

РОЛЬ БИОФИЗИКИ В СОВРЕМЕННЫХ НАУКАХ О ЖИЗНИ

© 2024 г. Г.Р. Иваницкий*,#

*Институт теоретической и экспериментальной биофизики РАН,
ул. Институтская, 3, Пущино Московской области, 142290, Россия

#E-mail: ivanitsky@iteb.ru

Поступила в редакцию 20.03.2024 г.

После доработки 15.07.2024 г.

Принята к публикации 17.07.2024 г.

Приведен перечень обзоров автора и дано их краткое изложение. В них показано влияние биофизики на развитие наук о жизни. Биофизика, как системная наука, широко использует методы математического моделирования. Результаты моделирования важны как для теоретического развития биологии, так и развития прикладных наук — биомедицины, геронтологии, биобезопасности и робототехники.

Ключевые слова: биофизика; парадоксы определения живой материи, медицинской нормы, динамической устойчивости жизнедеятельности, нейродегенеративных заболеваний.

DOI: 10.31857/S0006302924040237, EDN: NENSUF

Единственный способ определить границы возможного — выйти за эти границы.

Артур Кларк (1917–2008),
писатель-фантаст и футуролог

За последние годы, в связи с успехами генетики, протеомики и метаболики, роль биофизики в современных науках о жизни претерпела существенные изменения. Цель данной статьи — обозначить эти изменения как в теоретическом, так и в прикладном аспектах, и дать перечень обзорных работ, в которых подробнее рассмотрен современный вклад биофизики в развитие прикладных наук о жизни.

РОЛЬ БИОФИЗИКИ В ТЕОРЕТИЧЕСКОМ РАЗВИТИИ НАУК О ЖИЗНИ

По многочисленным ссылкам на статью «XXI век: что такое жизнь с позиции физики» [1], которая была опубликована мною почти 15 лет назад, становится очевидным, что эта тема не потеряла своей актуальности. Главная идея той работы заключалась в том, что какой бы отдельный признак, используемый для описания *живых систем* мы ни взяли, — неизбежно найдем его в системах, которые принято считать *неживыми*. Ниже приведена табл. 1 из той работы.

Все попытки исследователей найти какой-либо один абсолютный, характерный признак живого к успеху не привели [2, 3]. Почему это произошло? На этот вопрос дан ответ в работах [4, 5].

В живых системах не обнаруживается никаких свойств, которыми не обладали бы неживые объекты. Задача определения жизни и механизма ее возникновения с точки зрения физики является *некорректной обратной задачей*, поэтому она разрешима только в терминах вероятности или договоренности между исследователями. Биофизика требует фактов и основана на операционном методе. Наше желание дать точное определение *жизни и живого* — это не более чем «игра ума» с сильным антропоцентрическим акцентом. Отсюда и возникает множество определений *живой материи*. Так было и так будет, пока человечество не столкнется с другими вариантами «развитой жизни» на другой физической основе, если эти варианты действительно существуют не только в умах фантастов, но и в реальности.

На вопросы, поставленные в работе [1], мне удалось ответить в ряде публикаций [6–13]. Но по-прежнему нет ответа на главный вопрос: «Чем отличается живое от неживого?».

Более 45 лет назад мы написали книгу «Математическая биофизика клетки» [14], в которой изложили описание жизнедеятельности клетки на трех разных математических языках: биохимическом языке, на физическом языке автоволновых процессов и на языке геометрии — стереологии,

Таблица 1. Признаки живой и неживой материи

№	Признаки живой материи	Признаки неживой материи
1	Живые организмы <i>характеризуются упорядоченной иерархической структурой</i>	Все объекты неживой природы отвечают этому же условию и устроены по иерархическому принципу: элементарные частицы → атомы → молекулы → макромолекулы и т.д.
2	Живые организмы являются <i>открытыми системами</i> и получают энергию из окружающей среды, используя ее для поддержания своей высокой упорядоченности	Смерчи, тайфуны, ветер, молнии черпают энергию Солнца; вулканы, землетрясения, подвижка материков черпают энергию из недр Земли. Таким образом, открытость живых систем — не специфический признак живого
3	Способность <i>реагировать на внешнее воздействие</i> (рецепция) — универсальное свойство всех живых систем	Намагничивание, электризация, свечение, поляризация, деформация, инерция, перемещение, разрушение и т.д. — это также ответы неживых объектов на внешние воздействия
4	Способность <i>запоминать информацию</i> о предыдущих состояниях и адаптироваться к изменению внешних условий	Ответная реакция объектов неживой природы обычно также направлена на “нейтрализацию” внешнего воздействия. Ответная реакция неживого объекта — это стремление сохранить свое исходное состояние (принцип Ле-Шателье, принцип Ленца, инерция Ньютона). Существуют проявления в неживых объектах и элементов памяти, например, магнитный гистерезис
5	Живые организмы <i>изменяются и усложняются</i>	Объекты в астрофизике (образование газо-пылевых облаков → туманностей → галактик), в геофизике (образование горячего ядра планет → сравнительно холодной мантии поверхности планет → тектонических плит → материков и океанов), в химии (преобразование субстратов в продукты) также демонстрируют эволюционное изменение и усложнение
6	Все живое <i>размножается</i>	Коацерватные капли органических веществ могут расти и делиться. Из растворов солей растут кристаллы. Кусочек, отломившийся от растущего кристалла, становится зародышем для роста подобного кристалла. Черные курильщики и белые столбы на дне океана также размножаются
7	Живое способно к <i>саморегуляции и регенерации поврежденных</i>	Устойчивые вихри, торнадо, ячейки Релея–Бенара — саморегулирующиеся системы. Ледяная сосулька после разрушения восстанавливается снова. Кристаллы способны к регенерации дефектов (дислокаций). Следовательно, сам факт саморегуляции и регенерации не может служить отличием живого от неживого
8	Живые объекты осуществляют <i>обмен веществ</i> с окружающей средой с целью размножения и экспансии	Все реакции окисления обладают этим свойством, например, горение. Преобразование энергии — это свойство всей природы, а не специфическое свойство живых систем
9	Живые объекты обладают <i>направленной подвижностью</i>	Этим свойством обладают ферромагнитные частицы в магнитном поле, ионы в электрическом поле, броуновские частицы в тепловом поле, частицы, имеющие массу, в гравитационном поле и т.д.
10	Живым объектам свойственна <i>неравновесность состояния</i>	Дожди, снегопады, лавины, водопады и т.п. — это все также неравновесные состояния

Таблица 2. Высказывания классиков о системном подходе

Автор	Цитата	Источник
Иоганн Вольфганг фон Гёте (1749–1832), немецкий поэт и ученый-энциклопедист	«Гармония целого делает каждое живое существо тем, что оно есть; и человек является человеком как в силу формы и характера своей верхней челюсти, так и в силу формы и характера маленького пальца на ноге. Всякое создание – только тон и оттенок единой великой гармонии, которую следует изучать как нечто целое; в противном случае любая деталь становится мертвой буквой»	[15]
Джеффри Викерс (1894–1982), английский писатель и пропагандист системного подхода в изучении простых и сложных систем в природе и обществе	«Мы привыкли считать вещи существующими независимо от их функций: автомобиль остается автомобилем и в гараже, и в пути. Это неверно. Автомобиль, как и атом, может быть описан только в категориях действия, и это в равной степени справедливо для организма или организации. Мы должны задавать вопрос: «Как сохраняется данное единство?» Любое целое есть не механическая сумма отдельных частей, а совокупность различного рода деятельностей, поэтому представляет собой — в той или иной мере — часть более крупного целого»	[16]
Эрвин Чаргафф (1905–2002), американский биохимик	«Понятно, что размышлять о природе вообще или даже о живой природе вообще — не занятие для ученого. Это дело поэта, философа, пророка. Должно быть разделение труда. Но излишняя дробность представления о природе зачастую приводит к его полному исчезновению, делает мир похожим на Шалтая-Болтая, которого не удалось собрать. Такой мир может стать непознаваемым по мере того, как от него будут отламывать — «для более тщательного изучения» — кусочки все мельче и мельче. Не имея крепкого стержня, мы кидаемся в крайности. И чудесный, красочный ковер распускается по ниточкам; одну за другой нити вытаскивают, разрывают, изучают; в конце концов, узор забывается, и восстановить его невозможно»	[17]

описывающей трехмерное наполнение внутреннего объема живых систем разнообразными трехмерными структурами на водной основе, работающими на основе законов классической механики. При этом наглядно продемонстрировали, что каждый из этих языков описания процессов высвечивает лишь определенную сторону жизнедеятельности клетки. Однако описание работы внутри клетки в единое целое удалось объединить лишь частично.

Это подтвердило догадку исследователей XIX и XX веков, что гармония целого наблюдается только в целом. В качестве примера приведем три цитаты разных периодов развития системной науки (табл. 2).

Следовательно, понять работу живой системы (с учетом современных данных) можно лишь в терминах динамики внутри цикла (рис. 1), а любая макросистема как целое есть не просто

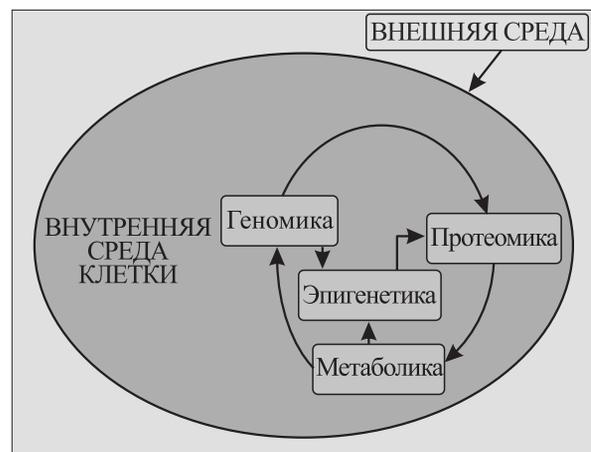


Рис. 1. Циклическая система формирования клеток живого организма в онтогенезе.

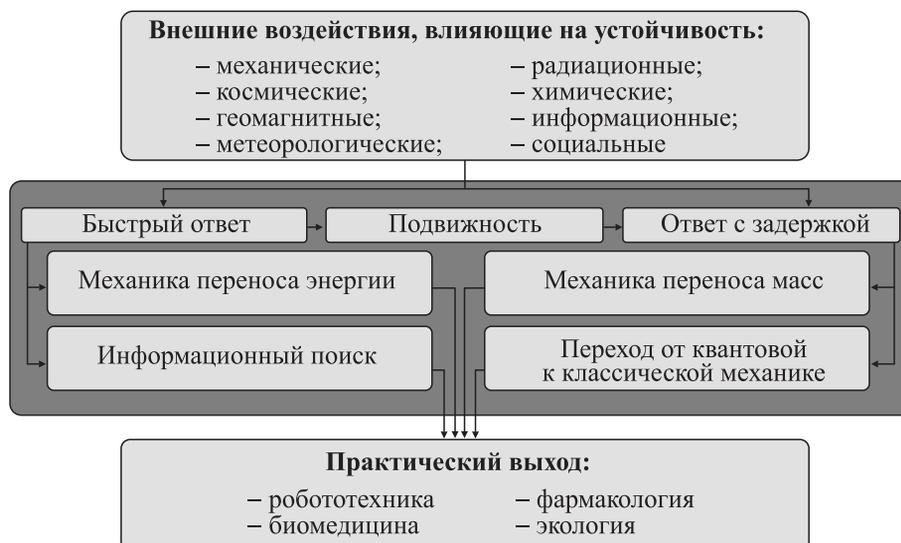


Рис. 2. Схема внешних воздействий, влияющих на нарушение устойчивости биосистем, и практический выход в случае успеха создания общей теории устойчивости живых систем.

механическая сумма отдельных частей, а совокупность различного рода деятельностей, и представляет собой часть еще более крупного целого.

Как объединить в имитационной модели различные уровни, чтобы понять их совместное функционирование? Пока ответ на этот вопрос для живых систем остается частично открытым. Намечены лишь два пути решения этой проблемы.

Возможно, дальнейшее развитие теории струн [18] или кросс-диффузионных взаимодействий автоволн с подвижностью (с адвекцией) [19, 20] позволит решить эту задачу в общем виде. Желательно продолжать работать в этих двух направлениях с надеждой на успех. Оппоненты могут возразить, что развитие такого обобщенного, системного подхода — чисто философская метафизическая задача, далекая от практического приложения, и не стоит на это тратить время. Однако это не так. На рис. 2 показаны наборы частных биофизических задач, на которые, в случае успешного их объединения, можно было бы взглянуть с новой неожиданной стороны, поскольку все они имеют практический выход в разнообразные современные биофизические технологии.

Все живое и неживое, окружающее нас, встроено в нашу Вселенную. Физические законы нашей Вселенной основаны на ее фундаментальных физических постоянных (гравитационная постоянная, постоянная Планка, скорость света в вакууме, масса покоя электрона, постоянная Больцмана, постоянная Авогадро и т.д.). Таких постоянных более 30. Поскольку все живое возникло, эволюционировало и существует в одной и той же Вселенной вместе с неживой природой, то оно не мо-

жет не подчиняться одним и тем же ее законам. Живое собрано из тех же элементов периодической таблицы Д.И. Менделеева, что и неживое. Отличие живого от неживого состоит только в том, что живое, сформировавшись из *ограниченного разнообразия элементов таблицы Менделеева, обменяло это ограничение на расширение кинетического использования разнообразия физических законов Природы*. Это позволило живому существенно повысить пространственно-временную *скорость адаптации* к изменениям внешней среды, управлять скоростью комбинаторных обменных операций при температурах порядка 300 К между разнообразием химических образований и, тем самым, продлить время своего существования [4]. Следовательно, в живом не может существовать каково-либо одного признака, который не проявил бы себя в неживых системах. Неживое плавно переходит в живое. Проведение линии раздела живого от неживого — это семантическая проблема, основанная на отборе признаков классификации путем договоренности между исследователями [21].

ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗНАЧЕНИЕ БИОФИЗИКИ НА ПРИМЕРЕ РАЗВИТИЯ БИОМЕДИЦИНЫ

Биофизика играет особую роль в развитии биомедицины. Пример: что есть *норма* для человека? Обычно *норма* — это то, что присуще большинству (более половины) людей без видимых аномалий, и выглядит она как средний показатель. Однако «усреднение» порождает немало казусов и проблем. Несмотря на грандиозный успех в развитии современных методов диагностики и фармакологии, во многих ситуациях медицину

продолжают оценивать не как науку, а как искусство врача.

Во-первых, чрезмерная и неизбежная специализация врачей противоречит принципу системного подхода к конкретному пациенту, поэтому продолжают споры вокруг необходимости восстановления статуса «семейного врача». Однако появляется финансовая проблема. Платная медицина и страховки полностью не могут решить проблему «семейного врача». В Интернете можно найти множество жалоб на различные способы обирания страдающих недугами пациентов. Например: «лечил ухо, а от применения дорогих рекомендованных лекарств получил аллергию, от которой избавился с большим трудом спустя много месяцев».

Во-вторых, врачебные ошибки существовали и будут существовать во всех странах [22, 23]. Диагностика и методы лечения по-прежнему основываются на интуиции врача-терапевта, оценивающего симптоматику того или иного заболевания.

В-третьих, разные фармпрепараты, производимые фирмами во всем мире, обладают наряду со специфическим воздействием и побочными эффектами и требуют учета индивидуальных особенностей организма. Это не только вина фирм, а еще и специфика организации сложных биосистем. Общей теории самоорганизующихся биосистем, далеких от равновесия, пока еще не существует [7].

В-четвертых, появление парадоксов связано с самим человеческим организмом. *Норма* диктуется не только заложенными в прошлом генетическими различиями (филогенезом) между различными людьми, но и состоянием и развитием внешней и внутренней среды их организмов в онтогенезе. Особый интерес к вопросу о влиянии центральной нервной системы (психики) на различные физиологические и патологические процессы в человеческом организме возник у врачей и исследователей в начале XX века [24]. Тогда и появился термин — *ятрогенные заболевания* (иногда в русском языке используется его написание как *иатрогенные заболевания*) от др. греч. *ιατρος* — врач + *γενεά* — рождение. К ним относятся и такие заболевания, которые вызваны побочным действием принимаемых лекарств.

В-пятых, сегодня понятие *ятрогенные заболевания* требует расширения. Сюда нужно включить влияние средств массовой информации. Поскольку как сам врач, так и пациент иногда становятся жертвой телевизионной рекламы, назойливо расхваливающей нечто универсальное, которое мгновенно спасет больного от недуга, например, различные БАДы или обработанная каким-либо способом простая вода (например, омагниченная). Однако временное улучшение самочувствия от таких квазилекарств — это обычный эффект *плацебо* [25]. Тем не менее и эффект

плацебо изучен недостаточно и весьма индивидуален. Порядка 50% пациентов избавляются от симптомов заболеваний самостоятельно. Спонтанная ремиссия — это не экзотика, а экспериментальный факт. Статистика еще в начале XX века способствовала появлению крылатого выражения: «лечить надо не болезнь, а больного». Другими словами, надо не только исправлять работу конкретного органа, но и способствовать организму самому найти динамическое равновесие с внешней средой и своими органами [26].

Проблем, которые требуется решать для здоровья нации, очень много — это качество воздуха, воды и питания; состояние экологии; озеленение мегаполисов. Большая плотность населения дает благодатную почву для пандемий. Рост скоростей перемещения населения по планете открывает возможность широкого обмена инфекциями при недостаточном контроле на границах за состоянием здоровья приезжающих. Наконец, гиподинамия и ожирение значительной части населения, в частности, детей, которые большое время проводят за компьютерными играми, также существенно понижают продолжительность жизни. Для решения демографических проблем требуется системный подход, в основе которого лежат не только финансовые соображения, но и весовые значения факторов, влияющих на повышение здоровья населения страны. Сегодня отечественная медицина медленно, но целенаправленно приступает к системному решению этих проблем.

Несмотря на пандемии, продолжительность жизни населения в развитых странах растет. Результат этого роста привел к тому, что нейродегенеративные заболевания (рассеянный склероз, болезнь Альцгеймера, болезнь Паркинсона и др.) становятся одной из существенных причин инвалидности и смерти. В медицине их часто объединяют единым термином *сенильная деменция* (от лат. *senilis* — «старческий», *dementia* — «безумие»). Масштаб возникающих при этом проблем оценивается существенными финансовыми затратами. Ежегодное содержание одного человека с подобными заболеваниями (особенно с болезнью Альцгеймера или рассеянным склерозом), например, оценивалось в США в 2018 г. более чем в 30 000 долларов. Если не удастся остановить рост распространения подобных болезней, то к 2050 г. приблизительно 135 миллионов человек будут их носителями. При этом прогнозируемые расходы на содержание больных во всем мире составят более 4 трлн долларов США в год по ценам 2018 г. [27].

Однако проблема состоит не только в финансовых затратах. Трагедия в том, что существенное ухудшение работы мозга, переходящее в полную потерю памяти, часто происходит, когда у человека состояние большинства органов находится близким к возрастной норме. Нейродегенератив-

ные заболевания — это не болезнь тела. Прежде всего, это болезнь головного мозга, т.е. потеря заболевшим собственного «Я», потеря того, что определяет его *личность*. Социальная трагедия состоит в том, что родственники годами страдают, наблюдая, как близкий и любимый ими человек постепенно деградирует. У него возникает безразличие к окружающим его людям, он не узнает даже близких родственников, совершает алогичные поступки, постепенно теряет дар речи, медленно приближаясь к смерти. Другими словами, болезнь одного человека может оказывать существенное психическое влияние на многих других окружающих его людей, подрывая тем самым их здоровье.

Предполагается, что разработка лекарственного препарата хотя бы для торможения возникновения болезни Альцгеймера займет в среднем 13 лет и будет стоить более 5.5 миллиардов долларов США (в ценах 2018 г.). По состоянию на начало 2018 г. перечислены 112 исследований различной направленности по выяснению механизмов возникновения этих болезней [11, 28]. Если бы удалось к 2025 г. получить какое-либо средство, которое задержало бы рост числа заболевших хотя бы на 5 лет, то количество людей, страдающих подобными заболеваниями, уменьшилось бы к 2050 г. в 2 раза [11]. К сожалению, пока такой результат недостижим. Причина — недостаток знаний о механизмах возникновения нейродегенеративных заболеваний, в частности, болезни Альцгеймера.

Экспериментальные модели заболевания либо изучаются на животных, либо в клиниках на уже пострадавших от заболевания пациентах, когда заболевание у них проявило себя в полную силу. С одной стороны, остается открытым вопрос: можно ли достоверно выяснить *механизм возникновения нейродегенеративных заболеваний* человека путем моделирования заболевания на мышах и крысах? С другой стороны, в клиниках, как правило, сталкиваются с необратимой патологией мозга у людей. При этом необходимо ретроспективно, основываясь на симптомах уже присутствующих у пациента, выяснить какие причины привели к заболеванию. Другими словами, требуется решить некорректную обратную задачу физики — по следствию определить причины. Понятно, что, имея сумму симптомов заболевания, однозначно определить истинный вклад той или иной причины в их появление очень сложно. Возникающая неопределенность связана и с тем, что причины и следствия оказываются смещенными. Предполагая аддитивность причин заболевания, один и тот же результат можно получить из набора разных слагаемых.

По мере усложнения задач современной биомедицины надежды возлагаются на системные

подходы. Следует учитывать отличия в подходах к решению задачи по выяснению механизма возникновения нейродегенеративных заболеваний клиницистами, нейрофизиологами и биофизиками. Нейрофизиолог обычно отвечает на вопрос: что представляет собою изучаемая система? Клиницист акцентирует внимание на вопросе — как применить результаты нейрофизиологов на практике? Биофизик ставит вопросы иначе — как меняется при заболевании динамическая картина функционирования биосистем на всех иерархических уровнях ее организации в пространстве и во времени? Когда и почему достигается предел выполнения ее своих функций?

По мере усложнения задач современной биомедицины особое значение приобретает анализ, который основан на математическом описании связей между явлениями и их компьютерным имитационным моделированием. Это есть дополнительный продуктивный путь к достижению цели, одновременно позволяющей в случае успеха обнаружить весь спектр практических приложений, важных как для биомедицины, так и для других смежных областей приложения наукоемких технологий, например, для биобезопасности и геронтологии. Подробнее смотри в работе [11].

О ЗАДАЧАХ, НЕ РЕШЕННЫХ БИОФИЗИКАМИ, И ОТСУТСТВИИ ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО ОБОРУДОВАНИЯ С ТРЕБУЕМОЙ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬЮ

Главная причина — недостаточное развитие биофизического приборостроения. Математические имитационные биофизические модели являются существенным и важным дополнением к экспериментам с животными. Достоинством математического моделирования является вскрытие неопределенностей и тем самым выбор кратчайшего пути к поставленной цели. Но достоверность математических результатов можно проверить, лишь имея набор экспериментального материала.

Как показали результаты математического моделирования на уровне подсистем в триаде отображения {*внешняя среда* → *мозг* → *органы тела*}, именно среднее звено — мозг — является главным звеном, управляющим устойчивостью автовольных взаимодействий внутри организма в целом [11].

Кора мозга в циклическом взаимодействии с телом через подкорковые структуры управляет частотой работы сердца, частотой дыхания и другими органами, что обеспечивает формирование набора волновых паттернов, отвечающих компромиссу в поиске устойчивости между изменениями внешней среды, тела и мозга. Развитая новая кора отличает человека от животного, поэтому эксперименты на животных в ряде случаев не

приводят к успеху в желании получить эффективный способ борьбы, например, с нейродегенеративными заболеваниями человека. Новая кора каждого человека индивидуальна, поскольку она отличается от других определяемых в основном генетикой образований организма. В коре содержится память о накопленном жизненном опыте и приобретенных навыках работы с получаемой информацией. Новая кора не только отличает нас от животных, но ее наполнение отличает одного человека от другого. Память реализуется набором управляемых связей между паттернами, формируемыми нейронными кластерами [29, 30].

Вмешательство в организм и работу коры мозга извне, чтобы помочь мозгу восстановиться, происходит, к сожалению, пока вслепую и может привести к успеху лишь с вероятностью $p = 1/n$, где n — количество разнообразных ситуаций. Если $n \rightarrow \infty$, то вероятность $p \rightarrow 0$. Необходимо изучить динамику смены информационных паттернов разной формы, т.е. иметь метод их регистрации и распознавания во времени и в пространстве на одном и том же мозге, которому предстоит лечение. Процессы, которые идут на клеточном уровне в нейронных сетях и в их межклеточном пространстве, во времени происходят в миллисекундном диапазоне, а в пространстве — в диапазоне нанометров. Арсенал необходимых экспериментальных методов для наблюдения и распознавания формы их автоволн в пространстве и во времени, к сожалению, пока отсутствует. Чувствительности всех существующих методов исследования мозга не хватает (по крайней мере на порядок), чтобы однозначно обеспечить контроль внешних терапевтических воздействий.

Позитронно-эмиссионная томография имеет невысокое временное разрешение (порядка 10 с). Этого недостаточно, чтобы различать динамику паттернов и распознавать их форму. Электроэнцефалография достигает временного разрешения до 2 мкс, но имеет низкое пространственное разрешение. В результате мы наблюдаем взаимодействие нейронных групп лишь интегрально. Волновой паттерн размывается по пространству и его границы и переходы практически не наблюдаются. Вживление микроэлектродов повысило бы пространственное разрешение, но этот метод — инвазивный, и использовать его на человеке нельзя. Наконец, функциональная магнитно-резонансная томография позволяет регистрировать изменение потребления кислорода, а, следовательно, скорость метаболических процессов. Ее пространственное разрешение порядка 1 мм, а временное — порядка 2 с, и этого также недостаточно. Большие надежды возлагаются на развитие нейрофотоники. Формально временное разрешение этого метода неограниченно, а пространственное разрешение определяется длиной волны используемого света. Однако методы ней-

рофотоники также являются инвазивными с вытекающими отсюда недостатками и неопределенностью получаемых результатов. Наконец, высокочувствительные методы матричного тепловидения позволяют исследовать работу термодинамических процессов в мозге, но они могут работать лишь на открытом мозге во время хирургических операций [31].

Вывод очевиден — будущее биомедицины существенно зависит от развития биофизического приборостроения.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работы, изложенные в статье, выполнены в рамках Государственного задания № 075-00224-24-01.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

СОБЛЮДЕНИЕ ЭТИЧЕСКИХ СТАНДАРТОВ

Настоящая работа не содержит описания исследований с использованием людей и животных в качестве объектов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Иваницкий Г. Р. XXI век: что такое жизнь с точки зрения физики. *Успехи физ. наук*, **180**, 337–369 (2010). DOI: 10.3367/UFNг.0180.201004а.0337
2. Кляцкин В. И. В стохастических динамических системах могут образовываться пространственные структуры, благодаря событиям, происходящим с вероятностью, стремящейся к нулю (Комментарий к статье Г.Р. Иваницкого «XXI век: что такое жизнь с точки зрения физики»). *Успехи физ. наук*, **182**, 1235–1237 (2012). DOI: 10.3367/UFNг.0182.201211к.1235
3. Смолович А. М. Гипотеза о физической природе феномена жизни (к дискуссии по статье Г.Р. Иваницкого «XXI век: что такое жизнь с точки зрения физики»). *Биофизика*, **66** (5), 1018–1021 (2021). DOI: 10.31857/S0006302921050227
4. Иваницкий Г. Р. Память о прошлом дает льготы в процессах выживания и размножения (Ответ на комментарий В.И. Кляцкина к статье «XXI век: что такое жизнь с точки зрения физики»). *Успехи физ. наук*, **182**, 1238–1244 (2012). DOI: 10.3367/UFNг.0182.201211л.1238
5. Иваницкий Г. Р. Почему не прекращаются дискуссии на тему: что такое жизнь с точки зрения физики (Ответ на статью А.М. Смоловича «Гипотеза о физической природе феномена жизни»). *Биофизика*, **66** (5), 1022–1029 (2021). DOI: 10.31857/S0006302921050239
6. Иваницкий Г. Р. *Выражи закономерностей. Правила БИО — стержень науки* (Наука, М., 2011).

7. Иваницкий Г. Р. Самоорганизующаяся динамическая устойчивость биосистем, далеких от равновесия. *Успехи физ. наук*, **187**, 757–784 (2017). DOI: 10.3367/UFN.2016.08.037871
8. Цыганов М. А., Бикташев В. Н. и Иваницкий Г. Р. Отрицательная рефрактерность в возбудимых системах с кроссдиффузией. *Биофизика*, **54** (4), 704–709 (2009).
9. Иваницкий Г. Р., Деев А. А. и Цыганов М. А. Ритмы жизни биологических и социальных систем. *Вестн. РАН*, **81** (11), 1008–1020 (2011).
10. Иваницкий Г. Р. Робот и человек. Где находится предел их сходства? *Успехи физ. наук*, **188**, 965–991 (2018). DOI: 10.3367/UFN.2018.03.03830
11. Иваницкий Г. Р. и Морозов А. А. Объект исследования – стареющий мозг. *Успехи физ. наук*, **190** (11), 1165–1188 (2020). DOI: 10.3367/UFN.2020.06.038791
12. Иваницкий Г. Р., Деев А. А. и Хижняк Е. П. Может ли существовать долговременная структурно-динамическая память воды? *Успехи физ. наук*, **184** 43–74 (2014). DOI: 10.3367/UFN.0184.201401b.0043
13. Иваницкий Г. Р. Люди-Х, обладающие необычным взаимодействием рецепторных систем, конструируют внутри себя мир новых образов (к 140-летию со дня рождения академика П.П. Лазарева). *Успехи физ. наук*, **189**, 759–784 (2019). DOI: 10.3367/UFN.2019.01.038524
14. Иваницкий Г. Р., Кринский В. И. и Сельков Е. Е. *Математическая биофизика клетки* (Наука, М., (1978).
15. Гёте И. В. *Избранные философские произведения* (Наука, М., 1964).
16. Vickers G. Control, Stability and Choice. *General Systems*, **11**, 1–8 (1957).
17. Чарграфф Э. Горячка разума. *Химия и жизнь*, № 5, 63 (1978).
18. Морозов А. Ю. Теория струн — что это такое? *Успехи физ. наук*, **162** (8), 83–175 (1992).
19. Zemskov E. P., Kassner K., Tsyganov M. A., and Hauser M. J. V. Wavy fronts in reaction-diffusion systems with cross-advection. *Eur. Phys. J. B*, **72**, 457–465 (2009). DOI: 10.1140/epjb/e2009-00370-5
20. Zemskov E. P., Tsyganov M. A., Ivanitsky G. R., and Horsthemke W. Solitary pulses and periodic wave trains in a bistable FitzHugh–Nagumo model with cross diffusion and cross advection. *Phys. Rev. E*, **105**, 014207 (2022). DOI: 10.1103/PhysRevE.105.014207
21. *Биологическая номенклатура* (Мир, М., 1980).
22. Эльштейн Н. В. Современный взгляд на врачебные ошибки. *Терапевт. архив*, № 8, 88–92 (2005).
23. Бобров О. Е. Врачебная ошибка или профессиональное невежество? Мифы, иллюзии, реальность. *Лекарь*, № 1–2, 6–12 (2008).
24. Лурия Р. А. *Внутренняя картина болезней и иатрогенные заболевания* (Биомедгиз, М.–Л., 1935).
25. Иваницкий Г. Р., Деев А. А. и Хижняк Е. П. Может ли существовать долговременная структурно-динамическая память воды? *Успехи физ. наук*, **184** (1), 43–74 (2014). DOI: 10.3367/UFN.0184.201401b.0043
26. Иваницкий Г. Р., Деев А. А. и Хижняк Е. П. К вопросу о парадоксальных ситуациях, возникающих при гидроцефалии. *Биофизика*, **63** (2), 412–416 (2018). DOI: 10.1134/S0006350918020136
27. Cummings J., Lee G., Ritter A., and Zhong K. Alzheimer's disease drug development pipeline. *Alzheimer's Dement. Transl. Res. Clin. Interv.*, **4** (1), 195–214 (2018). DOI: 10.1016/j.trci.2018.03.009
28. Cummings J., Ritter A., and Zhong K. Clinical trials for disease-modifying therapies in alzheimer's disease: a primer, lessons learned, and a blueprint for the future. *J. Alzheimers Dis.*, **64** (s1), S3–S22 (2018). DOI: 10.3233/JAD-179901
29. Иваницкий Г. Р. Неопределенности сравнения человека и андроида робота. *Успехи физ. наук*, **193**, 872–901 (2023). DOI: 10.3367/UFN.2022.12.039299
30. Иваницкий Г. Р. *Биофизика мозга. Реальность и модели* (РАН, М., 2023).
31. Иваницкий Г. Р. Современное матричное тепловидение в биомедицине. *Успехи физ. наук*, **176**, 1293–1320 (2006). DOI: 10.3367/UFN.0176.200612d.1293

The Role of Biophysics in Modern Life Sciences

G.R. Ivanitskii*

*Institute of Theoretical and Experimental Biophysics, Russian Academy of Sciences,
Institutskaya ul. 3, Pushchino, Moscow Region, 142290 Russia

This paper provides a list of reviews written by the author and brief overviews of those reviews. In these works, it was shown how biophysics has an effect on the development of life sciences. Biophysics, as systems science, widely uses mathematical modeling methods. The modeling results are important both for the theoretical development of biology and the development of applied sciences such as biomedicine, gerontology, biosafety and robotics.

Keywords: biophysics, paradoxes of the definition of living matter, medical norms, dynamic stability of life, neurodegenerative diseases