep-sea Res. 1956. V. 4. P. 1-14.
5. Kampa E.M., Boden B.P. Light generation in a sonic-scattering layer // Deep-sea Res. 1957. V. 4. № 2. P. 73-92.
6. Гительзон И.И., Левин Л.А., Утюшев Р.Н. и др. Биолуминесценция в океане. СПб.: Гидрометеоздат, 1992.
7. Hastings J.W. Bioluminescence in marine dinoflagellates // Natl. Biophys. Conf. 1959. V. 1. P. 427-434.
8. Родичева Э.К., Выдрякова Г.А., Медведева С.Е. Каталог светящихся бактерий. Новосибирск: Наука, 1997.
9. Гительзон И.И. Светящиеся бактерии. М.: Наука, 1975.
10. Kotlobay A.A. et al. Genetically encodable bioluminescent system from fungi // Proc. Natl. Acad. Sci. USA. 2018. V. 115(50). P. 12728-12732.
11. Purtov K.V., Petushkov V.N., Baranov M.S. et al. The Chemical Basis of Fungal Bioluminescence // Angew. Chem. Int. Engl. 2015. V. 54(28). P. 8124-8128.
12. Kaskova Z. M., Dörr F.A., Petushkov V.N. et al. Mechanism and color modulation of fungal bioluminescence // Sci Adv. 2017. V. 3(4). e1602847.
13. Гительзон И.И., Ковров Б.Г., Лисовский Г.М. и др. Экспериментальные экологические системы, включающие человека // Проблемы космической биологии. Т. 28. М.: Наука, 1975.

14. *Gitelson I.I., Lisovsky G.M., MacElroy R.D.* Manmade Closed Ecological Systems. L.-N.Y.: Taylor & Francis, 2003.
15. *Гительзон И.И., Фиш А.М., Чумакова Р.И., Кузнецов А.М.* Максимальная скорость размножения бактерий и возможность её определения // Доклады АН СССР. 1973. № 6. С.1453-1455.
16. *Гительзон И.И., Киренский Л.В., Терсков И.А. и др.* Замкнутый водообмен в двухзвенной биолого-технической системе жизнеобеспечения человека // Bioastronautics Proc. XIXth IAP Congress, New York, 1968 // Pergamon Press and PWN-Polish Sci. Publ. 1970. V. 4. P. 91.
17. *Gitelson J.I., Blum V., Grigoriev A.I. et al.* Biological-physical-Chemical Aspects of a Human Life Support System for a Luna Base // Acta Astronautica. 1995. V. 37. P. 385-394.
18. *Гительзон И.И., Лисовский Г.М., Терсков И.А.* Сравнение продуктивности водорослей с высшими растениями // Управляемый биосинтез. М.: Наука, 1966. С. 68-75.
19. *Окладников Ю.Н., Власова Н.В., Касаева Г.Е., Родионов В.Н.* Звено "человек" в эксперименте (медико-физиологические исследования) // Замкнутая система: человек – высшие растения / Отв. ред. Г.М. Лисовский. Новосибирск: Наука, 1979. С. 82-99.
20. *Тихомиров А.А., Ушакова С.А.* Научные и технологические основы формирования фототрофного звена биолого-технических систем жизнеобеспечения. Красноярск: Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т, 2016.
21. *Вернадский В.И.* Научная мысль как планетарное явление. М.: Наука, 1991.
22. *Янишина Ф.Т.* Ноосфера: утопия или реальная перспектива? // Общественные науки и современность. 1993. № 1. С. 163-173.
23. *Моисеев Н.Н.* Расставание с простотой. М.: Аграф, 1998.
24. *Волова Т.Г., Окладников Ю.Н., Сидько Ф.Я. и др.* Производство белка на водоросле / Отв. ред. И.И. Гительзон. Новосибирск: Наука, 1981.
25. *Шишацкий О.Н., Шишацкая Е.И., Волова Т.Г.* Разрушаемые полимеры: потребности, производство, применение. Красноярск: ООО НИТ, 2010.

BIOPHYSICS FOR ECOLOGY

© 2019 J.I. Gitelson

Institute of Biophysics of SB RAS, Krasnoyarsk, Russia

E-mail: gitelson@ibp.ru

Received 16.07.2019

Revised version received 28.07.2019

Accepted 06.08.2019

The paper presents some new opportunities for biophysics to solve the fundamental challenge of global ecology—to decode the mechanism maintaining the steady state of the biosphere. The Institute of Biophysics (SB RAS) develops two mutually supportive lines in ecological biophysics: first, to monitor by optical methods vital activity of natural and constructed ecosystem by example of marine bioluminescence and closed ecosystem; second, to study regularities of parametric control of biosynthesis and creation of bioengineering systems to control these processes to construct no sphere-like ecosystems for human life support under extreme conditions on Earth and in space, in particular.

Keywords: biophysics, biotechnology, biosynthesis, biopolymers, bioluminescence, bioluminescent analysis, hydrogen biosynthesis, noosphere, life support, closed ecosystem.