

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Владимирский государственный университет
имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых»

Л. В. ГРУНСКАЯ

ГЕОФИЗИКА И БИОРИТМЫ

Учебное пособие

В двух частях

Часть 2



Владимир 2019

УДК 550.3
ББК 26.2я73
Г90

Рецензенты:

Доктор медицинских наук
профессор кафедры нормальной физиологии Медицинского института
Российского университета дружбы народов
А. Е. Северин

Кандидат физико-математических наук
доцент кафедры общей и теоретической физики
Владимирского государственного университета
имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых
А. В. Гончаров

Издается по решению редакционно-издательского совета ВлГУ

Грунская, Л. В.

Г90 Геофизика и биоритмы : учеб. пособие. В 2 ч. Ч. 2 /
Л. В. Грунская ; Владим. гос. ун-т им. А. Г. и Н. Г. Столетовых. –
Владимир : Изд-во ВлГУ, 2019. – 207 с.
ISBN 978-5-9984-1018-5

Материал, представленный во второй части учебного пособия, посвящен механизмам биологического действия электромагнитных полей геофизической природы, общим аспектам исследования механизмов биологического действия электромагнитных полей, практическому использованию электромагнитных полей в медицине и биологии, применению электромагнитных полей в диагностике и терапии, исследованию взаимосвязи показателей здоровья человека с геофизическими полями и солнечной активностью.

Предназначено в помощь студентам и преподавателям при изучении или преподавании дисциплины «Геофизика и биоритмы» по направлениям подготовки 51.04.00 «Физика», 12.04.04 «Биотехнические системы и технологии», дисциплин «Биофизические основы живых систем», «Биоритмология».

Рекомендовано для формирования профессиональных компетенций в соответствии с ФГОС ВО.

Ил. 40. Табл. 3. Библиогр.: 12 назв.

УДК 550.3
ББК 26.2я73

ISBN 978-5-9984-1018-5

© ВлГУ, 2019

ВВЕДЕНИЕ

Человечество живет в резонаторе Земля – ионосфера, обладающем своим электрическим и геомагнитным полем. Электромагнитное поле (ЭМП) резонатора оказывает непосредственное воздействие на все жизненные процессы на Земле. Например, альфа-ритм работы человеческого мозга – это первый максимум в спектре резонансных частот резонатора Земля – ионосфера.

Если взглянуть на проблему в целом, то совокупность имеющихся данных свидетельствуют о том, что наряду с химической и электрической системами, являющимися неотъемлемыми проявлениями жизнедеятельности организма, существует третья информационно-управляющая система – система ЭМП. Электромагнитное излучение порождается и процессами внутри живой клетки, что служит очень важной ее характеристикой.

Эффекты, связанные с энергетическими влияниями электромагнитных полей на биологические объекты, давно и подробно изучаются в традиционных разделах биофизики. Для электромагнитобиологии, формирующейся как самостоятельное научное направление, наибольший интерес представляют аспекты действия ЭМП, связанные не с мощностью воздействия и поглощенной энергией, а с сигнальными характеристиками, с той информацией, которая закодирована в соответствующих полях и излучениях и является значимой для биосистемы.

Любая живая система в определенных условиях может служить как излучателем, так и приемником излучения, т. е. активные процессы обмена излучением могут протекать не только внутри, но и за пределами биологических объектов при незначительных энергетических затратах. Проведенное рассмотрение роли ЭМП в биосистемах указывает на сложный, многоплановый, многоаспектный характер проблемы.

Электромагнитное поле Земли тесно связано с процессами, протекающими в пространстве от уровня земной поверхности до высот в десятки земных радиусов. Источниками наиболее сильных полей в атмосфере могут служить грозные облака, напряженность поля под которыми у земной поверхности достигает 10^4 В/м.

За последние десятилетия значительно возросла относительная роль антропогенных факторов в формировании электрических полей у земной поверхности. Радио- и телевизионные станции, линии электропередач, объемные заряды, возникающие в атмосфере в результате действия промышленности и транспорта, вследствие процессов горения, испарения, диспергирования веществ в воздухе, создают дополнительные изменения электрических полей (ЭП).

Исследование влияния ЭМП на биосферу всегда привлекало внимание ученых. Особенно интересны проблемы, связанные с вопросами о том, какие именно участки спектра геомагнитных или геоэлектрических вариаций более биоэффективны и каковы энергетические соотношения геофизических и биологических явлений. В связи с этим наряду с результатами исследований по проблеме электромагнитобиологии дается краткий обзор сведений о геомагнитном поле (ГМП), наблюдаемом на поверхности Земли и в околоземном пространстве.

С целью исследования электрического и геомагнитного полей инфранизкочастотного диапазона и воздействия их на организм человека во Владимирском государственном университете на базе кафедры общей и прикладной физики создана система многоканального синхронного мониторинга электрического и геомагнитного полей на разнесенных в пространстве станциях. Формируются базы экспериментальных данных, которые используются при исследованиях воздействия природных электромагнитных полей на организм человека. С 2009 года совместно с Управлением Роспотребнадзора по Владимирской области с использованием статистических данных по смертности населения, а также по обращаемости детей с заболеваниями дыхательной системы по г. Владимиру осуществляется работа по исследованию воздействия космических и геофизических факторов на показатели здоровья населения. Проводится анализ взаимодействия гелио- и геофизических факторов (числа Вольфа, электрического поля Земли, магнитного поля Земли) с дорожно-транспортными происшествиями по Владимирской области по данным медико-санитарной части МВД России по Владимирской области, Управления Государственной инспекции безопасности дорожного движения УМВД России по Владимирской области и ГБУЗ ВО «Городская клиническая больница скорой медицинской помощи» г. Владимира.

Глава 1. МЕХАНИЗМЫ БИОЛОГИЧЕСКОГО ДЕЙСТВИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ ГЕОФИЗИЧЕСКОЙ ПРИРОДЫ

1.1. Электромагнитное поле атмосферы Земли инфранизкочастотного диапазона. Геомагнитные поля и их вариации

1.1.1. Электрические поля атмосферы Земли и их природа

Электрическая структура атмосферы – газовой оболочки Земли – тесно связана с процессами, протекающими в пространстве от уровня земной поверхности до высот в десятки земных радиусов. Изменение электрических свойств атмосферы при переходе от нижних к более высоким ее слоям обусловлено двумя основными факторами: уменьшением с высотой плотности воздуха и размещением основного источника энергии – Солнца – вне земной атмосферы [21].

Одним из наиболее существенных эффектов действия на атмосферу солнечного излучения является ионизация составляющих ее газов. Она вызывается ультрафиолетовым и рентгеновским космическим излучениями. Преимущественное поглощение ионизирующего излучения Солнца в верхних слоях атмосферы и понижение плотности воздуха с высотой создают значительную неоднородность в высотном ходе удельной электрической проводимости воздуха, которая приблизительно экспоненциально увеличивается с высотой от значения 10^{-18} $1/\text{см} \cdot \text{м}$ у поверхности Земли, достигая величины порядка 10^{-7} $1/\text{см} \cdot \text{м}$ на высоте 100 км. Это различие величин проводимости позволяет рассматривать воздух у Земли как хороший изолятор, а в ионосфере и выше – как проводник. Ввиду еще более высокой электрической проводимости среды околоземного космического пространства Земля вместе с атмосферой относительно межпланетной среды представляется нейтральной. В земной атмосфере, однако, действует глобальный процесс разделения зарядов, в результате которого атмосфера постоянно содержит избыточный положительный объемный заряд, а на земной

поверхности индуцирован нейтрализующий его поверхностный отрицательный заряд. Это разделение зарядов служит причиной существования электрического поля в тропосфере. Величина и направление ЭП широко варьируют в пространстве и времени и зависят от погодных условий, орографии местности, времени года, суток и других факторов. В безоблачную погоду ЭП приблизительно вертикально и его напряженность уменьшается с высотой в среднем от 130 В/м у поверхности Земли до нескольких вольт на метр на высоте 10 км [22].

Одной из особенностей электрических процессов атмосферы является их двойственный характер – они одновременно порождают не легко отделяемые один от другого эффекты местного и глобального масштабов.

Эффекты глобального масштаба проявляются в одновременном по всей Земле изменении напряженности ЭП атмосферы (унитарные вариации). Известны по крайней мере четыре периода унитарных вариаций ЭП: 11-летний, годовой, 27-суточный, суточный [1]. В годовом периоде поле принимает минимальное значение в июне, а максимальное – в январе [2]. В суточном периоде унитарная компонента поля минимальна в утренние часы (3 – 8 ч) и максимальна около 19 ч всемирного времени. Средние значения напряженности поля зависят от широты: они максимальны в умеренных широтах и минимальны у экватора и в полярных областях [3].

Эффекты местного масштаба определяются метеорологическими условиями, характерными для данного района [4]: облака, осадки, туман, метели, пыльные бури вызывают изменение напряженности поля с периодами в диапазоне от долей секунды до нескольких часов (рис. 1.1).

Источниками наиболее сильных полей в атмосфере считаются грозовые облака, напряженность поля под которыми у земной поверхности достигает 10^4 В/м. Грозовое облако является также генератором электрических разрядов, вызывающих скачки напряженности поля у земной поверхности. Кучевые облака, в частности облака хорошей погоды, вызывают небольшие отрицательные изменения электрических полей.

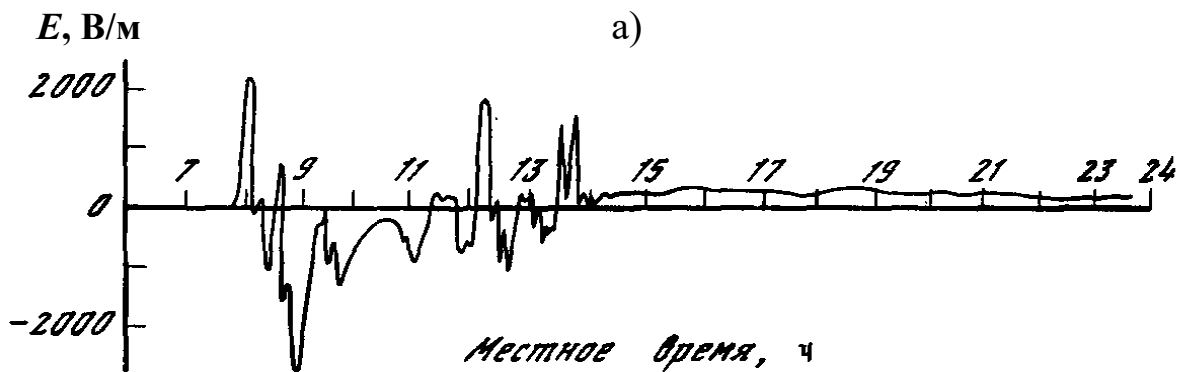
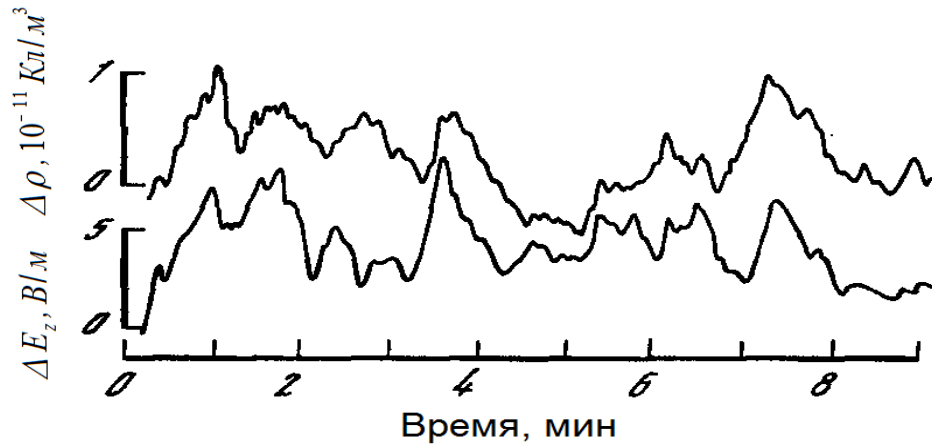


Рис. 1.1. Изменение напряженности поля на склоне Эльбруса (3060 м над уровнем моря): а – в хорошую погоду и в тумане (после 15 ч); б – во время дождя и в хорошую погоду (после 14 ч)

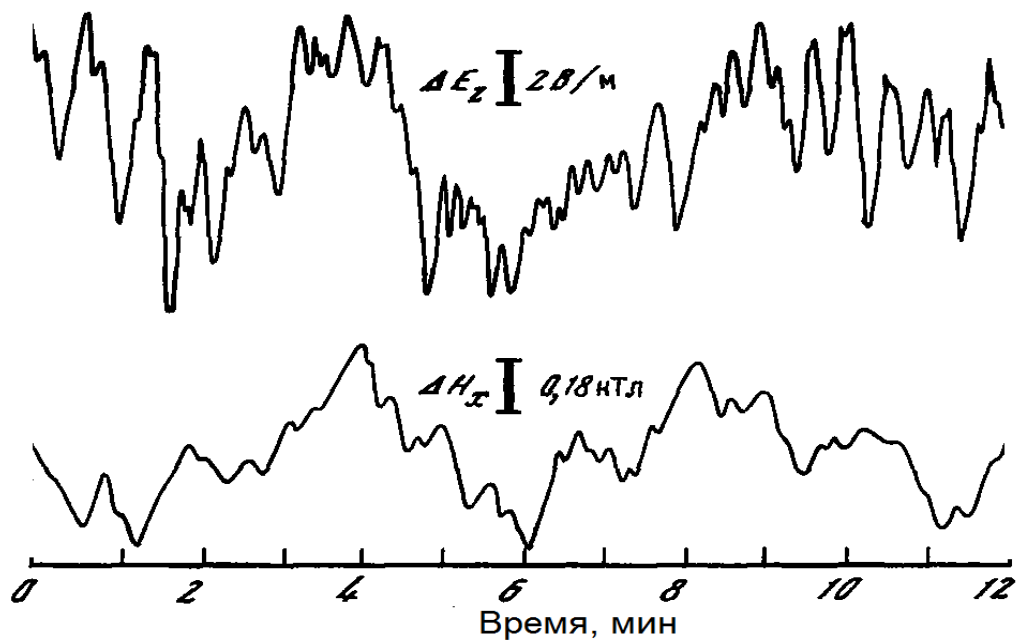
Флюктуации напряженности электрического поля в диапазоне периодов от 1 до 10^2 с наблюдаются в тропосфере даже при ясной погоде. Они могут порождаться многими источниками, которые определяются по корреляции изменений напряженности электрического поля с другими геофизическими характеристиками, например, с изменениями плотности объемного заряда воздуха (рис. 1.2). Поскольку источники геомагнитных пульсаций у поверхности Земли могут быть космической природы, то частичная корреляция [5] флюктуации напряженностей электрического и магнитного полей (см. рис. 1.2) наводит на мысль о возможном существовании источников электрических пульсаций за пределами тропосферы.

В последнее время значительно возросла относительная роль антропогенных факторов в формировании электрических полей у земной

поверхности. Дополнительные изменения ЭП создают антропогенные факторы: радио- и телевизионные станции, линии электропередач, объемные заряды, возникающие в атмосфере в результате действия промышленности и транспорта, вследствие процессов горения, испарения, диспергирования веществ в воздухе. Кроме того, искусственное введение веществ в атмосферу изменяет электрическую проводимость воздуха и влияет таким образом на напряженность естественного поля.



а)



б)

Рис. 1.2. Одновременно измеренные пульсации плотности объемного заряда и вертикальной компоненты напряженности электрического поля (г. Долгопрудный, Московская обл.) (а) и напряженности электрического и магнитного полей (г. Борок, Ярославская обл.) (б)

Итак, электрическое поле тропосферы является результатом векторного сложения компонент полей от различных источников [22]: унитарной \vec{E}_y , общей для всей Земли, метеорологической \vec{E}_M от местных метеорологических источников, от источников солнечной и космической природы \vec{E}_K и полей антропогенного происхождения \vec{E}_a

$$\vec{E} = \vec{E}_y + \vec{E}_M + \vec{E}_K + \vec{E}_a. \quad (1.1)$$

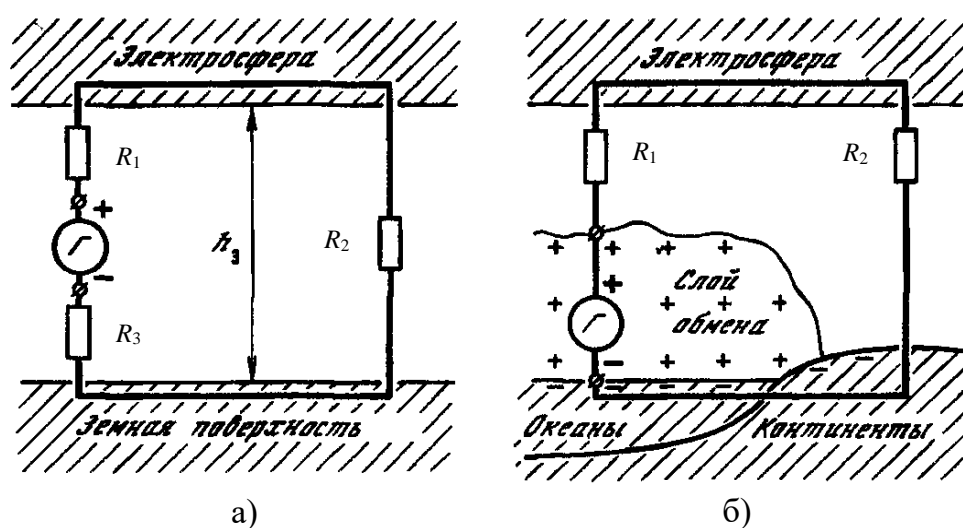


Рис. 1.3. Эквивалентная схема атмосферной электрической цепи: а – общий случай; б – модификация для случая океанической модели

Из общих соображений, основанных на факте существования унитарной вариации с суточным и годовым периодами, следует, что электризация атмосферы причинно связана с положением Земли относительно Солнца. Механизм этой связи, как и механизм генерации атмосферных зарядов, в настоящее время полностью не раскрыт и составляет одну из главных проблем теории атмосферного электричества.

Для простоты рассуждений о возможной природе вариаций электрического поля обычно рассматривают эквивалентную схему глобальной электрической цепи (рис. 1.3), которую в простейшем случае можно моделировать генератором тока, расположенным в тропосфере, с последовательно включенными сопротивлениями R_1 – между верх-

ним положительным полюсом генератора проводящей верхней атмосферой – электросферой, R_2 – между электросферой и земной поверхностью в области отсутствия генерации зарядов, R_3 – между земной поверхностью и нижним отрицательным полюсом генератора (в случае, если процесс разделения зарядов происходит существенно над земной поверхностью).

Использование условия непрерывности плотности вертикального тока проводимости в виде

$$j = \lambda_0 E_y = \overline{\lambda} E_y = \overline{\lambda} \frac{\Phi_3}{h_3}, \quad (1.2)$$

где E_y , \overline{E}_y , λ_0 , $\overline{\lambda}$ – приземные и средние по вертикальному столбу величины напряженности унитарной компоненты ЭП и проводимости воздуха в точке измерения, Φ_3 , h_3 – потенциал и эффективная высота нижней границы электросферы в точке измерения позволяет выразить унитарную компоненту в районе измерений соотношением

$$E_y = \overline{\lambda} U_r R_2 / \lambda_0 h_3 (R_1 + R_2 + R_3), \quad (1.3)$$

где U_r – разность потенциалов на полюсах генератора.

В настоящее время существует несколько теоретических моделей физической сущности процесса разделения зарядов в глобальном масштабе. Наиболее распространенной считается модель, в которой предполагается, что генераторами служат грозовые и другие облака, и унитарная вариация рассматривается как следствие изменения числа гроз (грозовая модель).

В грозовой модели атмосферного электричества выражение (1.3) может быть приведено к виду, явно отражающему одновременное действие n гроз:

$$E_y = \overline{\lambda} U_r R_2 n / \lambda_0 h_3 (R_1^0 + n R_2 + R_3^0), \quad (1.4)$$

где R_1^0 , R_3^0 – сопротивления атмосферы выше и ниже одного среднего грозового облака соответственно.

Поскольку в среднем на всей Земле происходит около 1800 гроз [6], т. е. $n = 1800$, а по некоторым оценкам [7] $R_1 = 2 \cdot 10^7$ Ом, $R_2 = 145$ Ом, то

в выражении (1.4) $R_1^0 \gg nR_2$, следовательно, при постоянных электрических параметрах атмосферы унитарная компонента пропорциональна числу гроз на Земле. Прямая зависимость между изменениями числа гроз на Земле и унитарной вариацией наблюдается в суточном периоде. В годовом периоде напряженность поля E с числом гроз A изменяется в противофазе [2, 8], что свидетельствует о превалирующей роли других факторов в формировании унитарной вариации.

Альтернативной является океаническая модель, строящаяся на эмпирическом факте корреляции унитарной вариации в суточном и годовом периодах с площадями океанов, освещаемых Солнцем (рис. 1.4) [9, 10]. В океанической модели предполагается, что основным физическим процессом, приводящим к разделению зарядов в глобальном масштабе, может быть перенос испаряющейся водой положительного заряда в количестве 10^{-10} Кл на 1 г испаренной воды [11].

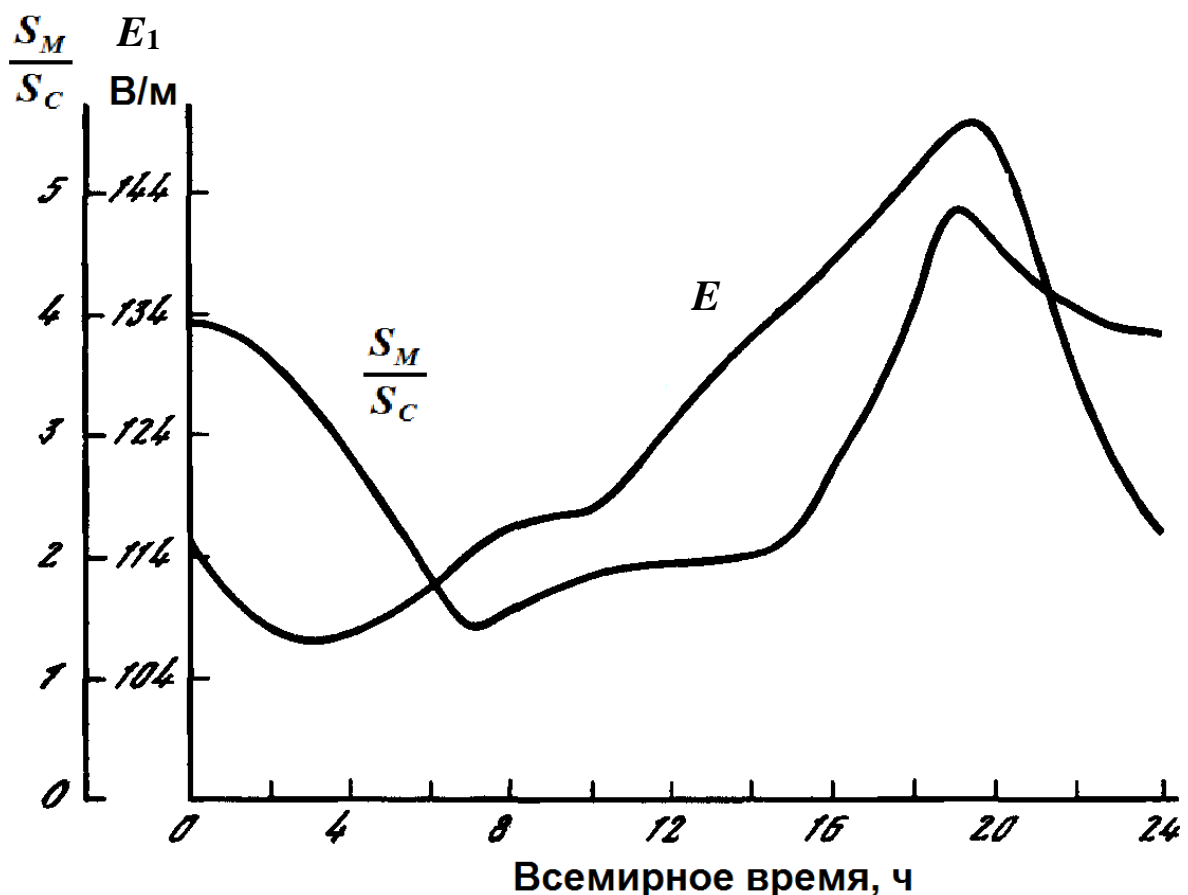


Рис. 1.4. Унитарная вариация ЭП и изменение площади океанической поверхности, освещаемой Солнцем, в суточном периоде [9]: S_M — площадь поверхности морей и океанов; S_C — площадь суши

Источником поля в глобальном масштабе является положительный объемный заряд, перешедший с испаряющейся водой в слой обмена на уровне 2 – 3 км над акваториями и находящийся в динамическом равновесии, т. е. в состоянии, когда ток генерации зарядов равен току его нейтрализации. Нейтрализация генерированного объемного заряда происходит токами, основная часть которых протекает через электросферу и тропосферу над сушей. Предполагается также, что унитарная вариация обусловлена периодической изменчивостью величин сопротивлений участков атмосферы над акваториями и сушей. Эквивалентная схема атмосферной электрической цепи, модифицированная на случай океанической модели (см. рис. 1.3), состоит из генератора, расположенного в слое обмена над акваториями, сопротивления между слоем обмена над акваториями и электросферой R , сопротивления атмосферы между земной поверхностью и электросферой над сушей R_2 ; $R_3 = 0$.

При положении Солнца, наиболее благоприятном для освещения акваторий, ионосфера над акваториями максимально ионизована и, следовательно, сопротивление атмосферы R_1 между слоем обмена и электросферой минимально, а потенциал электросферы $\phi_э$ и унитарная компонента E_y согласно выражению (1.3) максимальны. При неблагоприятном положении Солнца величины $\phi_э$ и E_y минимальны.

Отсутствие надежных доказательств существования процесса разделения зарядов при испарении воды в нужном направлении и достаточном количестве в значительной степени связано с трудностью наблюдения тока и отсутствием обоснованных представлений о физическом механизме разделения заряда на поверхности раздела жидкой и твердой фаз. К настоящему времени известны лабораторные эксперименты, в которых наблюдался перенос положительного заряда паром при испарении воды с плоской жидкой поверхности [12], поверхности льда [13], с поверхности капель [14], а также при перегонке воды в вакууме [15].

Одно из устройств для наблюдения переноса паром положительного заряда при испарении воды состоит из двух сообщающихся сосудов, частично наполненных водой (рис. 1.5).

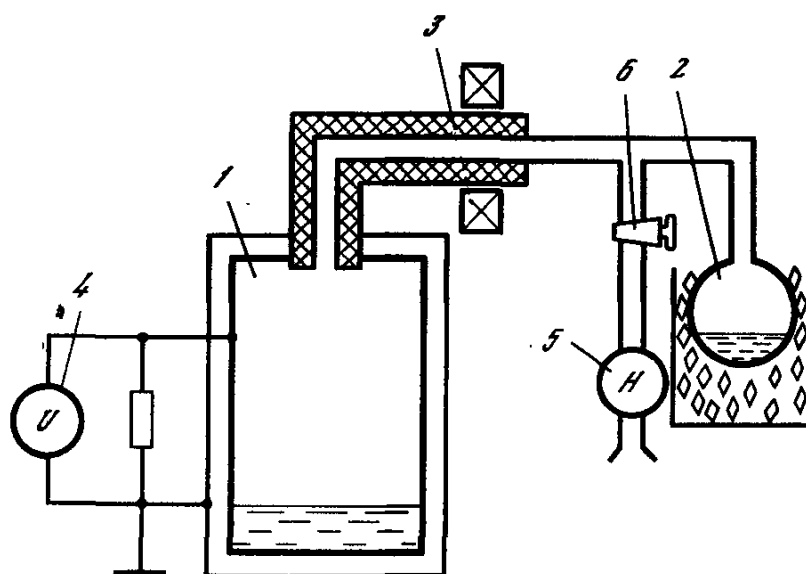


Рис. 1.5. Вариант устройства для наблюдения переноса паром при перегонке в вакууме положительного заряда:
 1 – изолированный сосуд; 2 – охлаждаемый или нагреваемый сосуд с водой; 3 – паропровод (изолятор) с нагревом; 4 – электрометрический вольтметр;
 5 – вакуумный насос; 6 – вакуумный кран

Сосуд 1, электрически изолированный от Земли и от сосуда 2, помещен в электростатический экран. Сосуд 2 помещен в охлаждающий-нагреватель. Для предотвращения обводнения внутренней поверхности паропровод 3, выполненный из изоляционного материала, подогревается. Воздух из сосудов откачивается насосом 5 до давления пара. Создаваемое неравенство температур воды в сосудах приводит к перегонке пара в направлении более холодного сосуда, при этом сосуд 1 заряжается отрицательно при перегонке пара в сосуд 2 и положительно – при перегонке в сосуд 1. Скорость зарядки определяется по падению напряжения на сопротивлении в цепи сосуда 1 и имеет $3 \cdot 10^{-11}$ Кл на 1 г перегнанной воды [15].

Наблюдение разделения зарядов при испарении воды в лабораторных условиях служит дополнительным подтверждением реальности океанической модели, тем не менее, механизм разделения зарядов остается невыясненным. Анализ использованных методов наблюдения разделяющихся зарядов показывает, что результаты большой совокуп-

ности лабораторных работ, в том числе работ с отрицательными результатами [16, 17], могут быть объяснены на основе представления о чрезвычайно низкой подвижности переносчиков зарядов. К частицам, удовлетворяющим этому требованию, следует отнести сильно гидратированный ион и неионизированную молекулу воды, несущую гипотетический заряд [12]. Окончательное решение вопроса о механизме разделения заряда требует дальнейших исследований.

Океаническая модель позволяет с единой позиции интерпретировать некоторые кажущиеся несвязанными наблюдаемые атмосферно-электрические эффекты. Рассмотрим некоторые из них.

1. Широтная зависимость унитарной вариации

Выражение (1.3) и представление о влиянии солнечной (в основном волновой) радиации на проводимость атмосферы позволяют качественно объяснить известные широтные зависимости средних значений электрических полей (с максимумом в умеренных широтах) неоднородностью эффективной высоты нижней границы h_3 электросферы: с увеличением уровня верхней границы тропосферы к экватору h_3 растет, а E падает; с увеличением углов освещения атмосферы Солнцем к более высоким широтам условия для ионизации воздуха становятся менее благоприятными.

2. Вариации с максимумом в местный полдень и местное лето

Соотношение (1.3) позволяет предвидеть наблюдаемые в ряде случаев вариации ЭП с максимумами в местный полдень (в суточном периоде) и местное лето (в годовом периоде), что объясняется снижением эффективной высоты электросферы при уменьшении зенитного угла освещения Солнцем местной атмосферы. Эта вариация должна наиболее четко проявляться на пиках гор, где вертикальное расстояние до электросферы минимально. Она наблюдается, в частности, при измерениях суточных вариаций на склоне Эльбруса [18] и согласуется с суточными вариациями электронной плотности в ионосфере [16], которая характеризует ход проводимости в этой области (рис. 1.6).

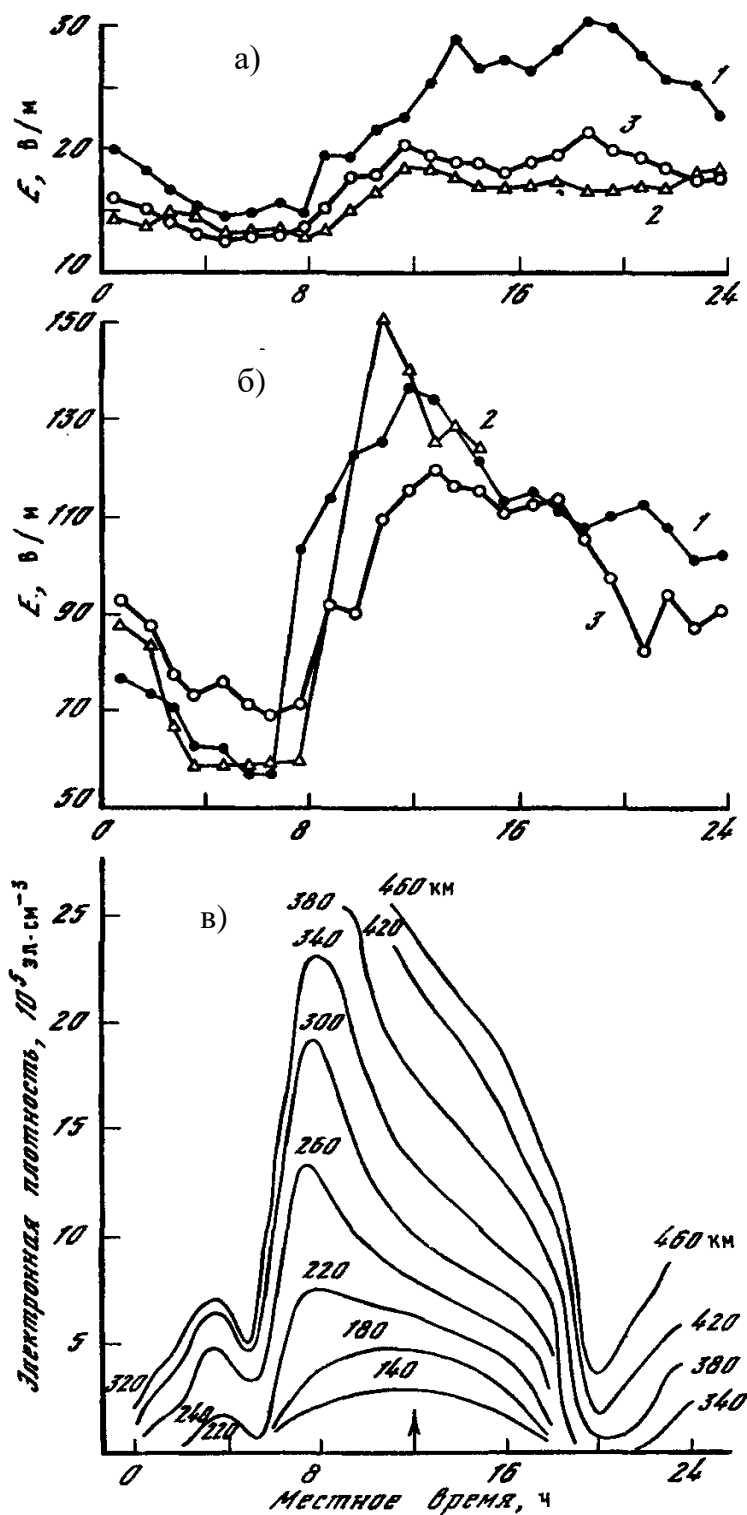


Рис. 1.6. Суточные вариации напряженности электрического поля, усредненные за годы 1957 (1), 1958 (2), 1959 (3), в районе Эльбруса [18] (а, б) и пример суточных вариаций концентраций электронов в ионосфере [19] (в); а – долина Азау; 2140 м над уровнем моря; б – пик Терскол

3. Рост напряженности электрического поля после восхода Солнца

С позиции океанической модели наблюдаемый рост поля в утренние часы над сушей может быть обусловлен двумя причинами: понижением эффективной высоты электросферы при освещении атмосферы Солнцем над точкой наблюдений и повышением скорости испарения влаги с земной поверхности. Аналитически рост напряженности поля в этот период выражается с учетом (1.2) соотношением

$$\frac{dE}{dt} = 4\pi \left(\alpha \frac{dm}{dt} - \lambda_0 E \right) + \frac{d}{dt} \left(\frac{\bar{\lambda} \varphi_3}{\lambda_0 h_3(t)} \right),$$

где $\frac{dE}{dt}$ – скорость испарения воды с единицы площади; $\alpha = 2 \cdot 10^{-10} \text{ Кл} \cdot \text{г}^{-1}$ [9].

Если принять $\frac{dm}{dt} = 3 \cdot 10 \text{ г} \cdot (\text{см}^2 \cdot \text{с})^{-1}$ (что обычно реализуется в естественных условиях), то скорость роста напряженности электрического поля за счет испарения воды может составить $0,4 \text{ В} \cdot (\text{м} \cdot \text{с})^{-1}$. Этой величины достаточно для количественного объяснения эффекта восхода Солнца.

4. Пульсации электрического поля

Как отмечено выше, пульсации электрического поля в безоблачную погоду могут быть вызваны причинами как местного, так и *глобального* масштабов. Однако до настоящего времени остается открытым вопрос о механизмах действия космических факторов, которые могут быть причиной корреляции электрических и геомагнитных пульсаций типа $P_c 2 - 4$, наблюдающихся у поверхности Земли в средних широтах [20].

Если считать доказанным, что причиной геомагнитных пульсаций является неустойчивость окружающей Землю космической плазмы, то установление корреляционной связи электрических и магнитных пульсаций дает основание для заключения о наличии у поверхности Земли космической компоненты электрического поля.

Механизм, обуславливающий корреляцию одновременных изменений электрического и магнитного полей, можно гипотетически построить в рамках океанической модели. Ввиду существенно неоднородного распределения акваторий на земной сфере положительные объемные заряды слоя обмена над акваториями и отрицательные заряды, индуцированные на испаряющейся водной поверхности, могут

быть аппроксимированы совокупностью диполей с моментами порядка $10^8 - 10^9$ Кл · м, которые способны создавать на расстояниях до 1 – 2 земных радиусов в магнитосфере ЭП напряженностью $10^{-2} - 10^{-1}$ В/м.

Эти крупномасштабные поля ввиду детального характера не могут быть полностью экранированы в ионосфере и требуют для своей компенсации объемного распределения зарядов за ее пределами, т. е. в магнитосфере. Существование дипольного периодически изменяющегося поля в магнитосфере от источника в тропосфере должно приводить к ряду эффектов, а именно:

- к ускорению заряженных частиц вдоль силовых линий магнитного поля на расстояниях, сравнимых с земным радиусом, до энергии порядка 10 – 100 кэВ;
- накоплению объемных зарядов в магнитных оболочках магнитосферы до состояния, обеспечивающего их эквипотенциальность, и образованию компоненты ЭП у земной поверхности от объемных зарядов в магнитосфере;
- дрейфу накопленных объемных зарядов в скрещенных электрическом и магнитном полях и возникновению вследствие этого электрических токов, создающих у земной поверхности компоненту магнитного поля (МП).

В этих условиях изменяющаяся во времени деформация магнитосферы солнечным ветром должна приводить к перераспределению в ней объемных зарядов и, следовательно, к одновременным пульсациям электрического и магнитного полей.

Приведенная качественная картина, возможно, не является единственной причиной корреляции электрических и магнитных пульсаций, однако для развития исследований в этой важной области она, с нашей точки зрения, может быть плодотворной.

Таким образом, анализ фактического материала приводит к заключению, что эффект разделения зарядов при испарении воды с поверхности акваторий, турбулентный перенос объемных положительных зарядов над земной поверхностью, периодическое изменение степени ионизации верхних слоев атмосферы под действием солнечного излучения можно назвать основными процессами в формировании унитарных вариаций ЭП атмосферы. Изменение метеорологических условий (облака, осадки и т. д.), а также антропогенные источники вызывают дополнительные локальные изменения поля у поверхности

Земли. Пульсации электрического поля в безоблачную погоду вызываются переносом объемных зарядов воздухом в окрестности точки измерения и, возможно, быстрыми изменениями электрического состояния атмосферы в глобальном масштабе.

Задача дальнейших исследований в области атмосферного электричества состоит в разработке методики выделения из общей совокупности полей у земной поверхности компонент от различных источников, в изучении морфологии и закономерностей их изменений и в создании на основе этого количественной теории работы глобальных и локальных источников электрических полей.

Библиографические ссылки

1. Izrael H. R. Stmosphariche Electrizaritat. Leipzig : Akad. Verl., 1961. 503 p.
2. Парамонов Н. А. О годовом ходе градиента атмосферно-электрического потенциала // Доклады АН СССР. 1950. Т. 71. № 1. С. 31 – 40.
3. Лободин Т. В. О связи унитарной вариации градиента атмосферно-электрического потенциала с грозовой деятельностью // Геофизический бюллетень МГК при Президиуме АН СССР. 1963. № 13. С. 34 – 37.
4. Красногорская Н. В. Атмосферно-электрические измерения в районе Эльбруса // Физика облаков и осадков. М. : Изд-во АН СССР, 1961. С. 127 – 133.
5. Красногорская Н. В., Ремизов В. П. О некоторых результатах измерения вариаций электрического поля Земли // Доклады АН СССР. 1973. Т. 212. № 2. С. 345 – 348.
6. Brooks C. E. P. The distribution of thuristorms over the globe // Geophys. Met. 1925. № 24. 242 p.
7. Каземир Г. Грозное облако. Проблемы атмосферного электричества. Л. : Гидрометеиздат, 1969. С. 146 – 165.
8. Krumm H. C. Die Weltzeitliche Tagesgangder Gewitter hantigkeit // Zitschr. Geophys. 1962. Bd. № 2. P. 85 – 104.
9. Герасименко В. И. К вопросу о причинах унитарной вариации электрического поля атмосферы // Ученые записки Ленинградского высшего инженерного морского училища им. адм. Макарова. 1958. Вып. 10. С. 79 – 84.

10. Герасименко В. И. Годовые вариации электрического поля атмосферы и планетарной неоднородности освещенной поверхности Земли // Труды ГГО. 1974. Вып. 323. С. 137 – 142.
11. Похмельных Л. А. О существовании электризации воды при испарении // Труды ЦАО. 1980. Вып. 142. С. 109 – 120.
12. Он же. О механизме регенерации положительных зарядов земной атмосферы // Анализ современных задач в точных науках. М. : РУДН, 1973. С. 149 – 156.
13. Latham J., Stow C. D. Electrification of evaporation of ice crystals // Tokyo Conf. Tokyo. 1965. P. 352 – 356.
14. Allier I., Lafargue C. Electrification de gouttes de solutions salines aqueuses par évaporation ou par condensation de la vapeur d'eau // J. rech. atoms. 1977. Vol. II (2). P. 121 – 139.
15. Krasnogorskaya N. V., Pokhmelnikh L. A. On the origin of variation of the electric field of the Earth's atmosphere // In[^] Intern. Conf. on Atmos. Electricity. Manchester. 1980.
16. Israel H., Knopp R. Problem der Ladungsbildung beim Verdampfen // Arch. Meteorol., Geophys. And Bioklimatol. 1962. Vol. A 13. P. 199 – 206.
17. Azad A. K., Latham J. Electrification associated with the evaporation of water and ionic solutions // J. Atmos. and Terr. Phys. 1967. Vol. 29. № 11. P. 1403 – 1410.
18. Красногорская Н. В. Электричество нижних слоев атмосферы и методы его измерения. Л. : Гидрометеоиздат, 1972. 322 с.
19. Ван Зант Т., Кнехт Р. Строение и физика верхней атмосферы. Космическая физика / под ред. Д. П. Ле Гелли, А. Розена. М. : Мир, 1966. С. 155 – 220.
20. Красногорская Н. В., Ремизов В. П. Вариации электрического поля атмосферы Земли // Физико-математические и биологические проблемы действия электромагнитных полей и ионизации воздуха. М. : Наука, 1975. Т. 1. С. 49 – 56.
21. Блюх П. В., Николаенко А. П., Филиппов Ю. Ф. Глобальные электромагнитные резонансы в полости Земля – ионосфера. Киев : Наук. думка, 1977. 199 с.
22. Чалмерс, Дж. А. Атмосферное электричество. Л. : Гидрометеоиздат, 1974. 420 с.

1.1.2. Электромагнитное поле атмосферы Земли инфранизкочастотного диапазона

Исследования физики верхних слоев атмосферы при помощи ракет и спутников открывают новые возможности в решении проблемы установления причин временных изменений ЭП. Изучение потенциала Земли по отношению к космическому пространству и его вариаций в связи с процессами на Солнце и другими крупномасштабными геофизическими явлениями, а также дальнейшее развитие методов диагностики свойств магнитосферной плазмы по наземным данным требуют постановки и проведения комплексных экспериментов по измерению пульсаций электрических и магнитных полей.

Возмущения электрических параметров тропосферы (градиента потенциала, объемных зарядов и тока проводимости) изучались ранее в связи с метеорологическими условиями [1, 2]. В возмущенных условиях погоды пульсации электрического поля и тока определяются перемещением в пространстве зарядов, носителями которых считаются частицы облаков, осадков, тумана. Но пульсации тока проводимости и электрического поля существуют и в безоблачную погоду.

Механизмы возмущения электрических параметров тропосферы наряду с другими причинами обусловлены атмосферной турбулентностью и содержанием аэрозоля [3], что приводит к образованию областей с различной проводимостью и формированию объемных зарядов, так что пульсации атмосферно-электрических величин должны рассматриваться как результат процесса атмосферного обмена. Характерный период пульсаций, рассматриваемых в работе [3], составляет более 300 с. Пульсации атмосферно-электрических параметров существуют и при меньших периодах – от сотен до единиц секунд. За этой областью частот следуют пульсации, вызванные грозовыми разрядами.

Физической предпосылкой для постановки экспериментальных исследований связи электрических и магнитных вариаций ЭМП атмосферы Земли послужил сложный комплекс явлений взаимодействия магнитосферы Земли с потоками солнечной плазмы (солнечным ветром). Как результат этих процессов в наземных условиях регистрируются геомагнитные пульсации в диапазоне частот меньше 5 Гц [4]. Обнаружен также ряд экспериментальных фактов, указывающих на связь пульсаций градиента потенциала ЭП тропосферы с авроральной активностью [5, 6].

Исследование корреляционных связей пульсаций электрического и магнитного полей основывается на предположении, что волновые процессы, обусловленные электродинамическими явлениями в магнитосфере и ионосфере, являются источниками единого электромагнитного поля в тропосфере. Электромагнитное поле пульсаций при наблюдениях на поверхности Земли может быть аппроксимировано плоской неоднородной волной, что связано с одновременным существованием шести компонент естественного ЭМП [7]. Вследствие горизонтального распространения пульсаций ЭМП (которое для магнитных компонент обнаружено экспериментально) волновой вектор плоской неоднородной волны имеет горизонтальную проекцию. Поэтому ряд закономерностей временного и пространственного поведения возмущений магнитного и электрического полей тропосферы может быть общим. Однако полное совпадение морфологических характеристик электрических и магнитных пульсаций невозможно, так как условия распространения в волноводе Земля – ионосфера электрических и магнитных составляющих электромагнитного поля Земли определяются различными факторами. Следовательно, попытка провести общую классификацию электрических и магнитных пульсаций не оправдана, тем более что на характер электрических пульсаций в тропосфере оказывает влияние ряд дополнительных факторов не только в возмущенную погоду (изменение объемного заряда частиц облаков, осадков, тумана и пр., не влияющих на магнитные компоненты), но и в безоблачную погоду (турбулентный перенос объемных зарядов, обусловленных источниками аэрозольных загрязнений, влажностью, процессами испарения и конденсации и т. д.).

Рассматривается проблема вариации электрического поля атмосферы Земли в диапазоне периодов от годовых и суточных до короткопериодных пульсаций электрического поля, генерируемых различными источниками как глобального, так и местного масштабов. Мы же проанализируем спектральные характеристики синхронных измерений магнитных и электрических пульсаций в диапазоне частот от 0,002 до 0,2 Гц.

Измерения пульсаций вертикальной составляющей электрического поля выполнялись динамическим полимером, частотная характеристика которого выбиралась близкой к частотной характеристике магнитометра, регистрировавшего горизонтальные составляющие геомагнитного поля. H_x и H_y измерения проводились в период 1972 – 1976 гг. в средних широтах (г. Борок, Ярославская обл. и с. Михайловское, Московская обл.) [8].

Примеры временных реализаций составляющих электрического и магнитного полей E_z , H_x , H_y в безоблачную погоду приведены на рис. 1.7.

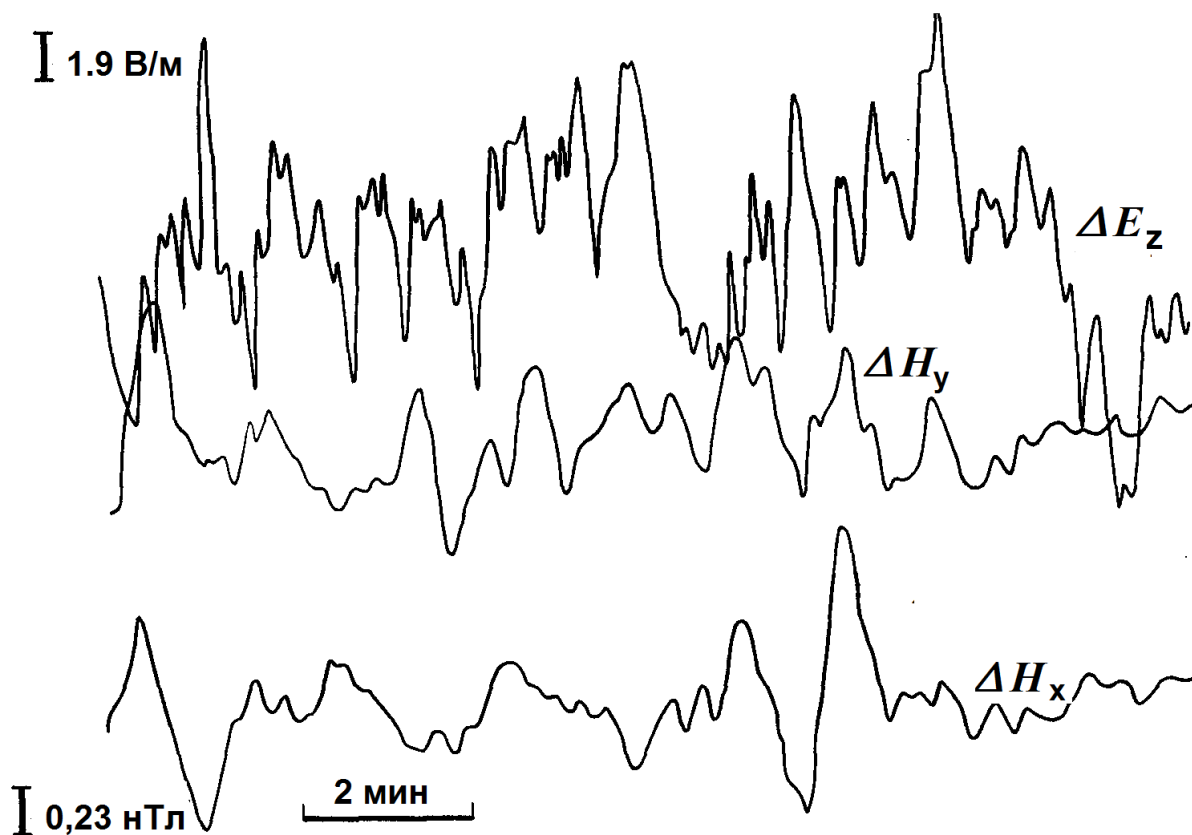


Рис. 1.7. Пример временных реализаций электрических E_z и магнитных H_x и H_y составляющих пульсаций (г. Борок, Ярославская обл.)

1.1.3. Спектральные характеристики электрического поля пограничного слоя атмосферы

Для вычисления оценок корреляционной функции и частотного спектра длина реализации выбиралась обычно равной 60 мин. Аналоговые записи дискретизировались с интервалом Δt , равным 2,4 с. Величина интервала дискретизации Δt выбиралась с учетом резкого спада частотной характеристики использованных электрических фильтров для периодов меньше 5 с. Максимальная частота $f_N = 1/2\Delta t$, для которой вычислены спектральные оценки, равна в нашем случае 0,21 Гц. Сглаженные оценки спектральной плотности $S(f)$ получены при использовании корреляционного окна Тьюки, ширина полосы частот которого l равна [9]: $l = 1,333 \cdot m^{-1}\Delta t^{-1}$, где m – число точек корреляционной функции.

Несмотря на то что оценки спектральной плотности получены с интервалом $\Delta f = 1/2\Delta t$, разрешение по частоте вследствие сглаживания

определяется расстоянием между двумя некоррелированными оценками $S(f)$ и равно ширине полосы частот спектрального окна. Таким образом, все особенности частотных спектров магнитных и электрических пульсаций можно считать статистически обоснованными, если их ширина больше или сравнима с шириной полосы частот спектрального окна. Для устранения низкочастотных трендов и связанных с ними искажений спектра исходные реализации подвергались предварительной частотной фильтрации. Цифровой фильтр задавался в виде

$$x_i = \frac{1}{2p} \sum_{q=0}^{2p} x_{i+q} \left[1 + \cos \frac{\pi(q-p)}{p} \right], \quad 1 \leq i \leq N - 2p,$$

где x_i – сглаженный ряд; x_i – исходный ряд; p – параметр фильтра; N – число точек исходной реализации.

Результаты фильтрации вычитались из исходного ряда x_i , находился пульсационный ряд $x_i' = x_{i+p} - x_i$, длина которого равна $N - 2p$ точек; i – номер точки. Параметр p принимался равным 75. Оценки спектральной плотности в области низких частот были выполнены с учетом частотной характеристики фильтра.

Сглаженные спектральные оценки спектральной плотности являются случайными величинами, плотность вероятности которых имеет χ^2 -распределение ν степенями свободы, и требуют определения доверительных интервалов. Число степеней свободы ν сглаженных спектральных оценок при использовании окна Тьюки равно [9]: $\nu = 2,667 N/m$.

Доверительные интервалы с требуемой вероятностью при известных ν находятся по таблицам χ^2 -распределения (в нашем случае доверительный интервал с вероятностью 0,95).

Длина отобранного для обработки ряда составляла 1500 точек, а длина корреляционной функции задавалась в интервале от 100 до 200 точек. Ширина спектрального окна изменялась соответственно от 0,0056 до 0,0020 Гц, а число степеней свободы – от 20 до 40. Таким образом, по часовым реализациям при выбранной длине корреляционной функции можно получить частотные спектры электрических и магнитных пульсаций в диапазоне периодов от 5 до 480 с.

Типичные частотные спектры электрических и магнитных пульсаций приведены на рис. 1.8. Как следует из графиков, в экспериментальных спектрах можно выделить два участка. В области частот $0,025 < f \leq 0,15$ Гц зависимость спектральной плотности аппроксимируется степенной функцией $S(f) \sim f^{-n}$, где величина n близка к 4.

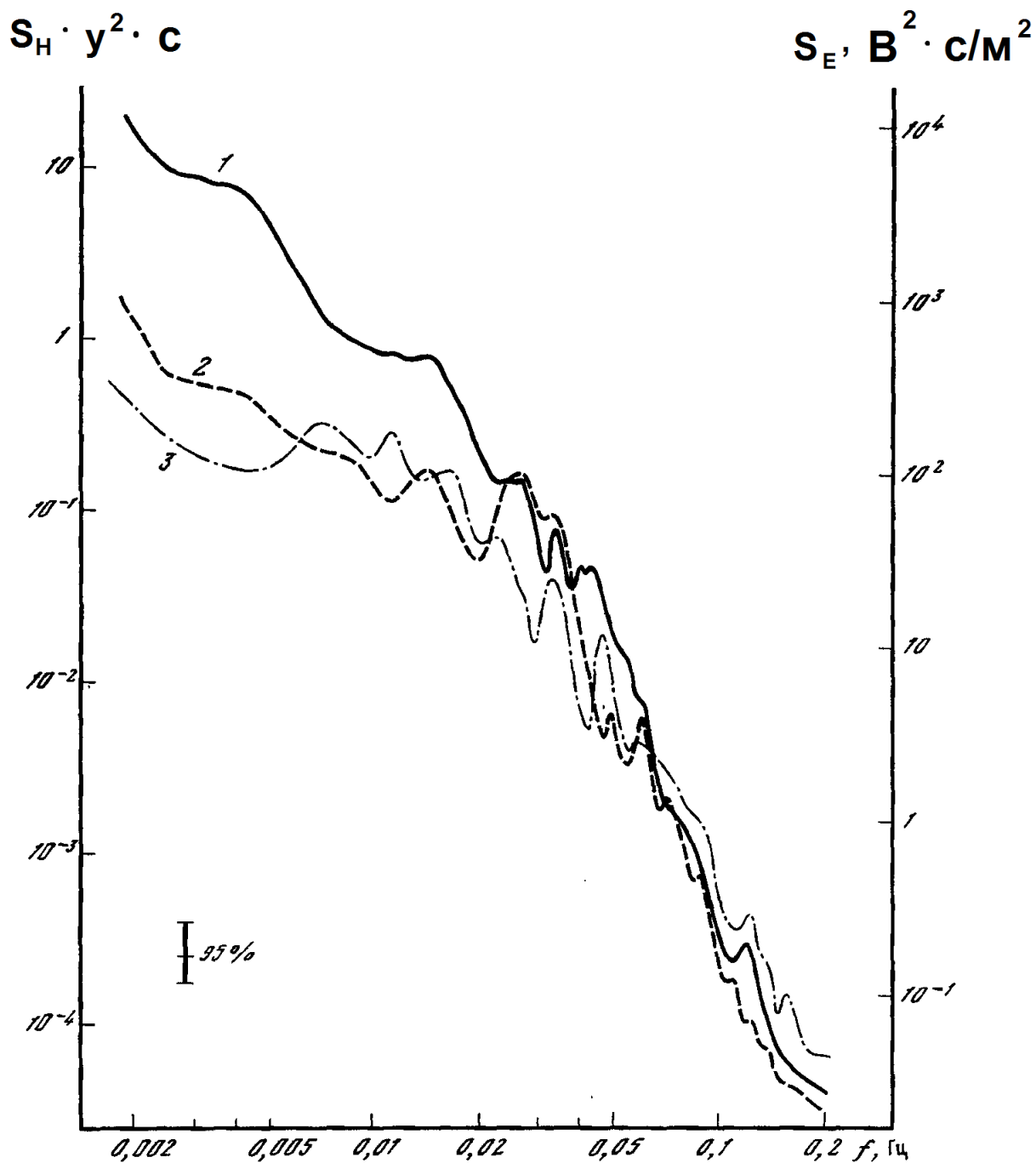


Рис. 1.8. Спектральные плотности энергии магнитных H_x и H_y (кривые 1, 2) и электрической E_z (кривая 3) составляющих электромагнитного поля Земли инфранизкочастотного диапазона

Характерной особенностью спектральных кривых в этом диапазоне частот являются отчетливо выраженные пики, которые достаточно хорошо разрешены по частоте. В области частот ниже 0,025 Гц наклон спектральных кривых уменьшается. Однако выбор аппроксимирующей функции затруднителен, так как для этого необходимо знать поведение спектров на более низких частотах. Наличие пиков в спектрах электрических и магнитных составляющих отражает, возможно, природу возбуждения ЭМП [9, 10].

Следует отметить, что наиболее мощные пики в спектрах электрических и магнитных составляющих совпадают по частоте: 0,014, 0,025, 0,032, 0,05 Гц. Поэтому представляет интерес определение степени взаимосвязи между этими процессами. Коэффициент взаимной корреляции H_x и H_y достаточно высок и достигает 0,8. Коррелированность электрических и магнитных пульсаций значительно ниже и не превышает 0,3, что указывает на слабую статистическую связь этих процессов или на нелинейный механизм их взаимодействия.

Итак, исследования по большим реализациям корреляционной связи между вертикальной электрической и горизонтальными магнитными компонентами электромагнитного поля в диапазоне частот 0,01 – 0,1 Гц приводят к заключению об отсутствии линейной зависимости между геомагнитными и электрическими компонентами электромагнитных полей в указанном диапазоне частот (если не ограничиваться при обработке лишь теми участками записи, где корреляция наблюдается визуально). Полученный вывод находится в соответствии с предположением о том, что электрическая и магнитная компоненты электромагнитной волны подвергаются влиянию физических факторов неодинаковой природы, что ослабляет ожидаемую корреляционную зависимость.

Синхронные измерения электрических и магнитных пульсаций в нескольких пунктах на различных широтах будут способствовать более точному определению глобальной электрической компоненты электромагнитного поля.

Библиографические ссылки

1. Тверской П. Н. Атмосферное электричество. Л. : Гидрометеопиздат, 1949. 252 с.
2. Красногорская Н. В. Электричество нижних слоев атмосферы и методы его измерения. Л. : Гидрометеопиздат, 1972. 323 с.

3. Izrael H. Die luftelektris cheunruhe // Ztschr. Geophys. 1958. Bd. 24. № 4/5. P. 277 – 283.
4. Пудовкин М. И., Распопов О. Н., Клейменова Н. Г. Возмущения электромагнитного поля Земли. Л. : Изд-во ЛГУ, 1976. Ч. 2. 270 с.
5. Olson D. E. The evidence for aural effects on atmospheric electricity // Geophys. 1971. Vol. 84. № 1. P. 118 – 138.
6. Авроральные эффекты в медленных вариациях и короткопериодических колебаниях градиента потенциала атмосферного электричества магнитосферного происхождения / И. А. Жулин [и др.] // Геомагнетизм и аэрономия. 1977. № 5. С. 879 – 884.
7. Липская Н. В. О выборе модели естественного переменного электромагнитного поля // Известия АН СССР. Физика Земли. 1978. № 12. С. 60 – 71.
8. Красногорская Н. В., Ремизов В. П. О некоторых результатах измерения вариаций электрического поля Земли // Доклады АН СССР. 1973. Т. 212. № 2. С. 345 – 349.
9. Дженкинс Г., Ватс Д. Спектральный анализ и его приложения // М. : Мир, 1971. Т. 1. 316 с. ; Т. 2. 287 с.
10. Davidson M. J. Average diurnal characteristics of geomagnetic power spectrums in the period range 4.5 to 1000 seconds // JGR. 1964. Vol. 69. № 23. P. 5116 – 5119.

1.1.4. Геомагнитные поля и их вариации

Исследования влияния ЭМП на биосферу продолжаются. Пока еще не ясно, какие именно участки спектра геомагнитных или геоэлектрических вариаций более биоэффективны и каковы энергетические соотношения геофизических и биологических явлений. В связи с этим представляется необходимым наряду с результатами исследований по проблеме электромагнитобиологии дать краткий обзор сведений о геомагнитных пульсациях ГМП, наблюдаемых на поверхности Земли и в околоземном пространстве.

Геомагнитное поле Земли складывается из двух частей различной природы: очень медленно меняющейся, почти постоянной, источники которой расположены собственно внутри Земли, и переменной, генерируемой электрическими токами, текущими в ионосфере и магнитосфере. Напряженность переменной части поля составляет не более 2 % от части внутреннего происхождения.

ГМП в грубом приближении подобно полю однородно намагниченного шара с магнитным моментом $M = 2,7 - 10^{12}$ А/м² и осью, наклоненной к оси вращения Земли на угол $\sim 11,5^\circ$. Геомагнитные полюсы расположены в точках с координатами $11,5^\circ$ с. ш., 290° в. д. и $11,5^\circ$ ю. ш., 110° в. д. Распределение ГМП в пространстве обычно характеризуют тремя магнитными элементами: горизонтальной составляющей $H_r = \sqrt{H_x^2 + H_n^2}$ наклонением J (углом между направлением вектора поля $H = \sqrt{H_x^2 + H_n^2}$ и горизонтальной плоскостью) и склонением D (углом между направлениями на геомагнитный и географический полюсы) или тремя прямоугольными составляющими: $H_x = H_r \cos D$ (направлена на географический север), $H_y = H_r \sin D$ (на восток) и $H_z = H_r \tan J$ (вертикально вниз). Соотношения между магнитными элементами и прямоугольными составляющими даны на рис. 1.9.

Величины магнитных элементов на поверхности Земли изменяются от $J = 90^\circ$, $H_r = 0$, $H_z = 0,065$ мТл на северном геомагнитном полюсе до $J = -90^\circ$, $H_r = 0$, $H_z = -0,065$ мТл на южном; в районе геомагнитного экватора проходит через нуль, а H_r достигает наибольшей величины $0,032$ мТл. Склонение D , обусловленное несовпадением геомагнитных и географических полюсов, в средних и низких широтах невелико (несколько градусов), а в высоких может достигать любых величин, вплоть до 180° . При удалении от поверхности Земли ГМП уменьшается примерно обратно пропорционально r^3 , где r – геоцентрическое расстояние данной точки.

Действительное пространственное распределение ГМП много сложнее: в северном и южном полушариях геомагнитное поле не

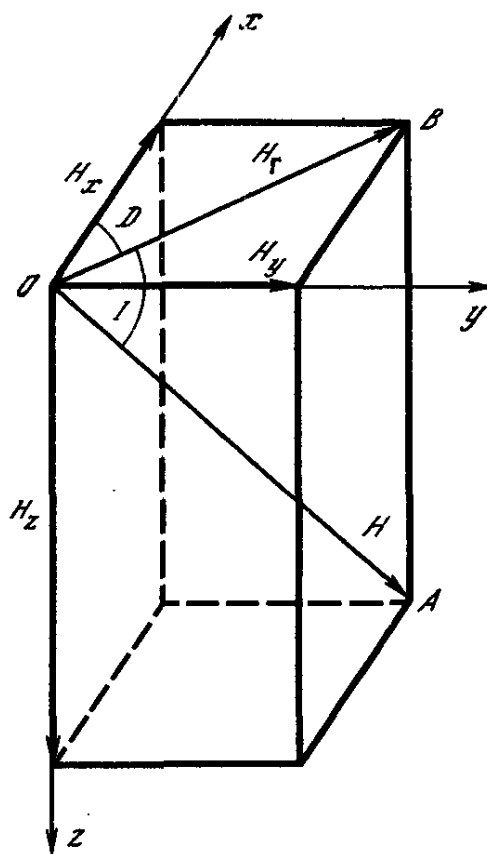


Рис. 1.9. Элементы земного магнетизма

вполне тождественно, существуют области повышенных или пониженных значений магнитных элементов – магнитные аномалии. Магнитные аномалии очень разнообразны по размерам, интенсивности и конфигурации. Наиболее крупные из них соизмеримы с материками (материковые), наиболее мелкие имеют протяженность от единиц до сотен километров (локальные и региональные). На рис. 1.10 представлена схема распределения ГМП, заимствованная из [1]. В связи с малым масштабом карты распределение на ней ГМП настолько сглажено, что проявляются лишь материковые аномалии.

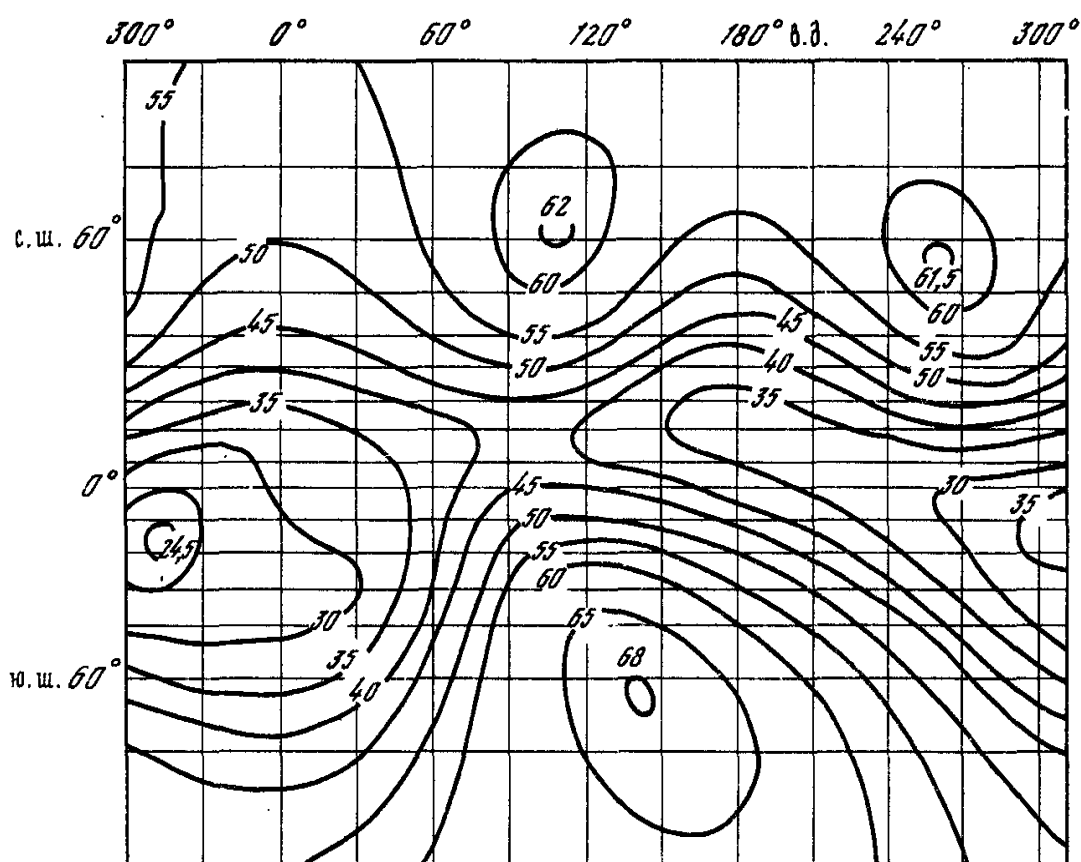


Рис. 1.10. Изодинамы модуля полного вектора H для эпохи 1975 г. [1].

Цифры у кривых – значения \vec{H} в 10^3 нТл

Региональные и локальные аномалии вызываются намагничиванием неравномерно распределенных в земной коре горных пород, обладающих ферромагнитными свойствами. В целом они ответственны лишь за очень малую ГМП (~ 1 %), среднеквадратичная величина поля мелкомасштабных аномалий, осредненная по всей поверхности Земли, составляет ~ 200 нТл. Тем не менее поле отдельных аномалий, в осо-

бенности связанных с близким залеганием к поверхности больших рудных масс, может быть достаточно велико (превышать 0,11 мТл). Примером интенсивных локальных аномалий служит широко известная Курская аномалия.

Основная крупномасштабная часть ГМП (поле однородного намагничивания и материковых аномалий), называемая «главным» полем, создается электрическими токами, текущими во внешней жидкой части земного ядра, состоящего из расплавленных железоникелевых масс. Электрические токи индуцируются в результате конвективных движений высокопроводящих масс в первичном очень слабом поле, природа которого к настоящему времени не ясна. Этот механизм генерации ГМП подобен механизму создания поля в обычной динамо-машине. Существенным доводом в пользу динамо-теории ГМП является обнаружение магнитных полей у других планет, имеющих жидкие ядра (Юпитер, Меркурий, Венера). Измерения, выполненные на космических аппаратах, обнаружили сходство полей этих планет с земным полем: поля Юпитера и Меркурия в грубом приближении также являются полями однородного намагничивания с осями, близкими к осям вращения этих планет. Магнитное поле Луны малó по величине и определяется магнетизмом слагающих лунную кору пород.

Главное геомагнитное поле Земли меняется со временем как по величине, так и по конфигурации. Изменения ГМП (вековые вариации) включают в себя колебания с разными характерными временами: от немногих десятков лет (известны, например, 20-летние вариации) до десятков тысяч лет. Изучение ГМП за прошедшие годы и в прошлые геологические эпохи осуществляется архео- и палеомагнитными методами, суть которых заключается в следующем: изверженная горная порода, содержащая ферромагнитные компоненты, намагничивается, остывая в земном ГМП, и как бы «запоминает» его. Поэтому, измеряя магнитные свойства образцов горных пород, можно определить величину и направление ГМП в период их образования. Также намагничиваются во время обжига кирпичи или глиняная посуда, что позволяет изучать геомагнитное поле в разные исторические эпохи.

Первые инструментальные измерения склонения, начатые с развитием мореплавания в XV в., и измерения наклона (с XVII в.) вместе с археомагнитными исследованиями надежно обнаружили вариации ГМП с периодами порядка 60 лет и циклические изменения с

характерными временами в несколько сот лет (преимущественно 600 лет). Выявлены также и более длительные циклы, например, колебания геомагнитного поля продолжительностью 8 – 10 тыс. лет. Описанные вековые вариации ГМП находят объяснение в рамках динамотеории главного поля как результат изменений токовой системы земного ядра и, в частности, наличия в нем крупномасштабных волновых процессов – МАК-волн, т.е. волн, образующихся в результате непрерывного взаимодействия максвелловских, архимедовых и кориолисовых сил.

Палеомагнитные исследования позволили обнаружить исключительно интересное свойство ГМП – обращения полярности (инверсии) главного поля, которые многократно имели место в течение геологической истории Земли. Последняя изученная инверсия была в середине четвертичного периода (0,8 млн лет назад).

Теория динамо-механизма ГМП допускает возможность инверсий (существование двух равноправных решений уравнений, определяющих генерацию поля). Однако появление инверсий отнюдь не закономерно и рассматривается как стохастический процесс. Продолжительность периода инверсии ($\sim 10^4$ лет) обычно короче периода стабильного намагничивания. Большинство исследователей считает, что во время инверсии поле не исчезает полностью, а сильно уменьшается по величине и теряет свой регулярный характер.

Механизм инверсий окончательно еще не установлен. Во время некоторых инверсий можно проследить путь перемещения геомагнитного полюса из одного полушария через экватор в другое. Но каким бы ни был процесс обращения поля, он, вероятно, влияет на другие геофизические свойства и биосферу. В периоды обращения изменяются экранирующие свойства ГМП и проникновение к Земле заряженных частиц солнечного ветра, играющих большую роль в тепловом балансе земной атмосферы. Изучение длиннопериодных колебаний геомагнитного поля (включая инверсии) и их связь с изменением климата, вращением Земли и солнечной активностью привлекает в настоящее время внимание геофизиков.

Магнитные вариации внешнего происхождения состоят из нескольких типов полей, различающихся между собой спектральными, энергетическими и другими характеристиками. Условно эти вариации

можно разделить на следующие группы: медленные (циклические), периодические, возмущенные короткопериодные. Детальная классификация вариаций ГМП с указанием основных характеристик (продолжительности колебаний и амплитудных границ) дана в таблице.

Геомагнитные вариации на поверхности Земли

Тип вариаций	Обозначение	Период колебаний	В, нТл
Медленные вариации			
Вековые	V	Десятки и сотни лет	10 – 150
Циклические	C	11 лет	1 – 20
Периодические (спокойные) вариации			
Годовые	$У$	1 год	5 – 30
Лунносуточные	L	24 ч 50 мин	1 – 7
Солнечносуточные	S_q	24 ч	10 – 70
Возмущенные вариации			
Апериодические	D_{st}	10 – 200 ч	10 – 400
главная фаза		3 – 10 ч	10 – 400
начало фазы восстановления		6 – 12 ч	10 – 400
фаза восстановления		1 – 7 сут	100 – 10
Солнечносуточные	S_d	24 ч	10 – 400
Бухтообразные	B	0,5 – 3 ч	30 – 1000
Иррегулярные	I	5 – 60 мин	10 – 3000
Короткопериодные вариации, с			
Устойчивые	$P_c 1$	0,2 – 5	0,01 – 1
	$P_c 2$	5 – 10	0,1 – 10
	$P_c 3$	10 – 45	0,4 – 20
	$P_c 4$	45 – 150	0,5 – 25
	$P_c 5$	150 – 600	0,5 – 40
	$P_c 6$	> 600	1 – 100
Иррегулярные	$P_i 1$	1 – 40	0,03 – 2
	$P_i 2$	40 – 150	1 – 20
	$P_i 3$	150 – 400	5 – 100
	$P_i 4$	400 – 600	10 – 300

Солнечносуточные S_q и лунносуточные L -вариации ГМП изучены наиболее полно. Они создаются электрическими токами, индуцированными в ионосфере на высотах $\sim 90 - 120$ км в результате приливных движений ионизированных масс воздуха в магнитном поле Земли (ди-

намо-механизм). Зависимость ионизации (и, следовательно, электропроводности) воздуха от зенитного угла Солнца, а также регулярный суточный ритм солнечных и лунных приливных колебаний обуславливают строго периодический характер S_q - и L -вариаций (рис. 1.11). Суточные вариации невелики по амплитуде, закономерно меняются с географической широтой и временем года, возрастая к экватору и летом; они достаточно хорошо описываются несколькими первыми членами гармонического ряда $2C_n \cos(nt + -\alpha_n)$, где n – номер гармоники, t – местное время (солнечное или лунное). В S_q -вариациях наибольший член – суточный, в L -вариациях – полусуточный [2].

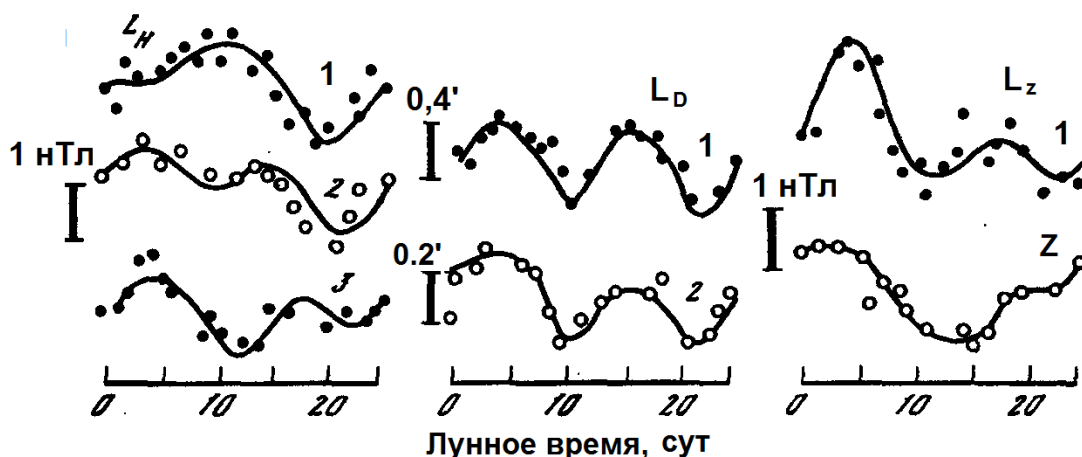
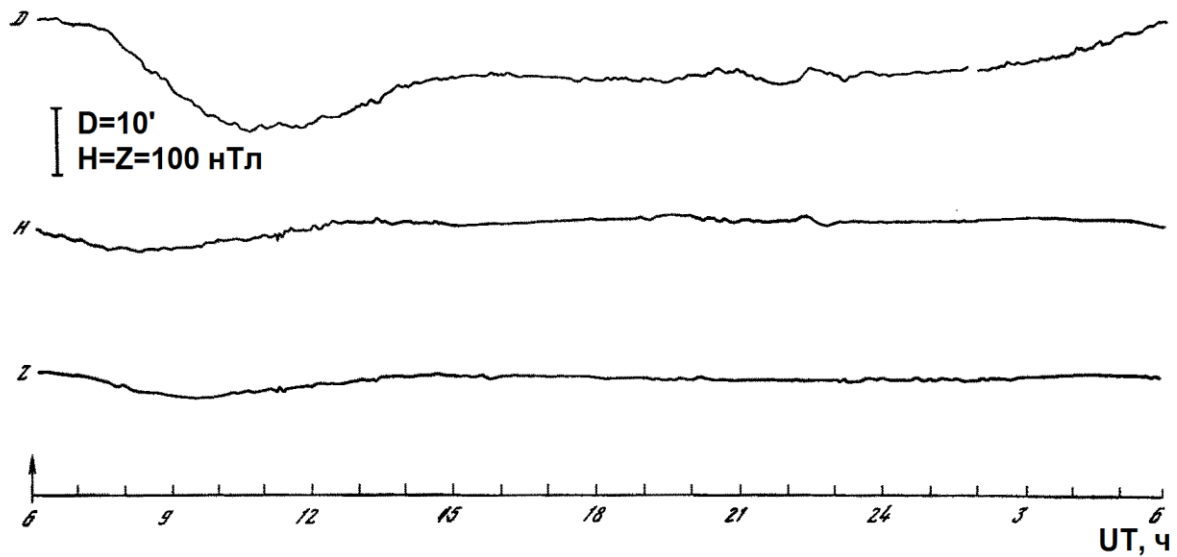


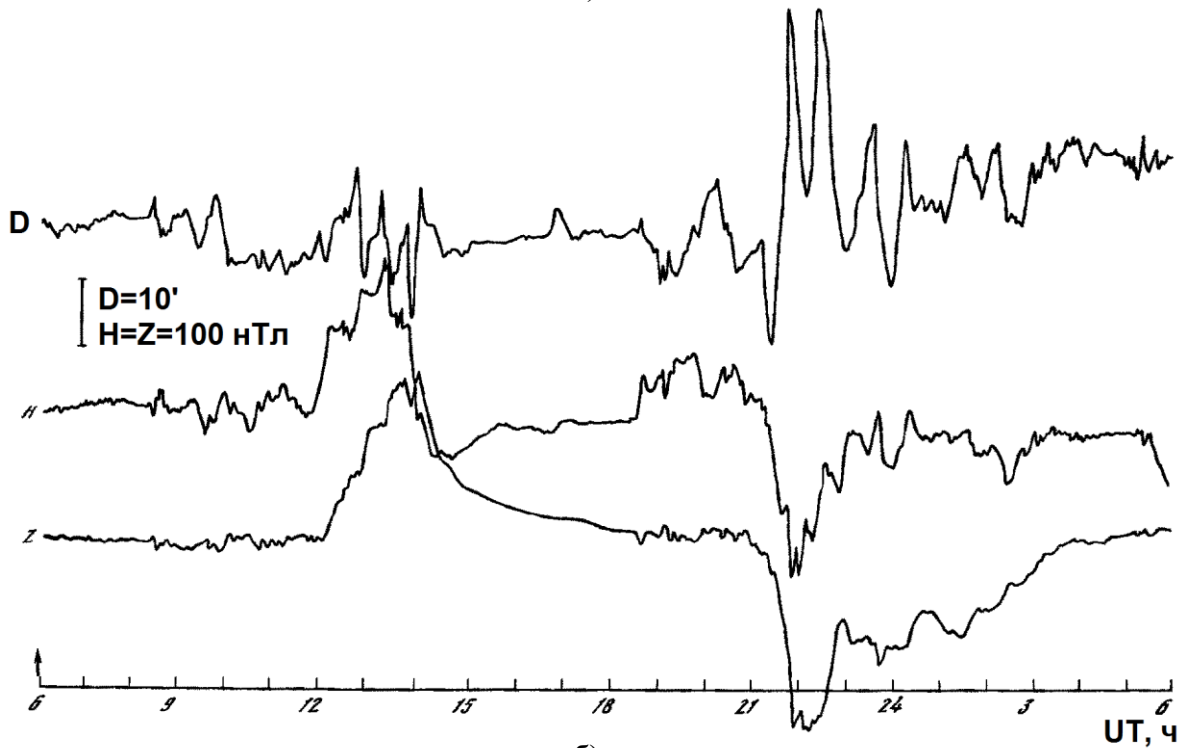
Рис. 1.11. Лунносуточные вариации магнитных элементов (L_H , L_D , L_Z), вычисленные по трем обсерваториям [2]: 1 – Тбилиси; 2 – Москва; 3 – Южно-Сахалинск

На рис. 1.12 представлены магнитограммы обсерватории Красная Пахра (Московская обл.) за двое суток. На рис. 1.12, а хорошо проявляются плавные изменения элементов поля (S_q -вариации), а рис. 1.12, б иллюстрирует сильное возмущение ГМП – магнитную бурю.

Во время бури колебания магнитных элементов иррегулярны, имеют часто большие амплитуды, особенно в высоких широтах, превышая иногда верхний предел 3000 нТл. Возмущенные вариации геомагнитного поля объединяют не только бури, но любые (разные по характеру и амплитуде) отклонения в ходе магнитных элементов от спокойного регулярного суточного хода. Несмотря на нерегулярность, хаотичность изменений ГМП во время возмущений и, в частности, в период бурь, к настоящему времени выявлены достаточно четкие морфологические закономерности этих явлений.



а)



б)

Рис. 1.12. Магнитограммы магнитных элементов H , D , Z обсерватории Красная Пахра (Московская обл.) для спокойного интервала 7 апреля 1978 г. (а) и во время магнитной бури 1 мая 1978 г. (б)

Прямые измерения показали, что Солнце непрерывно излучает поток разреженной плазмы – солнечный ветер (СВ), который, встречая на своем пути Землю с окружающим ее ГМП, образует полость, называемую магнитосферой. ГМП не проникает за границы магнитосферы, а солнечный ветер лишь частично проникает внутрь ее.

Положение границы магнитосферы определяется равенством давлений СВ и МП. Под давлением СВ силовые линии ГМП вытягиваются в антисолнечном направлении, образуя магнитосферный хвост. Плазменный слой хвоста и его центральная часть – нейтральный слой, где силовые линии разного направления приближаются друг к другу и ГМП очень мало, – играют важную роль в генерации магнитных возмущений. Плазменный слой всегда, даже в самых спокойных условиях, заполнен частицами высоких энергий. Некоторое количество частиц все время высыпается через «рога» плазменного слоя в ионосферу высоких широт, вызывая там электрические токи, текущие вдоль зоны полярных сияний и, следовательно, магнитные возмущения. Эта зона в любое время является наиболее возмущенной.

Во время солнечных возмущений потоки частиц солнечного ветра с возросшей энергией и плотностью диффундируют в нейтральный слой через далекую область хвоста, вызывая генерацию ЭП, усиление конвективных движений в магнитосфере, поступление частиц в высокие широты, полярные сияния и резкое возрастание силы электрических токов, создающих магнитные бури. Если усиление СВ непродолжительно и сравнительно неинтенсивно, то в магнитосферу проходит как бы один импульс, отражающийся в ГМП в виде единичного бухтообразного возмущения (суббуря по современной терминологии). Большие солнечные возмущения вызывают продолжительную интенсификацию солнечного ветра, в магнитосферу поступают импульсы один за другим, что приводит к последовательности суббурь, к их наложению. В целом последовательность суббурь составляет сложную картину большой магнитной бури.

Во время суббурь частицы солнечного ветра проникают во внутреннюю магнитосферу также через полярные каспы, образуемые силовыми линиями в приполюсной области на дневной стороне магнитосферы. Частицы, проникающие через касп, ответственны за «дневные» полярные сияния, усиление в дневном секторе полярной электроструи и магнитные возмущения. Геометрическое место внедрения частиц (из каспа – с дневной стороны и из нейтрального слоя – с ночной) можно назвать наиболее возмущенной зоной на поверхности Земли (авроральный овал).

Одновременно с проникновением частиц в высокие широты во время суббурь увеличивается также плотность частиц плазменного слоя, что приводит к усилению экваториального кольцевого тока. Кольцевой ток радиусом $3 - 5 R_3$ западного направления существует всегда и в спокойное время вносит небольшой вклад в главную часть ГМП. Во время большой магнитной бури (при массовых поступлениях частиц СВ) кольцевой ток сильно возрастает (до $10^6 - 10^7$ А), вызывая значительные понижения горизонтальной составляющей МП. Отдельные всплески суббурь, накладываясь один на другой и на общее понижение H_r , дают картину сложных колебаний, представленную на рис. 1.12, б.

Среди возмущенных вариаций магнитного поля наиболее характерной является аperiodическая вариация поля D_{st} , проявляющаяся особенно отчетливо в H_r (или X)-компоненте низкоширотных обсерваторий (рис. 1.13). В поведении D_{st} (H_r)-вариации обычно выделяют три фазы: начальную (небольшое усиление поля), главную (резкое понижение поля) и фазу восстановления (постепенный возврат поля к начальному состоянию).

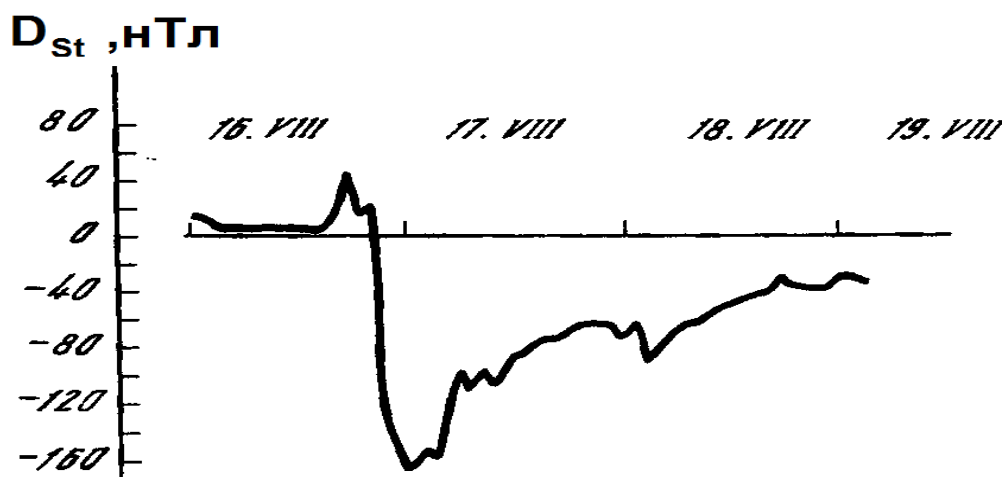


Рис. 1.13. Аperiodическая D_{st} -вариация магнитной бури 19.08.1970 г.

D_{st} -вариация на поверхности Земли считается суммарным полем трехмерной токовой системы, включающей токи на поверхности маг-

нитосферы, вдоль магнитных силовых линий, нейтрального слоя хвоста магнитосферы и магнитосферный кольцевой ток, который является преобладающим источником поля.

Магнитные суббури на поверхности Земли проявляются в виде бухтообразных возмущений и нерегулярных колебаний ГМП по преимуществу в зоне магнитной активности ($\sim 62 - 68^\circ$ геомагнитной широты). Они вызываются восточным и западным электроструйнными токами, образующимися во время магнитных суббурь в полярной ионосфере каждого полушария. Нерегулярные изменения поля вблизи экватора связаны с экваториальной ионосферной электроструей. Во время бури происходит также усиление токов в среднеширотной ионосфере, что отражается на возмущенных солнечносуточных вариациях S_d .

Исследования последних лет доказали, что для возникновения и развития магнитосферной бури большую роль играют не только плотность и скорость частиц СВ, но и межпланетное магнитное поле (ММП), уносимое потоком частиц из Солнца. Несмотря на небольшую величину этого поля (несколько нанотесл), от его направления зависит геоэффективность плазменного потока СВ. Установлено, что суббуря развивается в основном при повороте вертикальной компоненты ММП к югу (перпендикулярно плоскости эклиптики). Воздействие ММП на состояние магнитосферы объясняется механизмом присоединения на границе магнитосферы силовых линий ММП и ГМП. Выделяемая при этом энергия и служит, по-видимому, пусковым механизмом для генерации магнитосферной суббури. Кроме того, от направления азимутальной компоненты ММП зависят вариации в приполюсных областях, куда ММП имеет прямой доступ через каспы. Обнаружены также корреляции ММП с другими геофизическими явлениями, например, с состоянием ионосферы, некоторыми тропосферными процессами и т. д., что указывает на исключительно большое значение ММП в развитии физических явлений в околоземном пространстве (рис. 1.14).

Заканчивая описание магнитной бури, следует указать, что общая энергия, поступающая в магнитосферу во время бури, колеблется в пределах $10^{16} - 10^{17}$ Дж, поток энергии $\sim 10^{13}$ Дж · с. Это составляет $10^{-8} - 10^{-10}$ Дж от общей энергии волнового и корпускулярного излучений Солнца во время активных процессов.

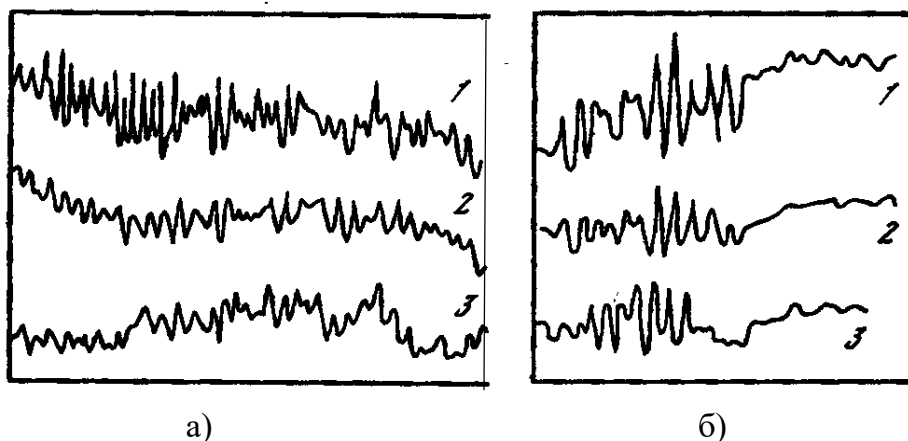


Рис. 1.14. Примеры пульсаций типа $P_c 4$ (а) и $P_i 2$ (б) полного вектора \vec{H} на сети станций: 1 – Лервик; 2 – Эскдалемюр; 3 – Хартленд

Изложенные выше представления о природе магнитных возмущений объясняют многие давно известные свойства возмущений, а именно [3]:

1) широтное распределение возмущенности с основным максимумом в зоне авроральной активности;

2) возмущенный суточный ход: в средних широтах один максимум приходится на вечерние часы, в полярных широтах имеются два максимума – утренний и вечерний;

3) сезонный (годовой) ход с максимумами в эпохи равноденствий, обусловленный тем, что Земля в течение года проектируется на различные гелиографические широты Солнца, а следовательно, на разные активные области;

4) 11-летний циклический ход, следующий за 11-летними колебаниями солнечной активности с запаздыванием максимумов магнитной активности на 1 – 3 года [4];

5) 27-дневную повторяемость магнитных возмущений, объясняющуюся 27-дневным синодическим периодом вращения Солнца;

6) запаздывание магнитных возмущений на 2 – 4 дня относительно прохождения активных областей на Солнце через центральный меридиан (определяется скоростью потоков СВ).

Эти закономерности, а также некоторые корреляционные связи магнитной возмущенности с другими гелио- и геофизическими явлениями получены не только путем анализа отдельных возмущений, но также путем статистических исследований магнитных характеристик,

т. е. числовых и балловых оценок возмущенности. В настоящее время для характеристики магнитной активности чаще всего употребляются индексы K , AE , D_{st} .

Индекс K – трехчасовая 10-балльная характеристика: 0 – совершенно спокойное поле, 9 – очень сильное возмущение. Баллы K -индекса даются в соответствии с амплитудой колебаний магнитных элементов, причем амплитудные шкалы для обсерваторий в разных широтных зонах подобраны так, чтобы по возможности распределения K -индексов сделать одинаковыми на всей мировой сети обсерваторий. Среднее значение K по нескольким субавроральным обсерваториям, определенное с точностью до 0,1 и обозначаемое K_p , является наиболее объективной мерой магнитной активности в планетарном масштабе. Для оценок активности суток в целом используются или $\sum K_p$, а также суммы $\sum a_p$, где a_p – приведенная амплитуда колебаний поля за трехчасовой интервал.

Индекс AE основан на амплитудах колебаний (расстоянии между верхней и нижней огибающими) записей поля в обсерваториях, расположенных на широтах зоны полярных сияний и равномерно распределенных по долготе. Индекс AE – мера активности полярных электроструй. Его можно представить с неограниченным временным разрешением, однако для практических целей используются 2,5-минутные и часовые значения.

В средних и низких геомагнитных широтах в качестве меры изменения поля часто используют среднечасовые значения горизонтальной составляющей поля отдельной обсерватории или индекс D_{st} , полученный осреднением значения H_r на 3 – 7 низкоширотных обсерваториях, распределенных более или менее равномерно по долготе. Использование магнитных характеристик дает возможность количественного оформления статистических закономерностей и связей (в том числе магнитобиологических).

Группа короткопериодных колебаний (КПК) по своей структуре и природе существенно отличается от рассмотренных выше макровозмущений. КПК объединяют вариации с периодами от долей секунд до 10 мин и более. Они разделяются на устойчивые периодические колебания P_c (рис. 1.14, a , b) и иррегулярные колебания P_i (рис. 1.14, b), которые, в свою очередь, делятся на подгруппы (см. таблицу) в зависимости от величины периода T (рис. 1.15) [4, 5].

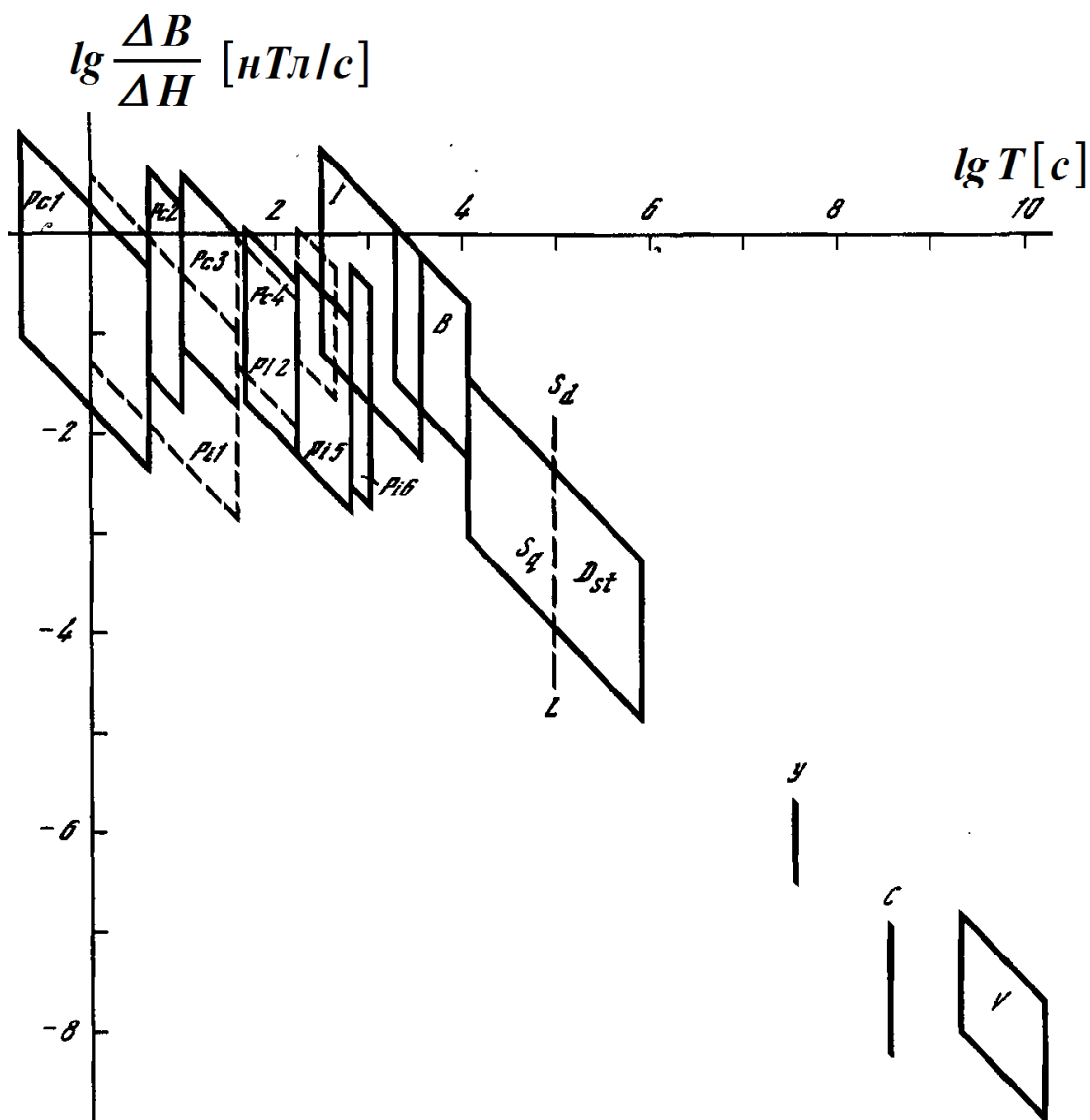


Рис. 1.15. Допустимые пределы скорости изменения ($\Delta B/\Delta t$) магнитного поля для вариаций различных периодов T

Амплитуды пульсаций, как правило, растут с увеличением периода. Некоторые типы КПК сопровождают магнитные возмущения и наблюдаются преимущественно в высоких широтах, тогда как другие генерируются исключительно при спокойном поле. Схематическая картина пульсаций во время различных фаз магнитной бури приведена на рис. 1.14.

Согласно современным представлениям генерация пульсаций связана с развитием кинетических и гидромагнитных неустойчивостей магнитосферной плазмы и плазмы солнечного ветра, а также с возбуждением резонансных процессов внутри магнитосферы.

Генерация P_c типична для возмущенных условий в магнитосфере. Иррегулярные пульсации по существу представляют собой элементы развития магнитосферной суббури. Их возбуждение происходит в довольно локализованных областях и сопровождается развитием других геофизических процессов. Генерация P_i -колебаний характеризует более крупномасштабные изменения структуры магнитосферы и в значительной мере реагирует на общепланетарное изменение возмущенности ГМП [5].

Частоты пульсаций P_c1 близки к гирочастотам протонов в экваториальной плоскости магнитосферы на оболочке более $4R_3$, поэтому можно полагать, что генерация P_c1 связана с развитием неустойчивостей протонов кольцевого тока в окрестности плазмопаузы. Механизм циклотронной неустойчивости в результате анизотропии распределения протонов по питч-углам обеспечивает необходимый частотный диапазон, а нелинейные эффекты обуславливают и динамический спектр P_c1 .

Пульсации P_c2 наблюдаются значительно чаще в полярной шапке, чем в авроральной зоне и средних широтах. При этом вблизи геомагнитных полюсов генерация P_c2 регистрируется при низком уровне магнитной активности, а в средних широтах – в условиях повышенной возмущенности. При возрастании возмущенности ГМП область максимальных амплитуд смещается из района геомагнитных полюсов в более низкие широты, оставаясь, по-видимому, в полярной шапке или в авроральной зоне. Следовательно, можно полагать, что источник P_c2 расположен в хвосте магнитосферы.

Геомагнитные пульсации P_c3 и P_c4 – самые распространенные пульсации, регистрируемые на поверхности Земли, они зависят от уровня магнитной активности, параметров плазмосферы и кольцевого тока. Так, параметры пульсаций P_c3 тесно связаны с изменением структуры плазмосферы, а P_c4 – с процессами распада кольцевого тока. В высоких широтах несомненна связь возбуждения P_c3 и P_c4 с модуляцией потоков авроральной плазмы.

Пульсация P_c5 является следствием процессов дрейфа на дневную сторону и распада плазменных неоднородностей, содержащих авроральные энергичные частицы. Можно полагать, что возбуждения в послеполюденном секторе связаны с протонными неоднородностями,

дрейфующими на запад. Возможно также, что длиннопериодные пульсации в диапазоне P_c5 возбуждаются в области магнитопаузы.

Доведение высокоширотных длиннопериодных пульсаций P_c6 различно в дневном и ночном секторах. Эти различия обусловлены тем, что дневной и ночной регионы полярной шапки проектируются в разные структурные области магнитосферы: в область дневного каспа и хвоста. Возбуждение ночных пульсаций связано с колебательным режимом хвоста магнитосферы, а источниками дневных пульсаций могут быть либо колебания поверхности магнитосферы, либо флуктуации солнечного ветра. В настоящее время пока нельзя однозначно определить, расположен источник пульсаций P_c6 на границе магнитосферы или в солнечном ветре.

В диапазоне иррегулярных пульсаций P_i1 выделяют несколько типов колебаний, различающихся по своим физическим свойствам: P_iB -пульсации типа шумовых всплесков, P_cC -колебания с преобладающим периодом 5 – 10 с, КУП-колебания с убывающим периодом и др. Генерация КУП наблюдается в области развития восточной авроральной электроструи (на фоне положительных бухт) и связана с развитием неустойчивости протонов в магнитосфере на фоне интенсивного развития асимметричной части кольцевого тока в вечернем секторе магнитосферы. Однако источники КУП расположены в области развития восточной электроструи, т. е. КУП составляют микроструктуру положительной бухты.

Области пульсирующих полярных сияний и генерация геомагнитных пульсаций P_iC непосредственно примыкают к экваториальной кромке овала полярных сияний или авроральной электроструи. Генерация пульсаций P_iC является следствием распада электронных форм сияний на отдельные структуры. Генерация P_iB во время суббури обычно сопровождает возбуждение P_i2 и происходит в областях, удаленных от экваториальной области магнитосферы. Местоположение источника P_i2 совпадает с силовыми трубками ГМП, в которых активно развиваются авроральные явления. Генерация P_i2 происходит на фоне широкого круга геофизических процессов, связанных в той или иной мере с развитием кинетических неустойчивостей магнитосферной плазмы: инжекцией электронов и протонов в полярную ионосферу, НЧ-излучением, пульсациями P_c1 и т. д.

Современные представления о структуре поля иррегулярных пульсаций в высоких широтах отражают существование по крайней мере трех видов колебаний в диапазоне P_i3 : P_{ip} – полярных иррегулярных пульсаций, $P_{сб}$ – пульсаций суббури, ilP_c – иррегулярных длинно-периодных пульсаций полярной шапки. Местоположение источника пульсаций P_{ip} связано с движущейся к полюсу выпуклостью полярных сияний во время взрывной фазы суббури. Максимум амплитуд пульсаций $P_{сб}$ приурочен к центральной части авроральной электроструи. Пульсации ilP_c связаны с проникновением колебаний, возбуждаемых на границе магнитосферы, в область дневного каспа.

Представленные в таблице сведения о продолжительности и величине всех перечисленных выше типов геомагнитных вариаций приводят к заключению, что магнитные вариации изменяются в исключительно широком диапазоне периодов (от $2 \cdot 10^{-1}$ до $2 \cdot 10^{10}$ с) и амплитуд (от $1 \cdot 10^{-2}$ до $3 \cdot 10^3$ нТл). Используя количественные значения периодов колебаний T и величин амплитуд B вариаций, приведенных в таблице, сделаны оценки скорости изменения поля $\Delta B/\Delta t$ для каждого типа вариаций.

На рис. 1.15 дана зависимость $\ln(\Delta B/\Delta t)$ от $\ln T$ в виде отрезков прямых (для строго периодических вариаций Y, L, S_q, S_d) или параллелограммов (для остальных вариаций), представляющих допустимые границы как по скорости изменения поля, так и по периоду. Из рис. 1.15 видно, что для медленных, периодических и части возмущенных вариаций (D_{st}, S_d) изменения $\Delta B/\Delta t$ малы, тогда как для вариаций $P_{с1} - P_{с4}$ и иррегулярных колебаний эти изменения достигают нескольких единиц нанотеслы в секунду.

Из всех типов вариаций, приведенных в таблице, наибольшие временные изменения ГМП достигаются КПК, иррегулярными вариациями и бухтообразными возмущениями. Периоды этих вариаций заключены во временном интервале от 0,2 с до 3 ч (частотный диапазон от 5 до $2,8 \cdot 10^4$ Гц). Так как эти вариации в основном связаны с протеканием магнитной бури, то совершенно ясно, что при статистических исследованиях эффективности ГМП в биологических процессах в первом приближении можно использовать каталоги магнитных бурь.

Однако следует отметить, что изменения ГМП в диапазоне от 0,2 с до 3 ч происходят и при относительно спокойных геомагнитных условиях. Поэтому, если эти вариации действительно биоэффективны, то

при использовании в статистике только магнитных бурь можно получить недостаточно высокий коэффициент корреляции исследуемых явлений. Возможно, более корректно изучать связь биологических процессов не с магнитными бурями, а с отдельными частотными диапазонами ГМП. Выбор диапазонов частот (периодов) необходимо проводить на основании биоритмики. Пока же можно ожидать, что при исследовании биологических процессов наиболее эффективными окажутся геомагнитные вариации $P_1 - P_3$.

Библиографические ссылки

1. Яновский Б. М. Земной магнетизм. Л. : Изд-во ЛГУ, 1978. 592 с.
2. L-вариации геомагнитного поля и ионосферы по данным советских станций / Н. П. Бенькова [и др.] // Геомагнетизм и аэрономия. 1964. Т. 3. С. 611 – 613.
3. Бенькова Н. П. Магнитное поле Земли и его вариации // Физико-математические и биологические проблемы действия электромагнитных полей и ионизации воздуха. М. : Наука, 1975. Т. 1. С. 13 – 24.
4. Справочник по переменному магнитному полю СССР / под ред. В. И. Афанасьева. Л. : Гидрометеиздат, 1954. 268 с.
5. Пудовкин М. И., Распопов О. М., Клейменова Н. Г. Возмущения электромагнитного поля Земли. Короткопериодические колебания геомагнитного поля. Л. : Изд-во ЛГУ, 1976. 271 с.

1.2. Общие аспекты исследования механизмов биологического действия электромагнитных полей

Эффекты, связанные с энергетическими (в первую очередь тепловыми) влияниями электромагнитных полей на биологические объекты, давно и подробно изучаются в традиционных разделах биофизики [1].

Для электромагнитобиологии, формирующейся как самостоятельное научное направление, наибольший интерес представляют аспекты действия электромагнитного излучения (ЭМИ), связанные не с мощностью воздействия и поглощенной энергией, а с сигнальными характеристиками, с той информацией, которая закодирована в соответствующих полях и излучениях и является значимой для биосистемы.

Среди различных методов анализа биосистем (с учетом ЭМП) можно выделить три общих подхода: кибернетический, синергетический и квантовый.

1.2.1. Кибернетический метод анализа биосистем

Кибернетический подход лежит в основе изучения структуры и взаимосвязи подсистем. К нему относятся вопросы хранения, приема и передачи информации, алгоритмов ее переработки, определения поведения системы как функции от ее «входов» и состояния.

Общими кибернетическими требованиями к биосистеме, способной перерабатывать информацию, являются наличие внутренних ресурсов, способных освобождать избыточную энергию под действием сигнала (неравновесность [3]); действие специализированной структуры, настроенной на прием определенного сигнала (рецептор); наличие специального механизма (усилитель), при помощи которого рецептор, воспринимая сигнал, высвобождает энергию, затрачиваемую на реакцию системы в форме работы исполнительного устройства (эфффектора). Рецептор находится под влиянием множества неспецифических факторов различной физико-химической природы. Важным условием его эффективной работы можно назвать способность избирательно реагировать на сигналы именно той модальности, для восприятия которой данный рецептор предназначен [4].

Исследование механизмов биологического действия ЭМП, как и многих других физических факторов, заключается в изучении путей преобразования внешнего сигнала в реакцию живой системы. Ответная реакция биосистем на слабый сигнал связана с биологическим усилением, во многом определяющим эффект биологического воздействия внешних факторов. В последние годы наметился некоторый прогресс в установлении конкретных механизмов биологического усиления, в частности, в определении химических «посредников», несущих сигнал о событиях, совершающихся на поверхности клеточной мембраны, в цитоплазму [5].

Говоря о кибернетическом подходе в целом, следует подчеркнуть, что исследования по информационной емкости биосистем, количеству информации, содержащейся в сигналах, системам кодирования и передачи информации, пропускной способности и шумам оказались исключительно плодотворными. Так, применение кибернетического подхода к зрительной системе позволило поставить ее изучение на качественно новый уровень [6].

В биологических исследованиях наряду с количеством информации существенное значение имеет понятие ценности информации, эквивалентное инструктирующему, программирующему значению в реализации конкретного физического процесса [7]. Для действия ЭПМ, по-видимому, целесообразно определять ценность информации как приращение вероятности достижения эффекта, который может быть фиксирован, например, как реакция живого организма на внешнее воздействие.

1.2.2. Синергетический метод анализа биосистем

Синергетический подход связан с изучением характерных особенностей систем, далеких от состояния равновесия [8 – 10]. Значительную роль в его формировании сыграли фундаментальные работы И. Пригожина [8] и Г. Хакена [9] по открытым термодинамическим системам и по самоорганизации в существенно неравновесных системах. Такая самоорганизация определяется совместным кооперативным действием большого числа подсистем.

В открытых системах, получающих из внешней среды отрицательную энтропию, без нарушения второго начала термодинамики могут образовываться и существовать упорядоченные структуры. В физике, химии, биологии имеется множество примеров спонтанного возникновения в неупорядоченных системах пространственных и временных упорядоченных структур [9, 10].

Принципиальной стороной вопроса является увеличение неравномерности в открытой системе. В противоположность релаксации к равновесному состоянию, где характерен распад корреляций, при определенном увеличении степени неравновесности в принципе могут возникать новые взаимосвязи, корреляции, упорядочение. Существенно также, что вдали от равновесия процессы описываются нелинейными уравнениями, поэтому оказывается возможным наличие нескольких стационарных решений, устойчивых по отношению к флуктуациям и малым возмущениям. При этом неравновесное состояние открытой системы, характеризующееся высокой степенью упорядоченности и устойчивостью по отношению к малым отклонениям, поддерживается притоком отрицательной энтропии в систему, компенсирующим выработку энтропии в самой системе.

Неравновесные структуры, которые могут перейти в состояние равновесия только в результате скачка (кинетического фазового перехода), называются диссипативными [8]. Диссипативные структуры существуют за счет процессов, связанных с производством энтропии, характеризуются рядом особенностей – возникновением качественного скачка, что связано с достижением параметров критического порогового значения; существованием структуры в течение неограниченного времени при сохранении внешних условий; согласованным когерентным поведением подсистем; уменьшением энтропии в системе.

В условиях сильного отклонения от равновесия возникают качественно новые способы воздействия на систему, новые возможности управления. Оказывается, что воздействия могут быть эффективными при весьма малых затратах энергии и во многих случаях носить характер спускового механизма. Могут осуществляться неожиданные на первый взгляд взаимосвязи. Некоторые из таких уже четко установленных связей подвергались ранее резкой критике, например, связь процессов в биосфере с солнечной активностью [11, 12].

Существование дополнительных способов управления для открытых систем в условиях сильного отклонения от равновесия хорошо иллюстрируется на простом примере квазиравновесных распределений заселенностей колебательных уровней молекул, рассматриваемых в газовой кинетике [13]. При этом внешние параметры играют роль «рулей», с помощью которых можно управлять заселенностями и зависящими от них процессами. Так, сравнительно небольшими изменениями температуры газа (при наличии существенно неравновесного количества энергии в колебательных степенях свободы) можно сильно влиять на функцию распределения заселенности и соответственно на процесс диссоциации многоатомных молекул. Обычно диссоциация происходит при нагревании газа, в то время как в существенно неравновесных условиях заселенность верхних уровней растет и молекулы диссоциируют при охлаждении газа. В этом случае добавлением в газовую смесь, содержащую молекулы двух типов примеси, молекул определенного третьего типа также можно эффективно управлять заселенностями.

При анализе возможностей управляющего действия ЭМП синергетический подход играет принципиальную роль. Он включает установление характера неравновесности, анализ вопросов устойчивости

по отношению к различным степеням свободы (модам), нахождение возможностей эффективного управления. Особую роль играют различные резонансные воздействия. Так, например, внешние электромагнитные воздействия частотами порядка 10 – 5 Гц являются близкими к характерным частотам биологических систем. Известно, что ЭМП этих частот и инфразвук обладают отчетливо выраженным биологическим действием. Разумеется, имеются и другие возможности, не сводящиеся к резонансу.

1.2.3. Квантовый метод анализа биосистем

Квантовый подход в отличие от кибернетического и синергетического не получил еще в биологии надлежащего развития. Однако в последнее время необходимость учета квантовых закономерностей становится все более очевидной. Остановимся на этом подходе несколько детальней.

Можно выделить два направления поиска путей применения квантовомеханического подхода в биологии. Первое из них – непосредственное расширение сферы приложений квантовой механики. Так, современная органическая химия строится на основе квантовых представлений. Можно ожидать непосредственного использования их при рассмотрении биополимеров, а возможно, и органелл (митохондрий, рибосом). В настоящее время выполнены квантовые расчеты электронной структуры важнейших классов биологических молекул. Показана принципиальная роль сопряженных π -электронных систем в биохимических процессах, в частности, для ряда низкомолекулярных соединений (коферментов), функционирующих во взаимодействии с белком [14]. Отметим возможности делокализации электронов в биополимерах под действием ЭМП. Существенное значение для исследования ряда биологических процессов (в частности фотосинтеза) имеет квантовая химия координационных соединений. В целом, однако, современная квантовая биохимия ограничивается статистическими задачами и почти не рассматривает проблемы динамики [15].

Второе направление квантового подхода к биологии связано с определенным абстрагированием от чисто физических понятий. Естественным аппаратом в этом случае является формулировка квантовых закономерностей на основе комплексных цепей Маркова [16], тесно

связанная с фейнмановским интегрированием по путям. При использовании данной формулировки нет нужды в поисках для биологических явлений аналогов чисто физических величин в отличие, например, от шредингеровского или гейзенберговского представлений.

Следует отметить, что для обычных (действительных) цепей Маркова имеется чрезвычайно широкая область приложений (например, физика, радиотехника, автоматика, экономика, социология, медицина, биология). Для действительных цепей условная вероятность осуществиться событию A_i в $(\zeta + 1)$ -м испытании $p_{\zeta+1}(A_i)$ зависит только от события в ζ -м испытании и не зависит от предыдущих. Поэтому полная вероятностная картина возможных изменений при переходе от испытания A , к испытанию j задается матрицей перехода $P = |p_{ij}|$. Элементы матрицы перехода p_{ij} неотрицательны, сумма элементов каждой строки равна единице. Для достоверного события $p_{ij} = 1$.

В основе комплексных цепей Маркова лежит комплексная теория вероятностей, обобщающая известную аксиоматику А. А. Колмогорова на комплексные числа. Каждому случайному событию A из поля событий ставится в соответствие уже не действительное неотрицательное, а комплексное число $\psi(A)$. Для достоверного события $|\psi(A)|^2 = 1$. В этом плане переход к комплексным вероятностям – это своего рода естественное обобщение понятия обычной вероятности.

Вместе с тем в понятии комплексных цепей Маркова в значительной мере уже заложены основные особенности квантовой механики [16]. Причем конкретные системы определяются заданием функции Лагранжа (или, в частности, для биосистем – матрицы перехода). Подчеркнем, что в комплексных цепях не конкретизируется величина, аналогичная постоянной Планка, она может быть любой.

В формулировке комплексных цепей Маркова квантовая механика может явиться действенным рабочим инструментом в биологии. Речь идет о построении обобщенных моделей марковских процессов, где учитывается комплексный характер вероятности, соответствующей природе явления. В таких моделях учитываются не только чисто стохастические свойства, описываемые, в частности, обычными цепями Маркова, но и внутренние корреляции, своего рода фазовые соотношения между объектами, описываемые комплексными цепями Маркова. Необходимость такого учета проявляется при рассмотрении

работы нервной системы вообще и мозга в частности, построении поведенческих моделей животных, исследовании психических явлений и вопросов формирования мнения коллектива людей.

Проиллюстрируем сказанное на примере работы мозга. Сущность работы мозга как сложной системы взаимосвязанных структур пытались понять на основе аналогии с электронно-вычислительной машиной. Сейчас уже ясно, что сходным считается лишь ряд конечных результатов работы ЭВМ и мозга. Однако имеются и фундаментальные различия. Так, в отличие от двухпозиционного переключателя – элементарной структурной единицы ЭВМ – нейрон определенным образом суммирует воздействия на нескольких входах, определяя, должен ли он посылать импульсы, и подбирает выходной сигнал и его частоту (двухпозиционные свойства: да – нет относятся лишь к аксону). Огромное число контактов между различными нейронами позволяет считать мозг единой кооперативной системой, в отличие от ЭВМ каждая из функций мозга делокализована, и система обладает большой функциональной гибкостью и устойчивостью к различным повреждениям. В этом плане имеется прямая аналогия с голографической записью.

Действие современных ЭВМ, решающих чрезвычайно сложные задачи, разбивается на элементарные операции, с которыми может справиться весьма простое устройство – двухпозиционный переключатель с ответами да – нет (1 – 0). В основе этих элементарных операций лежит булева алгебра, формализовавшая обычную логику и определившая пути решения сложных задач. Этот процесс задается программой и в этом смысле однозначно определен. В отличие от ЭВМ для работы мозга характерны как внутренняя стохастичность, так и наличие определенных корреляций. Простейшая возможность их отыскания должна основываться на теории комплексных марковских цепей, учитывающих возникающие в этом случае своего рода фазовые соотношения. С волновыми свойствами согласуется и голографический характер процессов в мозгу, и отмечавшаяся делокализация функций мозга. Не противоречат им структура и работа нейрона, связанного сразу с множеством других. Все это дает возможность определенной фазировки, создания определенного когерентного кооперативного состояния.

Хотя работа мозга характеризуется невероятной сложностью, в первом приближении, по-видимому, следует полагать, что его действие происходит по квантовым законам. Во всяком случае пока это

простейшая из возможностей, которую следует проанализировать. Работа мозга делится на бессознательное, как основу, и сознательное, как своего рода выходное устройство. Сознательному соответствует обычная логика. Бессознательное, по-видимому, протекает по квантовым законам, квантовой логике. Однако последние не улавливаются сознанием. Возникающие в сознании мысли, картины – не есть адекватная передача работы мозга. При включении сознания возникает определенная стохастичность в выводах, решениях, подобная стохастичности при квантовомеханических измерениях.

В мозгу, как и в ЭВМ, сложные вычислительные и логические операции реализуются путем выполнения огромного числа очень простых. Каковы же элементы и логика квантовой ЭВМ? Простейшей квантовой системой является двухуровневая. Ее отличие от двухпозиционного переключателя заключается в дополнительном наличии фазы. В физике набор двухуровневых частиц (молекул) характеризуется известной моделью Дике [17]. В отличие от набора двухпозиционных переключателей в квантовой системе дополнительно появляются когерентные характеристики. В модель Дике, например, вводится кооперативное число, определяемое соотношением фаз отдельных молекул. Роль его весьма наглядно отображается формулой для интенсивности спонтанного излучения I системы K молекул

$$I = I_0 \sum_{r,m} P_{r,m} (r+m)(r-m+1); \quad 0 < r < \frac{N}{2}; \quad |m| \leq 2, \quad (1.5)$$

где I – интенсивность излучения одной молекулы; m – разность заселенности уровней; $P_{r,m}$ – вероятность нахождения системы в состоянии с волновой функцией $\psi_{r,m}$. Как видно из формулы (1.5), при $r = N/2, m = 0$ система излучает пропорционально N^2 , при $m = -r$ система не излучает вовсе. Принципиальным моментом для системы в целом является когерентная (волновая) природа взаимодействия между базисными элементами. Законы композиции базисных элементов при взаимодействии двухуровневых объектов описываются (аналогично обычной логике для ЭВМ) квантовыми законами, квантовой логикой. Законы композиции в сложной квантовой системе, состоящей из большого числа двухуровневых объектов, строятся на основе теоретико-группового подхода и задаются при помощи коэффициентов Клебша – Гордана [18].

Квантовый подход в проблеме воздействия ЭМП на биологические объекты должен включать в себя оба направления: как непосредственное приложение квантовой механики на уровне биополимеров и биохимических реакций, так и использование комплексных цепей Маркова. Подчеркнем, что рецепт применения комплексных цепей в биологии заключается в написании комплексной матрицы перехода, определяемой условиями конкретных задач (в случае обычных цепей Маркова, широко используемых в биологии, феноменологически строится действительная матрица перехода).

Рассмотренные выше кибернетический, синергетический и квантовый подходы являются междисциплинарными и опираются на результаты различных конкретных наук. Именно они задают направления исследований и служат определенными ориентирами в разработке биологических проблем и, в частности, проблемы взаимодействия ЭМП с живыми системами.

1.2.4. Общая оценка роли ЭМП в жизнедеятельности организмов

Перейдем к общей оценке роли ЭМП в жизнедеятельности организмов.

Как отмечается в работе [19], факт существования очень слабого электромагнитного излучения общепризнан и экспериментально обнаружен у всех исследованных клеток растений и животных. Анализ проведенных экспериментальных исследований указывает на информационную роль собственного излучения биологических объектов.

В ряде работ, в частности [20 – 22], где роль излучения рассматривалась со структурной точки зрения, выделяются следующие основные положения:

1. Поскольку все химические процессы синтеза или распада сопровождаются перестройками электронных оболочек молекул, субъединиц мембран и т. д., то неизбежно в процессах синтеза или распада происходит излучение или поглощение квантов ЭМП. Эти процессы могут составить определенный канал передачи информации между мембранными субъединицами, мембранами, клеточными органами, клетками, между ДНК и белками.

2. Поскольку электронные состояния сложных систем, в частности биологических, как правило, вырожденные, т. е. обладают разнообразными пространственными формами при одной и той же энергии,

то даже очень слабые внешние ЭМП могут выделить одно из многих состояний и запустить в организме определенную цепь процессов синтеза или распада.

3. Возможно нарушение комплементарности, определяемое воздействием излучения на водородные связи, что также существенно для протекания процессов синтеза или распада.

4. Излучение может производить отбор из ряда имеющихся возможностей существования определенных неравновесных состояний. Этот процесс рассматривается как аналог динамической голографии.

5. Наличие коллективизированных π -электронных состояний в биомолекулах приводит к когерентному взаимодействию с излучением всей электронной системы. Характер излучения может также играть существенную роль в переходе электронной подсистемы в коллективное состояние.

Если взглянуть на проблему в целом, то совокупность имеющихся данных свидетельствуют о том, что наряду с химической и электрической системами, являющимися неотъемлемыми проявлениями жизнедеятельности организма, существует третья информационно-управляющая система – система ЭМП. Итак, электромагнитное излучение, порожденное процессами внутри живой клетки, служит очень важной ее характеристикой.

Любая живая система в определенных условиях может быть как излучателем, так и приемником излучения, т. е. активные процессы обмена излучением могут протекать не только внутри, но и за пределами биологических объектов при незначительных энергетических затратах. Проведенное рассмотрение роли ЭМИ в биосистемах указывает на сложный, многоплановый, многоаспектный характер проблемы.

Библиографические ссылки

1. Кудряшов Ю. Б., Исмаилов Э. Ш., Зубкова С. М. Биофизические основы действия микроволн. М. : Изд-во МГУ, 1980. 159 с.

2. Биологическая кибернетика / А. Б. Коган [и др.]. М. : Высш. шк., 1977. 408 с.

3. Бауар Э. Теоретическая биология. Л. : ВИЭМ, 1935. 205 с.

4. Ванников А. Я. Цитологические и молекулярные основы рецепции. М. : Наука, 1971. 298 с.

5. Мецлер Д. Биохимия. М. : Мир, 1980. Т. 2. 606 с.

6. Глезер В. Д., Цуккерман И. И. Информация и зрение. М. ; Л. : Изд-во АН СССР, 1961. 182 с.
7. Эйген М. Самоорганизация материи и эволюция биологических макромолекул. М. : Мир, 1973. 216 с.
8. Пригожин И. Р. Введение в термодинамику необратимых процессов. М. : Изд-во иностр. лит., 1961. 127 с.
9. Хакен Г. Синергетика. М. : Мир, 1980. 404 с.
10. Эбелинг В. Образование структур при необратимых процессах. М. : Мир, 1979. 279 с.
11. Инфракрасное излучение в атмосфере Земли и в космосе : тр. ФИАН / отв. ред. М. М. Сущинский. М. : Наука, 1978. Т. 105. 228 с.
12. Гордиец Б. Ф., Марков М. Н., Шелепин Л. А. Солнечная активность и Земля. М. : Знание, 1980. 84 с.
13. Гордиец Б. Ф., Осипов А. И., Шелепин Л. А. Кинетические процессы в газах и молекулярные лазеры. М. : Наука, 1980. 512 с.
14. Пюльман Б. Электронная биохимия. М. : Наука, 1966. 103 с.
15. Волькенштейн М. В. Молекулярная биофизика. М. : Наука, 1975. 616 с.
16. Маслов В. П. Комплексные марковские цепи и континуальный интеграл Фейнмана. М. : Наука, 1976. 192 с.
17. Dicke R. H. Coherence in Spontaneous Radiation Processes // Phys. Rev. 1954. Vol. 93. № 1. P. 99 – 110
18. Пюльман Б. Теоретико-групповые методы в физике : тр. ФИАН. М. : Наука, 1973. Т. 70. С. 25 – 30.
19. Казначеев В. П., Михайлова Л. П. Сверхслабые излучения в межклеточных взаимодействиях. Новосибирск : Наука, 1981. 144 с.
20. Быховский В. К. Когерентность, память и измерение характеристик биосистем // Статистические свойства микрокультур. М. : Наука, 1971. С. 10 – 13.
21. *Он же.* О передаче когерентности в электронную оболочку биологических макромолекул // Биофизика. 1973. Т. 18. С. 198 – 200.
22. *Он же.* Метастабильность решетки водородных связей и конформационная память нативных биологических молекул // Биофизика. 1973. Т. 18. С. 573 – 675.

1.3. Механизмы биологического действия электромагнитных полей низкой частоты

По отношению к биологическим системам низкочастотные электромагнитные поля (НЧ ЭМП) являются квазистационарными полями. Этот факт позволяет свести изучение взаимодействия магнитной составляющей НЧ ЭМИ с биологическими системами к изучению взаимодействия с тем же объектом статического МП, а электрической составляющей – к изучению действия квазистационарных электрических токов.

1.3.1. Влияние МП на скорость окислительно-восстановительных реакций, протекающих в митохондриях

За последние годы сформировалась экспериментально апробированная теория о влиянии ЭМП на скорость радикальных химических реакций [1, 2]. В основе этой теории лежат представления о влиянии магнитного поля на интеркомбинационные переходы между состояниями разной мультиплетности [3, 4]. В [2] было установлено ускорение реакции разложения H_2O_2 каталазой и димерным комплексом (ЭДТА) с Fe^{8+} в магнитном поле напряженностью до 640 кА/м. Полученные результаты авторы интерпретировали в рамках Δg -эффекта. На основании данных этой работы можно полагать возможным влияние МП на скорость окислительно-восстановительных реакций, протекающих в митохондриях. Однако показано [5], что МП напряженностью 280 кА/м не оказывает влияния на дыхание митохондрий. Об этом свидетельствуют и наши опыты, в которых полярографически измеряли дыхание митохондрий, находившихся в течение 60 мин при температуре 0 °С в МП напряженностью 24 и 200 кА/м; каких-либо изменений в функциональном состоянии митохондрий также не обнаружено. Все это свидетельствует о том, что эффект влияния магнитного поля на интеркомбинационные переходы промежуточных продуктов окислительно-восстановительных реакций не проявляет себя заметным образом в полях напряженностью 24, 200 и 280 кА/м.

Известно, что в биологических мембранах постоянно протекают радикально-цепные реакции, сопровождающиеся хемилюминесценцией [8]. Считается, что высвечивание фотона обусловлено реакцией

рекомбинации перекисных радикалов ненасыщенных жирных кислот липидов мембран. С позиции упомянутой теории [2] представляет интерес исследование влияния МП на перекисное окисление в биологических мембранах методом хемилюминесценции (ХЛ).

В опытах использовалась установка, состоящая из световода длиной 0,32 м, ФЭУ-79, усилителя импульсов УИС-2М, пересчетного устройства ПС-10000. Митохондрии, полученные от одной крысы, делили на две группы. ХЛ опытной группы изучалась в однородном магнитном поле напряженностью 240 кА/м, контрольная группа ХЛ изучалась в отсутствие поля. Температура суспензии митохондрий поддерживалась на уровне 37 °С, перемешивание осуществлялось механической мешалкой с частотой вращения 38 об/с. Запись показаний ПС-10000 проводили через каждые 10 с. Изучались как спонтанная ХЛ (2 мин), так и индуцированная Fe^{2+} ХЛ. Железо (0,05 мг на 7,5 мл суспензии) вводилось дважды через каждые 10 мин.

Исследования показали, что магнитное поле напряженностью 240 кА/м вызывает снижение свечения митохондрий. Поскольку ХЛ биологических мембран обусловлена рекомбинацией радикалов R^2 , то можно предположить, что эта реакция имеет непосредственное отношение к уменьшению свечения митохондрий в МП. Однако измерения ХЛ олеиновой кислоты, проведенные в тех же условиях, что и в случае митохондрий, не подтвердили это предположение – влияние МП на свечение олеиновой кислоты нами не обнаружено.

В [7] найдено влияние магнитного поля на скорость ферментативного гидролиза ДНК в циркулирующей смеси. Но этот эффект не обнаруживается в статических условиях [8]. С целью выяснения степени причастности перемешивания суспензии митохондрий к уменьшению их свечения были проведены измерения ХЛ митохондрий в МП напряженностью 240 кА/м при частоте вращения мешалки 10 об/с (вместо 38 об/с). В этой серии опытов различий в свечении митохондрий в МП и в его отсутствие не обнаружено. Следовательно, эффект уменьшения свечения митохондрий в МП напряженностью 240 кА/м при частоте вращения мешалки 38 об/с вызван перемешиванием суспензии. Каким образом? По-видимому, через индуцированные электрические токи, которые возникают в момент перемешивания суспен-

зии [3]. Если справедливо предположение об индуцированных электрических токах, то отсутствие эффекта уменьшения свечения митохондрий должно наблюдаться также и при уменьшении напряженности МП. Действительно, измеряя ХЛ митохондрий в МП напряженностью 24 кА/м при частоте вращения мешалки 38 об/с, мы не обнаружили обсуждаемого эффекта.

Оценка напряженности электрического поля E , при которой наблюдается уменьшение ХЛ митохондрий, дает 10^{-3} В/см (радиус мешалки – 0,0015 м). С точки зрения взаимодействия МП с биологическими объектами эта величина E представляет интерес. Допустим, $E = 10$ В/см оказывает заметное влияние на элементы крови, стенки в области аорты и сердца, где скорость потока крови 0,5 м/с, тогда величина МП составит 160 кА/м.

Возможно, что эффекты, обнаруженные на лабораторных животных, обусловлены воздействием МП на кровообращение в области сердца и аорты [9, 10, 11].

Таким образом, проведенные измерения ХЛ митохондрий и их дыхания в МП напряженностью 24, 200 и 280 кА/м не дали результатов, которые свидетельствовали бы о наличии заметного влияния магнитного поля на скорость интеркомбинационных переходов в радикальных реакциях, протекающих в митохондриях.

В клетке протекает за одну секунду примерно $10^8 - 10^9$ реакций. В ходе большинства из них с определенной частотой возникают или исчезают парамагнитные молекулы, например, коферменты дыхательной цепи в митохондриях осциллируют между окисленной (диамагнитной) и полуокисленной (семихинонной, парамагнитной) формами. Следовательно, в ходе этих реакций осциллируют локальные магнитные поля, величина которых порядка $\mu_B/r^3 - 800$ А/м на расстоянии 10^{-9} м и 8 А/м на расстоянии $5 \cdot 10^{-9}$ м (здесь μ_B – магнетон Бора). Кроме того, в клетке имеются гемосодержащие ферменты с переменным магнитным моментом, изменяющимся в пределах нескольких магнетонов Бора. Вышеизложенное подтверждается рядом работ [12, 13, 14]. Так, в [13] обнаружена генерация живыми клетками электромагнитного излучения частотой 1 МГц, а в [14] – 30 – 140 ГГц.

1.3.2. Электронный и ядерный магнитные резонансы в живой клетке

Все это наводит на мысль о том, что в живой клетке, находящейся во внешнем статическом МП, напряженность которого определяется выражением $h\nu$ (здесь h – постоянная Планка; ν – частота колебаний локального МП; g – g -фактор), в принципе могут осуществляться электронный и ядерный магнитные резонансы.

Рассмотрим радикальную пару (возникающую, например, в ходе перекисного окисления липидов мембран) в триплетном состоянии, при этом Q -факторы радикалов различны. Допустим, что в клетке в данный момент генерируются электромагнитные колебания частоты 9 Гц. Тогда во внешнем статическом МП соответствующей напряженности будет наблюдаться

$$h\nu_1 = g_1\mu_B H \text{ и } h\nu_2 \neq g_2\mu_B H.$$

Благодаря поглощению кванта электромагнитного колебания радикалом Q -фактором радикальная пара перейдет в синглетное состояние, произойдет рекомбинация радикалов, в результате чего общий уровень радикальных реакций повысится. В случае низких частот колебаний [13] эффективным может оказаться поглощение кванта спином ядра и переход радикальной пары (благодаря сверхтонкому взаимодействию электронного и ядерного спинов) из триплетного состояния в синглетное (и наоборот). Отсутствие влияния магнитного поля напряженностью 24, 200 и 280 кА/м на дыхание и ХЛ митохондрий в наших опытах и в [5] можно интерпретировать как отсутствие в митохондриях при указанных напряженностях резонансных колебаний. Следует обратить внимание на одно обстоятельство. Поскольку ферментативные реакции регулируются и их скорости меняются в широком диапазоне, то это должно находить свое отражение в непостоянстве (лабильности) спектральной плотности либо частотного спектра колебаний.

Если электронное состояние нелинейной молекулы является вырожденным, то согласно теореме Яна – Теллера геометрическая конфигурация ядер не может быть устойчивой. Естественное состояние такой молекулы – менее симметричная форма, в которой отсутствует орбитальное вырождение. Биологические молекулы (аминокислоты, углеводы, липиды, белки, нуклеиновые кислоты) являются асимметричными молекулами, т. е. у них отсутствуют такие элементы симметрии,

как плоскость и центр инверсии [15, 16]. Значит, у биологических молекул орбитальное вырождение снято. Этот факт находит свое отражение, например, в том, что биологические свободные радикалы обнаруживают лишь спиновый магнетизм [17]. Следовательно, эффект Яна – Теллера в таких молекулах отсутствует.

Что касается атомов первой и второй переходных групп, входящих в состав ряда биологически важных молекул, таких как гемоглобин, миоглобин, цитохромы и др., в которых имеются элементы достаточно высокой симметрии, и, следовательно, сохраняется электронное вырождение, то надо принять во внимание следующее. Во-первых, у ионов второй переходной группы (Mo, J) и у Co^{2+} , Fe^{2+} эффект Яна – Теллера подавлен спин-орбитальным взаимодействием [17, 18]. Во-вторых, эффект Яна – Теллера отсутствует у ионов конфигурации d^5 (Re^{3+} , Mn^{2+}). В-третьих, неэквивалентность лигандов, окружающих центральный атом, и достаточно сильная ковалентная связь между ними снижают симметрию молекулы например, октаэдрическую до тетрагональной, ромбической и ниже [19], вследствие чего верхний орбитальный дуплет расщеплен. Говорить об эффекте Яна – Теллера в этом случае, по-видимому, нет смысла. Проведенный анализ не подтверждает гипотезу [20]: свойства живых систем – раздражимость, возбудимость, а также реакция на МП – могут быть объяснены с позиции янтеллеровского взаимодействия.

Модель макромолекулы в виде полностью вытянутой нити, обеспечивающая ориентацию биомолекул типа ДНК в относительно небольших магнитных полях (80 кА/м и ниже) [21], противоречит сложившимся в литературе [22, 23] представлениям о макромолекуле как о рыхлом клубке с соотношением осей, равным нескольким единицам. Следовательно, величина магнитной анизотропии Δk таких макромолекул должна существенно отличаться от принятой в работе [21]. Об этом свидетельствуют и наши экспериментальные исследования магнитной анизотропии молекул ДНК.

В опыте использовался метод двойного лучепреломления. Однородное МП можно было изменять от 4 до 320 кА/м. Наблюдение двойного лучепреломления осуществлялось как фотометрически, так и визуально [22]. Направление луча света было перпендикулярным МП. Рабочие растворы ДНК (1%-ный раствор NaCE) готовились из препарата фирмы «Reanal Гипохромизм», ДНК равнялся 34 % [24]. Концентрация

раствора ДНК в опытах варьировала от 0,012 до 0,02 % при рН 4,0 и 9,0. Для сравнения использовали ориентацию молекул ДНК в слабом потоке раствора [22]. Применялся аппарат с внутренним ротором радиусом 0,0073 м и длиной 0,082 м. Величина зазора между статором и ротором составляла $6 \cdot 10^{-4}$ м. Измерение двулучепреломления молекул ДНК в потоке дали возможность определить коэффициент вращательной диффузии (68 с^{-1}) и степень преимущественной ориентации молекул относительно потока ($n/n_0 = 1,07$). В потоке сравнительно легко регистрировалась ориентация молекул ДНК; в магнитном поле, напротив, несмотря на многочисленные попытки, нам не удалось обнаружить каких-либо признаков ориентации. Все это, очевидно, свидетельствует о малости величины диамагнитной анизотропии $\Delta\chi$ молекулы ДНК.

В отличие от наших опытов в работе [25] ориентация молекул ДНК изучалась в весьма сильных МП напряженностью до 10^7 А/м. Установлено, что степень ориентации молекул ДНК в МП $9,6 \cdot 10^6$ А/м была меньше 1 %. Подставим $H = 9,6 \cdot 10^6$ А/м, $n/n_{02} = 1,01$ в выражение

$$\frac{n}{n_0} = e^{\Delta\chi H^2/kT} < 1,01.$$

Найдем $\Delta\chi < 3 \cdot 10^{-25}$ или на единицу объема $\Delta\chi < 2 \cdot 10^{-9}$. Чтобы судить о величине $\Delta\chi = (X_1 - X_2) \cdot 10^{-6} < 0,002 \cdot 10^{-6}$, приведем для сравнения величину диамагнитной анизотропии бензола [26]: $\Delta\chi = (13,37 \cdot 4,94) \cdot 10^{-6} = 8,43 \cdot 10^{-6}$. Из этого сравнения видно, что величина $\Delta\chi$ молекул ДНК в растворе очень мала.

Все сказанное о ДНК можно отнести и к глобулярным белкам, к которым относятся все ферменты [27]. Основанием для этого служат следующие соображения. По отношению к молекулам ДНК молекулы белка обладают меньшими размерами и меньшим молекулярным весом. Поэтому для наблюдения заметной преимущественной ориентации молекул белка в растворе необходимы значительные ориентирующие силы. Между прочим, гемоглобин, для которого $\theta = 10^6 \text{ с}^{-1}$ [28], не обнаруживает заметной ориентации в магнитном поле напряженностью 872 кА [29].

Возможность поворота в МП липидного домена [30] может повлиять на функциональное состояние ферментов и переносчиков, локализованных в мембране. Ориентационный эффект липидных доменов в низкочастотном ЭМП будет иметь место, если время релаксации

домена меньше или равно периоду колебаний поля. Время релаксации домена порядка 30 с [30]. Следовательно, ориентационный эффект липидных доменов в мембране будет существенным в ЭМП, частота колебаний которого равна примерно 1 Гц и ниже. Выше этой частоты домены не смогут успевать следовать за изменениями магнитной составляющей.

В опытах по изучению влияния магнитного поля напряженностью 240 кА/м на скорость оседания эритроцитов нами не обнаружено каких-либо изменений в скорости оседания эритроцитов. Отсутствие эффекта станет понятным, если принять во внимание, что сила гравитации на 8 порядков превосходит силу Лоренца, действующую на эритроцит в момент оседания.

1.3.3. Взаимодействие магнитного и электрического полей с биологическими системами

Что касается взаимодействия магнитного поля с биологическими системами на организменном уровне, то в [31, 32] показано, что тормозное действие МП на течение крови несущественно и что магнитное поле не оказывает влияния на проведение импульса по нерву.

При движении в МП электропроводящей среды, каковой является и кровь, в ней индуцируется электрический ток. На зависимости тока индукции от скорости течения электропроводящей среды основаны электромагнитные расходомеры [32] и, в частности, электромагнитные методы измерения кровотока. В зависимости от калибра сосуда и скорости кровотока в МП напряженностью 200 кА/м регистрируется ЭДС в пределах от 20 до 70 мкВ. При этом наблюдается повышенное тромбообразование и феномен струи. Плотность тока, при которой отмечены упомянутые эффекты, равна $2,8 \cdot 10^{-7}$ А/см.

Влияние электрической составляющей низкочастотного ЭМП на биологический объект изучалось нами с использованием электрического тока низкой частоты. Источником тока служил генератор ЗГ-12М. Объектом исследования были митохондрии, а в качестве показателя – ХЛ. Ток подводился к суспензии митохондрий при помощи платиновых электродов. Плотность тока 110 мкА/см², частота колебаний 7 кГц, температура суспензии 37 °С. Регистрацию ХЛ проводили в режиме счета квантов измерительной системой СБС-2. Результаты измерений показали, что электрический ток частотой 7 кГц и плотностью 110 мкА/см²

снижает индуцированную Fe^{2+} ХЛ митохондрий ($P < 0,02$), что подтверждает справедливость нашего предположения о причине снижения ХЛ митохондрий в магнитном поле.

Как известно, ионы Ca^{2+} снижают ХЛ биологических мембран, индуцированную Fe^{2+} [6]. Считается, что Ca^{2+} , взаимодействуя с липидами, приводит к уплотнению их углеродных цепей, изменяя таким образом их конформацию. Полагают, что это происходит благодаря связыванию ионами кальция полярных групп липидов, в результате чего уменьшается отталкивание между молекулами, что приводит к уплотнению и достижению более высокой степени упорядоченности (речь идет о липидной пленке и бислоевой мембране). Тот факт, что электрический ток аналогично Ca^{2+} снижает ХЛ митохондрий, свидетельствует о том, что ЭП оказывает на мембраны примерно такое же действие, как и Ca^{2+} , т. е. под действием электрического поля плотность (объем) мембраны меняется и, следовательно, меняется диэлектрическая постоянная. А это не что иное, как электрострикция. В пользу этого предположения свидетельствует наблюдение электрострикции в искусственных бислоевых мембранах, причем установлено, что толщина (емкость) такой мембраны изменяется пропорционально квадрату приложенного напряжения. Таким образом, есть основания для предположения, что в момент нахождения в низкочастотном ЭМП живой клетки в ее мембранах возникают стрикционные силы:

$$f = \frac{1}{8} \pi grad \left(E^2 \frac{\delta \epsilon}{\delta \tau} \tau \right),$$

где ϵ – диэлектрическая постоянная мембраны; τ – плотность мембраны. Приведенное предположение о стрикционных силах, естественно, нуждается в дальнейшей проверке.

Итак, влияние низкочастотного электромагнитного поля на биологические системы, по нашему мнению, в основном сводится к действию электрической составляющей. Не исключается влияние магнитной составляющей. Вероятными механизмами могут быть:

а) в ЭМП частотой, не превышающей 1 Гц, возможно, срабатывает механизм ориентации липидных доменов, который, как полагают, может оказывать действие на функциональное состояние мембран;

б) при значении H магнитной составляющей, определяемой выражением $h\nu = g\mu_B H$, в живой клетке имеют место электронный и ядерный магнитные резонансы; источником переменного магнитного

поля частоты ν могут быть осцилляции между парамагнитным и диамагнитным состояниями молекул, принимающих участие в окислительно-восстановительных и радикально-цепных реакциях; резонансные эффекты могут оказывать влияние на скорость интеркомбинационных переходов в промежуточных продуктах радикальных реакций;

в) на организменном уровне магнитная составляющая индуцирует в крови в области сердца и аорты низкочастотные электрические токи, которые при определенных значениях могут быть заметными для организма.

Библиографические ссылки

1. Диффузионная теория рекомбинации радикальных пар с учетом синглет-триплетных переходов / К. М. Салихов [и др.] // Кинетика и катализ. 1975. Т. 16. № 2. С. 279 – 287.

2. Влияние магнитного поля на скорость разложения HrO с катализом и комплексом ЭДТА с Pc / Л. М. Вайнер [и др.] // Биофизика. 1978. Т. 23. Вып. 2. С. 234 – 240.

3. Бучаченко А. Л. Химическая поляризация электронов и ядер. Л. : Наука, 1974. 396 с.

4. Соколик И. А., Франкевич Е. П. Влияние магнитных полей на фотопроцессы в органических твердых телах // Успехи физических наук. 1973. Т. 3. Вып. 2. С. 261 – 281.

5. Исследование окислительного фосфорилирования в переживающих митохондриях методом ЭПР / Л. П. Каюшин [и др.] // Биофизика. 1978. Т. 23. Вып. 6. С. 1024 – 1023.

6. Владимиров Ю. А., Арчаков А. И. Перекисное окисление липидов в биологических мембранах. М. : Наука, 1972. 382 с.

7. Комолова Г. С., Ерыгин Г. Д. Влияние постоянного магнитного поля высокой напряженности на ферментативный гидролиз нуклеиновых кислот // Доклады АН СССР. 1972. Т. 204. С. 995 – 997.

8. Дымшиц Г. М., Беккер Ж. М., Молин Ю. Н. Отсутствие влияния постоянного магнитного поля на ферментативный гидролиз ДНК // Биофизика. 1974. Т. 19. Вып. 4. С. 760 – 761.

9. Шерклиф Дж. Курс магнитной гидродинамики. М. : Мир, 1967. 480 с.

10. Климовская Л. Д., Смирнова Н. М. Некоторые вегетативные реакции у кроликов, подвергнутых воздействию постоянного магнитного поля // Космическая биология и авиакосмическая медицина. 1975. Т. 9. Вып. 3. С. 18 – 22.

11. Влияние постоянного магнитного поля на концентрацию свободных радикалов в органах и тканях мышей / Л. А. Пирузян [и др.] // Известия АН СССР. Серия Биология. 1971. № 1. С. 123 – 136.

12. О роли сверхслабых световых потоков в биологических системах. Биоэнергетика и биологическая спектрофотометрия / В. П. Казначеев [и др.]. М. : Наука, 1967. С. 80 – 84.

13. Pohl H. A. Oscillating fields about growing cells. Proceedings of the 7th International Symposium on Quantum Biology and Quantum Pharmacology // Palm Coast, Fla, March 5 – 8, 1930. "Int. J. Quantum Chem". 1980. Quantum Biol. Symp. K7. P. 411 – 431.

14. Webb S. J. Techniques for the study of living cells by Raman and microwave spectroscopy // Collect. Phenom. 1981. Vol. 1. № 3 – 4. P. 313 – 320.

15. Урманцев Ю. А. О философском и естественнонаучном значении некоторых проявлений правизны и левизны в живой природе. О сущности жизни. М. : Наука, 1964. С. 170 – 191.

16. Брилл А. Обнаружение свободнорадикальных промежуточных соединений в биохимических реакциях по их магнитной восприимчивости // Свободные радикалы в биологических системах. М. : Изд-во иностр. лит., 1963. С. 76 – 100.

17. Абрагам А., Блيني Б. Электронный парамагнитный резонанс переходных ионов. М. : Мир, 1973. 349 с.

18. Альтшулер С. А., Козырев Б. М. Электронный парамагнитный резонанс соединений элементов промежуточных групп. М. : Наука, 1972. 671 с.

19. Вейсблут М. Физика гемоглобина. Структура и связь. М. : Мир, 1969. С. 11 – 161.

20. Шишло М. А., Кубли С. Х., Нужный В. П. Биоэнергетика и регулирующие системы организма при действии магнитных полей. Реакции биологических систем на магнитные поля. М. : Наука, 1978. С. 81 – 102.

21. Дорфман Я. Г. Физические явления, происходящие в живых объектах под действием постоянных магнитных полей. Влияние магнитных полей на биологические объекты. М. : Наука, 1971. С. 15 – 23.

22. Цветков В. Н., Эокин В. Е., Френкель С. Я. Структура макромолекул в растворах. М. : Наука, 1964. 719 с.
23. Волькенштейн М. В. Молекулы и жизнь. М. : Наука, 1965. 504 с.
24. Спирин А. С., Гаврилова Л. П., Белозерский А. Н. К вопросу о природе и способах количественной оценки «гиперхромического эффекта» нуклеиновых кислот // Биохимия. 1959. Т. 24. № 4. С. 600 – 607.
25. Maret G., SchicVfus M. V., Wendorff J. H. Magnetic orientation of macromolecules in meltes ans solutions // Colloq. int. GNHS. 1975. P. 71 – 73.
26. Дорфман Я. Г. Диамагнетизм и химическая связь. М. : Физматгиз, 1961. 178 с.
27. Генинджер А. Биохимия. М. : Мир, 1974. 957 с.
28. Сетлоу Р., Поллард Э. Молекулярная биофизика. М. : Мир, 1964. 436 с.
29. Malone C. P., Downing M., Giles L. Magnetic isotropy of the red blood cell // Biochem.et biophys. aeta. 1963. Vol. 6. К 1. P. 165 – 168.
30. Бреслер С. Е., Бреслер В. М. О жидкокристаллической структуре биологических мембран // Доклады АН СССР. 1974. Т. 214. № 4. С. 936 – 941.
31. Абашин В. М., Евтушенко Г. И. К вопросу о статье В. А. Варданяна «Влияние магнитного поля на течение крови» // Биофизика. 1974. Т. 19. Вып. 6. С. 1107.
32. *Они же.* Постоянное магнитное поле и проведение импульса по нерву // Биофизика. 1975. Т. 20. Вып. 2. С. 281 – 282.

1.4. Физические механизмы биологического действия микроволн

1.4.1. Релаксационные колебания дипольных молекул и колебания свободных зарядов

Как известно, под действием ЭМП на среду, содержащую свободные заряды и дипольные молекулы, происходят два основных процесса: релаксационные колебания дипольных молекул, вызывающие диэлектрические потери, и колебания свободных зарядов, приводящие к потерям проводимости. Соотношение между этими двумя видами потерь выражают тангенсом угла потерь

$$\operatorname{tg}\delta = \sigma / \omega\varepsilon'\varepsilon_0,$$

где δ – удельная проводимость; ω – круговая частота; $\varepsilon'\varepsilon_0$ – относительная и абсолютная диэлектрические проницаемости среды. Одна и

та же среда для различных частот может обладать различными δ и ϵ' , т. е. имеет место дисперсия электропроводности. Применительно к электрическим параметрам биологических тканей этот вопрос был рассмотрен в работах Швана [1, 2]. Диэлектрические свойства биологических сред, макромолекул и клеток являются определяющими во взаимодействии их с электромагнитным полем.

Экспериментально установлено, что жидкие ткани (кровь, лимфа) и ткани с большим содержанием воды (мышцы, печень и др.) имеют более высокие значения диэлектрической проницаемости и более низкие значения сопротивления по сравнению с тканями, содержащими мало воды (жир, кость). Поэтому методы измерения проводимости или диэлектрической проницаемости могут быть использованы для определения степени влажности жировой ткани. При облучении биосистем микроволнами сравнительно высокой интенсивности наряду с другими эффектами наблюдается тепловой. Причем в зависимости от глубины проникновения микроволн в ткани (или длины волны), а также толщины и электрических свойств тканей соотношение теплот, выделяемых на поверхности тела (кожа) и в более глубоких слоях (жировой слой и мышцы), будет различным, что всегда следует иметь в виду при лечебном применении СВЧ-полей. Поглощение энергии микроволн в тканях зависит от соотношения размеров объекта и длины волны электромагнитного поля [3].

Тепловой эффект микроволн. В литературе иногда обсуждается вопрос о возможности «специфического нагрева» части облучаемой системы относительно всего объема среды (например, повышение температуры клеток в суспензии без заметного нагрева всей взвеси). Однако еще в 40-х годах было показано, что избирательное повышение температуры находится в прямой зависимости от квадрата диаметра d частиц

$$\Delta T = K \frac{Wd^2}{C},$$

где K – постоянная; W – удельная поглощенная мощность облучения; C – коэффициент теплопроводности системы.

Для объектов клеточных размеров такой нагрев не превышает $1 - 5 \cdot 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}$.

1.4.2. Резонансное действие ЭМП на белки и фермент-субстратные комплексы

Наряду с тепловым эффектом микроволн, обусловленным потерями проводимости и диэлектрическими потерями, имеет место и резонансное действие ЭМП на белки и фермент-субстратные комплексы [3 – 5]. Наличие конформационных колебаний у макромолекул (белков, ферментов, нуклеиновых кислот), соответствующих диапазонам сверхвысоких частот (СВЧ) и более низкочастотным [6], также может быть одной из причин влияния ЭМП на биологические объекты. Результаты воздействия могут быть следующие.

1. Детектирование постоянного тока внутри организма.

В последние годы высказывалось мнение, что эффекты микроволн могут быть объяснены на основе их детектирования в некоторую форму постоянного тока внутри организма. Основываясь на работе Коля о выпрямляющих свойствах нерва лягушки, была экспериментально показана возможность детектирования переменного тока оболочкой клетки в опытах с инфузориями [3]. Г. Шван, рассматривая этот вопрос, пришел к заключению, что разности потенциалов, которые могут возбуждаться слабыми с точки зрения теплового эффекта полями, будут на два порядка меньше, чем потенциал покоя мембран (70 мВ), что, по его мнению, не может вызвать существенный эффект для возбудимой мембраны [1]. Следует, однако, иметь в виду, что способность нервной системы к суммации подпороговых раздражителей не исключает возможности детектирования.

Дисперсия электрических параметров в электромагнитном поле указывает на важную роль биологических мембран в реакции клеток и тканей на ЭМП вплоть до частот порядка 10 МГц. Начиная со 100 МГц, клеточные мембраны становятся практически короткозамкнутыми и основной вклад в поглощение ЭМП клетками и тканями вносят ионы и молекулы воды. Эти традиционные представления, а также небольшая толщина мембран по сравнению с общим объемом клетки позволили Г. Швану сделать неправильное заключение о несущественной роли мембранных структур во взаимодействии биосистем с СВЧ-полями [1].

Следует отметить также исследование действия СВЧ-поля на функциональное состояние нерва и параметры нервного импульса при немодулированном ($f = 2,4$ ГГц различной интенсивности) и импульс-

ном ($f = 3$ ГГц, 10 мВт/см²) облучениях [7, 8]. Под влиянием смодулированных микроволн, нагревавших нерв на 2° в течение 30 мин, скорость проведения увеличилась на $16 \pm 4,5$ %, а рефрактерные фазы несколько укорачивались. Эффект усиливался с ростом интенсивности облучения. Импульсные поля наряду с увеличением скорости проведения на 10 % повышали также и возбудимость нерва лягушки.

2. Изменения в мембране нервных волокон под действием микроволн.

С возрастанием мощности микроволн увеличиваются амплитуда биопотенциалов, скорость проведения возбуждения и амплитуда гиперполяризации. Приведенные данные дают основание предполагать, что в основе действия микроволн на нервные структуры лежат изменения в мембране нервных волокон, которые могут привести к снижению мембранного потенциала и даже возникновению спонтанной импульсной активности (например, в случае возможной рецепции микроволн), на что указывалось ранее [9]. Экспериментально выявлено снижение мембранного потенциала нервных клеток изолированных ганглиев моллюска под влиянием СВЧ ЭМП [9].

3. Влияние микроволнового сантиметрового диапазона на одноклеточные организмы.

Другая серия исследований была посвящена изучению влияния микроволн сантиметрового диапазона ($A = 7,65 - 5,40$ см) на одноклеточные организмы [10]. Оценка летального действия микроволн производилась путем измерения убыли емкостной составляющей импеданса клетки мостовым методом и использованием микроэлектродной техники. Показано, что убывание емкостной составляющей до половины исходного значения полностью обратимо, если прекратить СВЧ-облучение. Затем начинается фаза необратимых изменений. Под действием СВЧ-поля происходят резкое уменьшение активного сопротивления мембраны и незначительное снижение емкостной составляющей, что свидетельствует о возможных изменениях структуры мембраны и ее проницаемости. Эти данные позволили перейти к непосредственному исследованию физико-химических механизмов мембранной активности, на чем следует остановиться подробнее.

4. Влияние микроволнового диапазона на проницаемость эритроцитов человека.

Э. Ш. Исмаилов [11] исследовал влияние микроволн диапазона 1009 МГц интенсивностью 45 мВт/см⁸ на проницаемость эритроцитов

человека для ионов калия и натрия. Облучение проводили в течение 30 мин в условиях термостатирования при 37 °С. Показано, что под влиянием СВЧ-поля происходит заметный выход калия из клеток. Одновременно наблюдается увеличение поступления натрия в клетку, т. е. происходит снижение градиента концентрации этих ионов на мембране эритроцита. Дополнительная инкубация суспензии эритроцитов при температуре 37 °С в течение 30 мин усиливала эффект. Затем наблюдалось постепенное восстановление исходных градиентов.

Для установления возможного пути действия микроволн на проницаемость активный транспорт в эритроцитах ингибировали с помощью моноиодацетата. СВЧ-облучение таких эритроцитов вызвало дополнительный выход калия из клеток и поступление в них натрия по сравнению с контролем, в котором эритроциты подвергались только действию ингибитора. Однако СВЧ-эффект в данном случае менее выражен. Таким образом, было установлено, что микроволны ускоряют диффузию ионов по градиенту концентрации через поры в мембране и одновременно ингибируют активный транспорт, т. е. действие СВЧ-волн на проницаемость мембран является неспецифическим. Возможные молекулярные механизмы такого действия микроволн обсуждались в [12 – 14] на основе двух основных процессов, которые приводят к поглощению СВЧ-энергии в биологических системах: релаксационных колебаний дипольных молекул воды, обуславливающих диэлектрические потери, и колебаний свободных зарядов, приводящих к потерям проводимости в поверхностных слоях мембраны.

Благодаря работам последних лет показана существенная роль «структурной» воды в стабилизации структуры молекул белка [15] и белок-липидном взаимодействии в биомембранах [16, 17]. Характеристическая частота такой воды лежит в области дециметровых радиоволн. Поэтому диэлектрические потери микроволн этого диапазона в структурированной воде должны быть выше, чем в обычной. Наиболее вероятно, что потери СВЧ-энергии вызовут фазовый переход структурированной воды в более жидкое состояние, а это, в свою очередь, должно привести к конформационным перестройкам белковых молекул и изменению степени белок-липидного взаимодействия в мембране клеток.

Потери проводимости у поверхности мембраны (область двойного электрического слоя) также будут выше, чем в остальном объеме

клетки, так как концентрация ионов и ионогенных групп макромолекул с соответствующими характеристическими частотами в поверхностных областях мембраны больше по сравнению с внутри- и межклеточной жидкостью.

Таким образом, в биомембранах поглощается больше СВЧ-энергии относительно окружающего раствора. Часть этой энергии рассеивается в виде тепла, повышая общую температуру системы, а другая часть затрачивается на разрушение гидратных оболочек ионизированной поверхности мембран и переход воды, участвующей в гидрофобных взаимодействиях белковых и липидных компонентов мембраны, в более подвижное состояние. Оба эти процесса вызывают нарушения в молекулярной организации мембран, которые и приводят к изменению ее функций.

Изменение проницаемости мембран эритроцитов под влиянием микроволн было позже подтверждено В. М. Штемлером [18], который при тех же условиях, что и в работе [10], определял однонаправленные потоки ионов калия и натрия из внешней среды внутрь эритроцитов. Было выявлено достоверное уменьшение скорости входа калия на 15 % и увеличение входа натрия на 10 % при облучении эритроцитов СВЧ-полем интенсивностью 50 мВт/см³. В диапазоне частот 898 – 2340 МГц не было обнаружено явной зависимости эффекта от частоты облучения [19]. На частоте 2340 МГц изучалась также зависимость изменения скорости входа калия в эритроциты от интенсивности и длительности воздействия. Было выявлено, что пороговая интенсивность воздействия лежит в области 1 – 10 мВт/см³. Изменение скорости входа калия носило фазный характер, причем вначале наблюдалось уменьшение этой скорости (достигающее минимума через 20 – 30 мин после начала облучения), затем – постепенное возрастание скорости с изменением знака эффекта на положительный и, наконец, снова наблюдалась фаза отрицательного смещения скорости поступления калия в эритроциты.

Изменение проницаемости клеток позднее было обнаружено и зарубежными исследователями [20]. Изучалось действие микроволн на электронпереносящие мембраны митохондрий (ЭМХ) при частотах 500, 1000, 3000 МГц и интенсивностях от 2 до 90 мВт/см² в условиях термостатирования при 34° [21]. В области интенсивностей от 2 до

20 мВт/см² для 1000 и 3000 МГц и до 40 мВт/см² для 500 МГц микроволны повышают энергизацию мембраны митохондрий. При 30 мВт/см² для частот 1000 и 3000 МГц и при 50 мВт/см² для 500 МГц эффекты действия теплового фактора и микроволн становятся сравнимыми, а дальнейшее увеличение интенсивности вызывает разобщение дыхания и окислительного фосфорилирования. Оба эффекта – энергизация и деэнергизация мембраны митохондрий под влиянием микроволн становятся более выраженными при рН 8,5. Известно, что подщелачивание среды способствует лабильности мембран митохондрий за счет увеличения их гидрофильности [22].

5. Мембранная активность микроволн.

Мембранная активность микроволн подтверждена следующим образом [23]: под влиянием дециметровых радиоволн выявлены сдвиги электрофоретической подвижности (ЭФП) эритроцитов, величина и направление которой изменялись в зависимости от интенсивности и длительности облучения. Показано, что изменение ЭФП эритроцитов связано с двумя процессами: деформацией двойного электрического слоя (ДЭС), приводящей к уменьшению ЭФП, и возможными структурными перестройками мембраны эритроцита, вызывающими увеличение числа потенциалобразующих ионов на поверхности клетки.

Деформация ДЭС под влиянием СВЧ-облучения имеет порог в области 1 – 3 мВт/см³. Возможные структурные перестройки в мембране возникают при интенсивности выше 7 – 10 мВт/см³ и находятся в прямой зависимости от интенсивности поля. Оба процесса – следствие преимущественного поглощения СВЧ-энергии у поверхности мембраны (за счет потерь проводимости) и в самой мембране (за счет диэлектрических потерь) по сравнению с остальным объемом среды.

В последнее время была предпринята попытка прямого экспериментального исследования возможности изменения структуры мембран под влиянием дециметровых радиоволн разной интенсивности [24] методом инфракрасной спектроскопии и исследования дейтерообмена, позволяющего оценивать степень доступности пептидных атомов водорода в белках [25, 26]. Выявлено, что СВЧ-облучение диапазона 1009 МГц интенсивностью 45 мВт/см³ приводит к небольшим конформационным перестройкам молекул в мембране, но не вызывает перехода α -спирали или клубка в β -структуру. Дейтерообмен в течение 36 – 38 мин показывает более выраженный переход полосы амид около 1540 см⁻¹ в полосу на 1450 см⁻¹ в облученных телях эритроцитов. Этот

эффект находится в прямой зависимости от интенсивности СВЧ-поля и наблюдается при интенсивностях $10 - 15 \text{ мВт/см}^3$ и выше.

Библиографические ссылки

1. Шван Г. СВЧ-биофизика. СВЧ-энергетика. М. : Мир, 1971. Т. 3. С. 7 – 45.
2. Schwan H. Microwave radiation: Biophysical considerations and standards criteria // YEEB Trans. Bio-Med. Kng. 1972. Vol. 19. P. 304.
3. Пресман А. С. Электромагнитные поля и живая природа. М. : Наука, 1968. 288 с.
4. Девятков Н. Д. Влияние электромагнитного излучения миллиметрового диапазона длин волн на биологические объекты // Успехи физических наук. 1973. Т. 110. Вып. 3. С. 453 – 454.
5. Корнева Л. Г., Гайдук В. И. О принципиальной возможности резонансного воздействия СВЧ-колебаний на гемоглобин // Доклады АН СССР. Серия Биология. 1970. Т. 193. 465 с.
6. Шноль С. Э. Конформационные колебания макромолекул. Колебательные процессы в биологических и химических системах. М. : Наука, 1967. С. 22 – 41.
7. Каменский Ю. И. Влияние дозировки энергии микроволн на параметры нервного импульса // Гигиена труда и биологическое действие электромагнитных волн радиочастот. М. : Наука, 1968. С. 67 – 69.
8. Исмаилов Э. Ш. К воздействию микроволн на нервную систему: тез. докл. всесоюз. конф. по проблеме биофизики нейродинамики и общей биофизики. Л. : Изд-во ЛГУ, 1969. С. 27 – 29.
9. Мирутенко В. И., Богач П. Г. Влияние СВЧ электромагнитного поля на мембранный потенциал нервных клеток изолированных ганглиев моллюска *Planorbis Corneus* // Гигиена труда и биологическое действие электромагнитных волн радиочастот. М., 1972. С. 60 – 61.
10. Исмаилов Э. Ш. О влиянии микроволн на *Opalina ranarum* : дис. ... канд. биол. наук. Л. : Изд-во ЛГУ, 1967. 110 с.
11. *Он же*. К механизму влияния микроволн на проницаемость эритроцитов для ионов калия и натрия // Биологические науки. 1971. № 3. С. 58 – 60.
12. *Он же*. Изменение проницаемости мембран эритроцитов под влиянием микроволн и его механизмы : тез. докл. IV Междунар. биофиз. конф. М., 1972. Т. 4. С. 434 – 435.

13. Исмаилов Э. Ш. К механизму влияния микроволн на проницаемость эритроцитов человека // Гигиена труда и биологическое действие электромагнитных волн радиочастот. М., 1972. С. 61 – 62.

14. *Он же.* К вопросу о физико-химическом воздействии микроволн на биомембраны // Биофизические аспекты загрязнения биосферы. М. : Наука, 1973. С. 67 – 69.

15. Волькенштейн М. В. Молекулы и жизнь. М. : Наука, 1965. 504 с.

16. Боровягин В. Л. Клеточные мембраны // Биофизика. 1971. Т. 16. Вып. 4. С. 746 – 766.

17. Singer S. I. The molecular organization of membranes // Ann. New. of Biochemistry. 1974. Vol. 43. P. 805 – 832.

18. Штемлер В. М. Исследование некоторых сторон механизма биологического действия микроволн : автореф. дис. ... канд. биол. наук. М. : НИИ гигиены труда и профзаболеваний АМН СССР, 1974. 37 с.

19. Шван Х. П., Фостер К. Р. Воздействие высокочастотных полей на биологические системы: электрические свойства и биофизические механизмы // Труды ИИЭР. 1980. Т. 68. № 1. С. 121 – 132.

20. Grant £., Illinger K., Servantie B., Szmigielski S. Session C. effects of microwave radiation at the cellular and molecular level // Ibid. P. 324 – 326.

21. Зубкова С. М. О механизме действия микроволн на биологические мембраны // Труды ЦНИИКФ. М., 1976. Т. 32. С. 15.

22. Конев С. В., Аксенцев С. Л., Черницкий Е. А. Кооперативные переходы белков в клетке. Минск : Наука и техника, 1970. 202 с.

23. Исмаилов Э. Ш. О влиянии СВЧ-облучения на электрофоретическую подвижность эритроцитов // Биофизика. 1977. Т. 22. № 3. С. 493 – 498.

24. Исмаилов Э. Ш. Инфракрасные спектры теней эритроцитов в области полос амид 1 и амид 2 при микроволновом облучении // Биофизика. 1976. Т. 21. Вып. 5. С. 940 – 942.

25. Химия белка : сб. ст. / под ред. М. М. Ботвиник. М. : Мир, 1969. 239 с.

26. Методологические вопросы гигиенического нормирования неионизирующих излучений : тез. докл. всесоюз. семинара. М. : НИИГТПЗ, 1977. 44 с.

Заключение к главе

Атмосфера Земли надежно экранирует биосферу от большей части электромагнитного излучения: до поверхности Земли доходит лишь узкая полоса в области ближнего ультрафиолетового, видимого и ближнего инфракрасного излучений, не зависящих от изменений солнечной активности, а также часть радиоизлучения, зависящего от солнечной активности, но имеющего очень малую интенсивность. Геомагнитное поле не позволяет солнечному ветру приблизиться непосредственно к поверхности Земли. Но сама магнитосфера (с магнитосферным шлейфом и плазмосферой) под воздействием ветра оказывается источником электромагнитного излучения низкой и инфранизкой частоты. В области инфранизких частот ($f < 5$ Гц) ионосфера вновь становится прозрачной для ЭМП, которое может регистрироваться на земной поверхности.

Биосфера зародилась, развивалась и продолжает эволюционировать в условиях постоянно действующего фона ионизирующих излучений. Этот фон создается в основном за счет естественной радиоактивности почвы, Мирового океана и атмосферы; некоторый вклад вносят также космические лучи галактического (ГКЛ) и солнечного (СКЛ) происхождения. Прямых доказательств гипотезы о решающей роли ионизирующих излучений в эволюции биосферы пока нет. Более того, имеются данные об исключительных способностях адаптации некоторых живых существ к высокому уровню радиации.

Не менее важное, но также опосредованное влияние космос может оказывать на биосферу через метеофакторы (давление, температуру, влажность воздуха и т. д.) и особо опасные метеоявления (ураган, наводнение, засуха и др.). Опосредованное влияние космических лучей на биосферу за счет их воздействия на верхние слои атмосферы (опустошение озонового слоя, образование радиоуглерода и т. д.) заслуживает особого внимания. Выяснение роли космических, геологических, климатических и других возможных факторов в эволюции биосферы представляется весьма актуальным также для решения проблемы сохранения окружающей среды.

Электрическая структура атмосферы – газовой оболочки Земли – тесно связана с процессами, протекающими в пространстве от уровня земной поверхности до высот в десятки земных радиусов. Изменение

электрических свойств атмосферы при переходе от нижних к более высоким ее слоям обусловлено двумя основными факторами: уменьшением с высотой плотности воздуха и размещением основного источника энергии – Солнца – вне земной атмосферы. Величина и направление электрического поля широко варьируют в пространстве и времени и зависят от погодных условий, орографии местности, времени года, суток и других факторов. В безоблачную погоду ЭП приблизительно вертикально и его напряженность уменьшается с высотой в среднем от 130 В/м у поверхности Земли до нескольких вольт на метр на высоте 10 км. Известны по крайней мере четыре периода унитарных вариаций ЭП: 11-летний, годовой, 27-суточный, суточный. За последние десятилетия значительно возросла относительная роль антропогенных факторов в формировании электрических полей у земной поверхности. Радио- и телевизионные станции, линии электропередач, объемные заряды, возникающие в атмосфере в результате действия промышленности и транспорта, вследствие процессов горения, испарения, диспергирования веществ в воздухе, создают дополнительные изменения электрического поля. Кроме того, искусственное введение веществ в атмосферу изменяет электрическую проводимость воздуха и влияет таким образом на напряженность естественного поля.

Обнаружен также ряд экспериментальных фактов, указывающих на связь пульсаций градиента потенциала ЭП тропосферы с авроральной активностью. Исследование корреляционных связей пульсаций электрического и магнитного полей основывается на предположении, что волновые процессы, обусловленные электродинамическими явлениями в магнитосфере и ионосфере, являются источниками единого электромагнитного поля в тропосфере. Следует отметить, что наиболее мощные пики в спектрах электрических и магнитных составляющих совпадают по частоте: 0,014, 0,025, 0,032, 0,05 Гц.

Геомагнитное поле Земли складывается из двух частей различной природы: очень медленно меняющейся, почти постоянной, источники которой расположены собственно внутри Земли, и переменной, генерируемой электрическими токами, текущими в ионосфере и магнитосфере. Напряженность переменной части поля составляет не более 2 % от части внутреннего происхождения. Палеомагнитные исследования позволили обнаружить исключительно интересное свойство геомаг-

нитного поля – обращения полярности (инверсии) главного поля, которые многократно имели место в течение геологической истории Земли. Последняя изученная инверсия была в середине четвертичного периода (0,8 млн лет назад). Изложенные представления о природе магнитных возмущений объясняют многие, давно известные свойства возмущений, а именно:

- широтное распределение возмущенности с основным максимумом в зоне авроральной активности;

- возмущенный суточный ход: в средних широтах один максимум приходится на вечерние часы, в полярных широтах имеются два максимума – утренний и вечерний;

- сезонный (годовой) ход с максимумами в эпохи равноденствий, обусловленный тем, что Земля в течение года проектируется на различные гелиографические широты Солнца, а следовательно, на различные активные области;

- 11-летний циклический ход, следующий за 11-летними колебаниями солнечной активности с запаздыванием максимумов магнитной активности на 1 – 3 года;

- 27-дневную повторяемость магнитных возмущений, объясняющуюся 27-дневным синодическим периодом вращения Солнца;

- запаздывание магнитных возмущений на 2 – 4 дня относительно прохождения активных областей на Солнце через центральный меридиан (определяется скоростью потоков солнечного ветра).

Для электромагнитобиологии, формирующейся как самостоятельное научное направление, наибольший интерес представляют аспекты действия ЭМИ, связанные не с мощностью воздействия и поглощенной энергией, а с сигнальными характеристиками, с той информацией, которая закодирована в соответствующих полях и излучениях и является значимой для биосистемы. Среди различных методов анализа биосистем (с учетом ЭМП) можно выделить три общих подхода: кибернетический, синергетический и квантовый.

Факт существования очень слабого электромагнитного излучения общепризнан и экспериментально обнаружен у всех исследованных клеток растений и животных. Анализ проведенных экспериментальных исследований указывает на информационную роль собственного излучения биологических объектов. Действие ЭМП проявляется в следующем:

1. Поскольку все химические процессы синтеза или распада сопровождаются перестройками электронных оболочек молекул, субъединиц мембран и т. д., то неизбежно в процессах синтеза или распада происходит излучение или поглощение квантов ЭМП. Эти процессы могут составить определенный канал передачи информации между мембранными субъединицами, мембранами клеточных органов, клетками, между ДНК и белками.

2. Поскольку электронные состояния сложных систем, в частности биологических, как правило, вырожденные, т. е. обладают разнообразными пространственными формами при одной и той же энергии, то даже очень слабые внешние ЭМП могут выделить одно из многих состояний и запустить в организме определенную цепь процессов синтеза или распада.

3. Возможно нарушение комплементарности, определяемое воздействием излучения на водородные связи, что также существенно для протекания процессов синтеза или распада.

4. Излучение может производить отбор из ряда имеющихся возможностей существования определенных неравновесных состояний. Этот процесс рассматривается как аналог динамической голографии.

5. Наличие коллективизированных π -электронных состояний в биомолекулах приводит к когерентному взаимодействию с излучением всей электронной системы. Характер излучения может также играть существенную роль в переходе электронной подсистемы в коллективное состояние.

Как известно, под действием электромагнитного поля на среду, содержащую свободные заряды и дипольные молекулы, происходят два основных процесса: релаксационные колебания дипольных молекул, вызывающие диэлектрические потери, и колебания свободных зарядов, приводящие к потерям проводимости.

Наряду с тепловым эффектом микроволн, обусловленным потерями проводимости и диэлектрическими потерями, имеет место и резонансное действие ЭМП на белки и фермент-субстратные комплексы.

Контрольные вопросы

1. Какова природа электрического поля атмосферы Земли?
2. Каковы особенности электромагнитных полей естественной природы инфранизкочастотного диапазона?

3. Опишите особенности спектральных характеристик электрического поля Земли.
4. Какова природа геомагнитного поля и его основные характеристики?
5. Какие основные методы анализа биосистем вам известны?
6. Каковы механизмы биологического действия электромагнитных полей геофизической природы?
7. Каковы механизмы биологического действия электромагнитных полей низкой частоты?
8. Перечислите основные циклы электрического и геомагнитного полей Земли.
9. В чем заключается опосредованное влияние космических лучей на биосферу?
10. Каково влияние магнитного поля на скорость окислительно-восстановительных реакций, протекающих в митохондриях?
11. Как проявляются электронный и ядерный магнитные резонансы в живой клетке?
12. Назовите результаты проявления взаимодействия МП и ЭП с биологическими системами.
13. Каковы физические механизмы биологического действия микроволн?
14. Каковы основные методы измерения электрических полей в атмосфере?
15. Перечислите основные задачи приемно-регистрирующего комплекса электромагнитных полей ВлГУ.
16. Каковы основные результаты исследований взаимосвязи показателей здоровья человека с геофизическими полями и солнечной активностью, проведенных в ВлГУ?
17. Каковы основные методы измерения геомагнитных полей в атмосфере?
18. Каковы основные принципы магнитобиологии и магнитотерапии?
19. Приведите примеры применения электромагнитных полей в диагностике и терапии.
20. Какие основные методы измерения электромагнитных полей живых организмов вы можете назвать?

Глава 2. ПРАКТИЧЕСКОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ В МЕДИЦИНЕ И БИОЛОГИИ

2.1. Методы измерения электрических полей в атмосфере

Методы измерения электрических полей в атмосфере целесообразно разделить на три класса: в первом из них напряженность электрического поля оценивается по разности потенциалов между электродами, находящимися в исследуемом поле, во втором – по величине заряда, индуцируемого измеряемым полем на поверхности проводника, в третьем – по влиянию поля на массовое движение электронов или ионов естественной или искусственной природы [1]. Третий класс весьма широк: он включает в себя, по утверждению автора работы [2], более 15 методов, используемых для измерения ЭП на разных высотах в атмосфере. Принятая классификация удобна для дальнейшего обсуждения, однако довольно условна: в частности, в окрестности проводящих электродов, находящихся в ионосферной или магнитосферной плазме, возникает сложная картина распределения ЭП и потоков заряженных частиц, определяющих измеряемые потенциалы электродов. Таким образом, при измерении разности потенциалов оценивается и эффект потоков заряженных частиц в исследуемом поле.

2.1.1. Метод оценки разности потенциалов между электродами

Физическую сущность измерений первого класса помогает уяснить потенциальная диаграмма на рис. 2.1.

Предполагается, что в окружающей среде (околоземном космическом пространстве) имеется достаточно много заряженных частиц, электрическое поле которых существенно сказывается на распределении потенциала в окрестности электрода. Вблизи проводника, который приобретает отрицательный заряд (в силу большей подвижности электронов нежели ионов), создается электрическое поле (рис. 2.1, *a*), экранированное внутри сравнительно узкой дебаевской области (радиусом D) перераспределившимися и сосредоточившимися около проводника положительными ионами. Двойной зонд – устройство, наиболее часто применяемое для измерений первого класса, – представляет собой два проводника, находящихся в измеряемом поле и разнесенных на расстояние d ,

существенно большее дебаевского радиуса D . Собственные потенциалы электродов в атмосфере невелики или равны нулю. На ионосферных высотах, например, они порядка 1 В, а при измерениях в стратосфере на шарах-зондах и аэростатах ими обычно пренебрегают. Однако при измерениях в магнитосфере или, например, на Луне собственный потенциал такого измерительного устройства может достигать значительных величин.

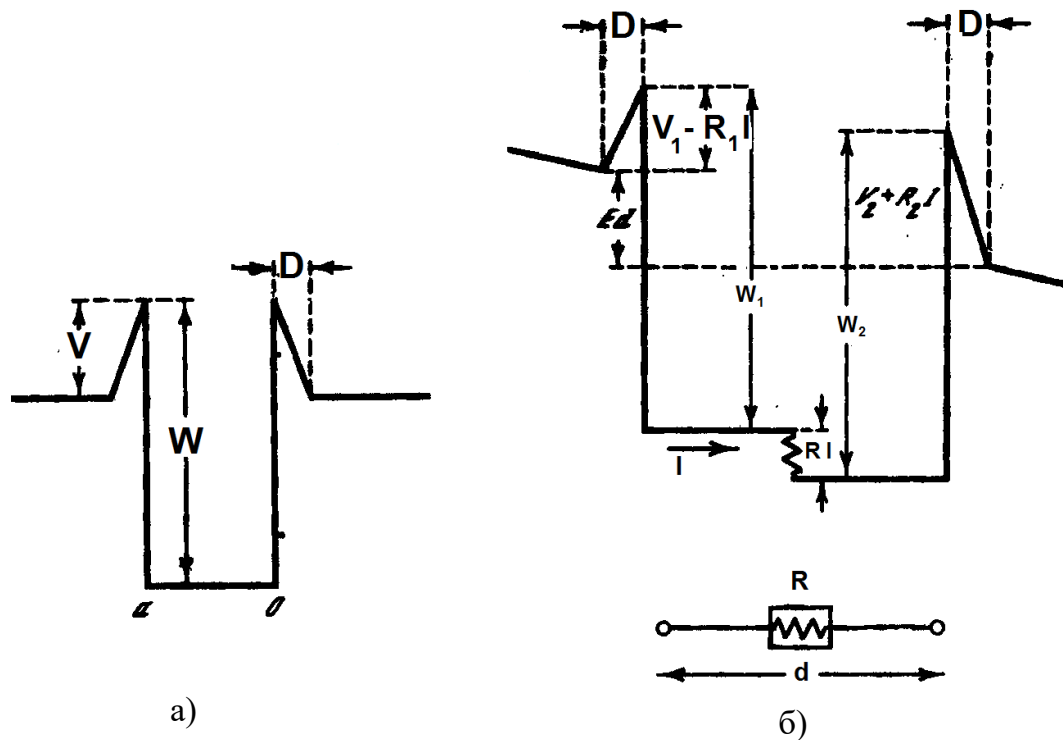


Рис. 2.1. Диаграмма энергии электрона вблизи металлического электрода (а) и двойного зонда (б): W_i – электроды из металла; V_i – собственные потенциалы электродов двойного заряда; R_i – сопротивления покрытий электродов; $i = 1, 2$ относятся к первому и второму электродам зонда соответственно; I – ток электронов; D – дебаевский радиус; d – расстояние между зондами; E – измеряемая напряженность электрического поля

Суммируя падение напряжения по диаграмме, представленной на рис. 2.1 в предположении, что через сопротивление R измерительного прибора протекает ток I , получим соотношение

$$RI = \frac{Ed + (V_1 - V_2) + (W_2 - W_1)}{1 + \left(\frac{R_1}{R}\right) + \left(\frac{R_2}{R}\right)}, \quad (2.1)$$

где V_i – собственный потенциал электрода; W_i – сопротивление покрытия; R_i – работа выхода из него электрона. Индексы $i = 1, 2$ относятся

соответственно к первому и второму электродам зонда; E – напряженность ЭП, измеряемая прибором.

Сопротивление измерительного прибора R , подключенного к зонду, стараются сделать возможно большим – на много порядков больше R_1 и R_2 , так что знаменатель правой части уравнения (2.1) близок к единице. В простых случаях близки к нулю и выражения в скобках числителя, так что показания прибора, измеряющего ток I между электродами, оказываются пропорциональными напряженности ЭП в атмосфере. Это простое рассмотрение помогает понять требования, предъявляемые к конструкции двойного зонда: пространственное разнесение электродов на расстояние, существенно превышающее дебаевский радиус; симметрия и одинаковый материал электродов (уменьшаются выражения в скобках числителя); малая величина сопротивления покрытия; работа электродов в одинаковых условиях в атмосфере и т. д. В этом случае измеряемый ток I пропорционален напряженности электрического поля E . Отсюда можно оценить и источники ошибок измерений, связанные с нарушением указанных выше требований. В целом типичная точность измерений ЭП атмосферы двойными зондами составляет 10 – 20 %, однако при неблагоприятных условиях проведения измерений (малая величина измеряемого поля, значительная фотоэмиссия с электродов, нахождение одного из электродов в тени спутника или ракеты и т. п.) ошибка может значительно возрасти.

Достоинством метода двойного зонда является возможность измерения компонент ЭП в любом направлении. Важно это потому, что многие методы третьего класса не позволяют измерять продольную (вдоль магнитного поля) компоненту E_n , играющую особую роль во многих важных геофизических явлениях. В ряде случаев измерение E_n можно осуществить только методом двойного зонда. Совершенную конструкцию двойного зонда представляет собой, например, прибор – измеритель флюктуации электрического поля (ИФЭП), который был установлен на спутнике Интеркосмос-10 [3]. Он состоял из разнесенных на расстояние 1,5 м трех пар зондов, позволявших измерять все три компоненты напряженности квазистационарного низкочастотного ЭП от 0,01 до 500 Гц. Зондирующие элементы были подключены к электронным блокам, осуществляющим фильтрацию, усиление и кодирование сигнала для передачи по каналам телеметрии на Землю. Вход-

ное сопротивление прибора – 10 Ом, погрешность измерений по амплитуде – 3 %. При помощи ИФЭП были успешно проведены измерения ЭП в магнитосфере.

2.1.2. Индукционный метод

Измерения электрических полей методами второго класса, т. е. по наведенному электрическому заряду (индукционный метод), проводились также на различных высотах в атмосфере, в том числе на ракетах и спутниках. Однако индукционный метод пригоден только для измерений в нижней атмосфере: использование его в ионосферной и магнитосферной плазме требует дополнительных теоретических разработок, без которых ошибки измерений могут составлять порядки величин. Этот метод применялся, в частности, для измерения возмущений ЭП антропогенного характера в следе, оставляемом космическим аппаратом [4].

Для измерений электрического поля в приземном слое применяются два основных метода второго класса – метод радиоактивных коллекторов (зондов) и динамический. Сущность метода зондов заключается в том, что в исследуемое пространство помещают проводящее тело (шар, пластина, острие), которое за время релаксации приобретает потенциал пространства. Постоянная времени $\tau = RC$ (где R – суммарное сопротивление воздушного слоя «зонд – земля» и входного сопротивления прибора, C – суммарная емкость прибора) зависит от состояния воздушной среды (влажности, ионизации и т. д.) и имеет сопротивление $10^{12} - 10^{19}$ Ом. Вследствие большого значения τ зонд может применяться для измерения лишь медленно меняющихся ЭП. Инерционность зондов при измерениях в нижней атмосфере стремятся уменьшить, как правило, применяя покрытие коллекторных пластин радиоактивными веществами с мягким излучением, безопасными на расстоянии 5 – 20 см. Дополнительная ионизация воздуха вблизи радиоактивных коллекторов уменьшает сопротивление воздушной среды и позволяет проводить измерение потенциалов и полей с частотой ниже 10 Гц. Радиоактивный зонд прост, удобен в обращении и рассчитан на длительную работу. Однако возникающее вблизи его поверхности ионизованное облако обуславливает частичное экранирование измеряемого электрического поля. Могут возникать некоторые неконтролируемые искажения записи при сносе ионизованного облака ветром, что необходимо учитывать при обработке результатов измерений электрических полей.

Второй метод этого же класса – динамический – обладает меньшей, чем зондовый, инерционностью, но также используется для измерения медленно меняющихся ЭП в диапазоне от 0 до 10 Гц [5, 6].

Принцип работы динамического полимера основан на использовании линейной зависимости поверхностной плотности заряда G , индуцированного внешним ЭП напряженностью E на поверхности проводящего тела заданной формы $E = 4\pi G$.

Функциональная схема одного из вариантов прибора, осуществляющего этот метод, приведена на рис. 2.2. Датчик динамического полимера преобразует постоянное или медленно меняющееся ЭП в переменный электрический сигнал, снимаемый с измерительной пластины 1, посредством периодического экранирования ее при вращении заземленного экрана 2. Пороговая чувствительность прибора определяется в основном уровнем шума щеток, заземляющих вращающийся экран 2. Сигнал с измерительной пластины 1 поступает на усилитель У1, затем подаётся на синхронный детектор СД. Опорный сигнал для синхронного детектора формируется электромеханическим генератором (ЭМГ), расположенным на оси электромотора М, вращающего экран 2. Применение синхронного детектора позволяет определять знак напряженности измеряемого ЭП. Выпрямленный и усиленный сигнал поступает в блок полосовых активных фильтров Φ_i .

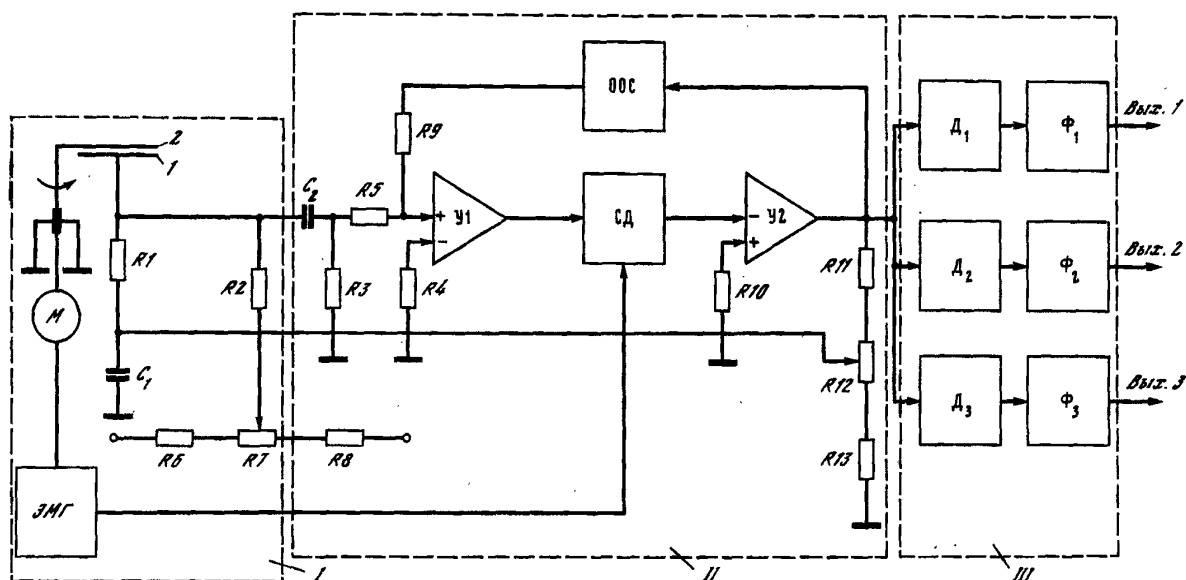


Рис. 2.2. Функциональная схема динамического полимера: I – датчик; II – усилитель; III – блок фильтров; C_i – емкости ($i = 1, 2$); R_i – сопротивления ($i = 1 - 13$)

Для стабилизации параметров измерительного тракта в приборе введена отрицательная обратная связь (ООС). Уровень выходного напряжения регулируется делителями D_i , расположенными в блоке фильтров. Электрическая схема усилителя прибора выполнена на основе интегральных микросхем К284УД. Конструктивно усилитель размещен в одном корпусе с датчиком и соединен с блоком фильтров кабелем длиной 30 м. Прибор имеет следующие параметры: динамический диапазон измеряемого ЭП – 60 дБ, частотный диапазон – 0 – 10 Гц с отдельной регистрацией в диапазонах 0 – 0,01, 0,01 – 0,1 и 0,1 – 1 Гц.

Достоинством динамического метода является возможность выделения исследуемого сигнала, соответствующего изменениям ЭП, посредством усиления переменного электрического сигнала, частота которого соответствует частоте вращения экрана. Основные недостатки в существующем варианте метода – использование механического контакта для заземления вращающегося экрана, а также необходимость использования опорного напряжения.

Для надежности анализа результатов наблюдения пульсаций электрических полей используются, как правило, два динамических полимера. Пример синхронной записи двумя приборами, разнесенными на 10 м, в условиях хорошей погоды приведен на рис. 2.3, а. Метод радиоактивных коллекторов и динамический метод используются для измерения у поверхности Земли одной компоненты вектора ЭП, преимущественно вертикальной (рис. 2.3, б).

Три компоненты вектора напряженности квазистатического электрического поля в свободной атмосфере могут быть измерены с самолетов четырьмя динамическими полимерами, один из которых предназначен для оценки напряженности поля, создаваемого зарядом самолета. Для измерения вектора напряженности ЭП у поверхности Земли можно предложить конструкцию, состоящую из трех или пяти измерителей ЭП. При этом могут использоваться любые датчики, обладающие неизотропной осесимметричной диаграммой направленности. К их числу относятся описанные выше радиоактивные коллекторы и динамические полимеры.

Проведение измерений ЭП на быстро движущихся объектах, таких как ракеты и спутники, осложняется тем обстоятельством, что измеряемое ЭП отличается от поля в неподвижной земной системе координат на величину $\vec{v}_0 \vec{H}$, где \vec{H} – напряженность ГМП. Неточности в

определении направления скорости \vec{v}_0 объекта (спутника или ракеты) относительно поля \vec{H} , а также ошибка в определении его величины обуславливают основные погрешности измерений.

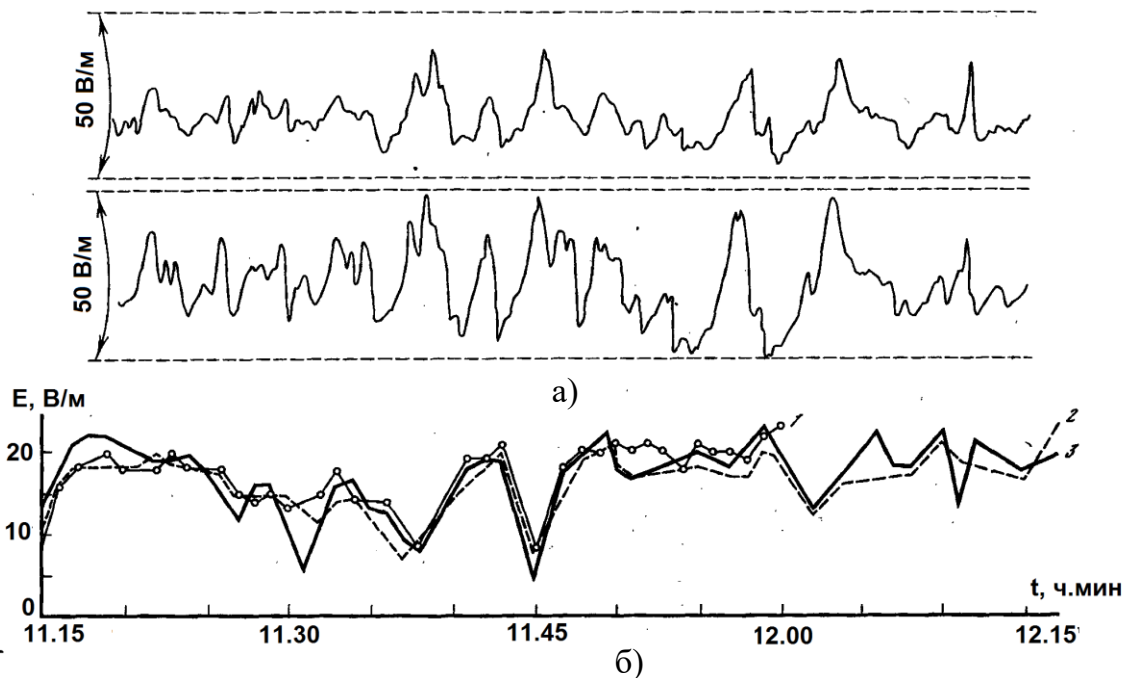


Рис. 2.3. Примеры синхронных записей ЭП: а – записи двумя динамическими полимерами, расположенными на расстоянии 10 м один от другого (с. Михайловское, Московская обл.); б – записи ЭП динамическим полимером (1) и радиоактивными коллекторами, соединенными с гальванометром (2) и струнным электрометром (3) (обс. Терскол в долине Азау, район Эльбруса)

Типичные значения произведения $\vec{v}_0 \vec{H}$ составляют 10 – 50 мВ/м для измерений на ракетах и 500 мВ/м – на спутниках, в то время как измеренные значения напряженности ЭП в верхней атмосфере составляют 10 – 100 мВ/м в высоких и 1 мВ/м – в низких широтах. Поскольку наибольшая чувствительность двойного зонда (единицы мВ/м) сравнима с систематическими ошибками (около 1 мВ/м), связанными в основном с неточностями измерения высоты, то ясно, что измерения величин поперечных ЭП на широтах, достаточно удаленных от авроральной зоны, по-видимому, невозможны. Еще в большей степени это относится к измерению продольных полей, величины которых на порядок или на несколько порядков меньше. Понятно, что индукционное поле $\vec{v}_0 \vec{H}$ имеет лишь поперечную компоненту, однако погрешности в определении ориентации векторов могут сделать измерения продольного электрического поля ошибочными.

2.1.3. Влияние поля на массовое движение электронов или ионов естественной или искусственной природы

Среди методов измерений электрического поля третьего класса в первую очередь следует назвать метод искусственных ионизованных облаков, который основан на эффекте действия электрического и магнитного полей на возмущения в ионосферной и магнитосферной плазмах [7]. Искусственные ионизованные облака представляют собой именно такого рода возмущения, движение и развитие которых в области высот более 130 км определяются преимущественно действием ионосферных ЭП. Постановка измерений ЭП по скорости дрейфа искусственных ионизованных облаков предъявляет определенные требования к теории возмущений в плазме и, как стало очевидно в последние годы, явилась мощным стимулом её развития. Необходимо было оценить принципиальную возможность определения неискаженных ЭП в верхней атмосфере по дрейфам искусственных ионизованных облаков с учетом влияния на их движение ряда дополнительных факторов.

На заряженные частицы ионизованного облака действуют электромагнитные поля, силы трения, определяемые столкновениями заряженных частиц с нейтральными, а также силы тяжести и градиентов парциальных давлений. В слабых облаках, имеющих небольшие размеры, возмущениями МП за счет движений заряженных частиц в облаке можно пренебречь и считать, что напряженность МП в пределах облака постоянна. Обычно пренебрегают также эффектами силы тяжести и градиентов давления. Если можно пренебречь и возмущениями, вносимыми ионизованным облаком в атмосферное электрическое поле E , то скорость перемещения облака есть просто скорость дрейфа плазмы

$$\vec{v}_{\text{пл}} = \frac{\vec{E} \cdot \vec{H}}{H^2}. \quad (2.2)$$

В этом случае по скорости перемещения облака можно определить поперечную компоненту ЭП в верхней атмосфере

$$\vec{E}_{\perp} = -\vec{v}_{\text{пл}} \cdot \vec{H}.$$

Если возмущения, создаваемые облаком в ЭП атмосферы, заметны, то в качестве следующего приближения вместо формулы (2.2) используют более сложное выражение [8]

$$\vec{v}_{\text{пл}} = \frac{2}{1+\lambda} \left[\vec{E} \frac{\vec{H}}{H^2} + \frac{1}{K} \left(\vec{E}_{\perp} + \vec{v}_{\text{н}} \frac{\vec{H}}{H} \right) \right] + \frac{\lambda-1}{\lambda+1} \vec{v}_{\text{н}}, \quad (2.3)$$

где λ – отношение педерсеновских проводимостей, проинтегрированных вдоль геомагнитной силовой линии соответственно при наличии и отсутствии ионизованного облака; K – отношение частоты столкновений ионов с нейтральными частицами к гирочастоте ионов; $\vec{v}_{\text{н}}$ – поперечная скорость нейтральных частиц.

Анализ формулы (2.3) показывает, что до высот примерно 130 км (где $K \gg 1$) на средних широтах преимущественное влияние на движение ионизованного облака должен оказывать ветер, а выше 130 км – электрическое поле. Выражение для поперечной компоненты ЭП в экспериментах с искусственными бариевыми облаками

$$\vec{E}_{\perp} = \frac{\lambda+1}{2} \left[-\vec{v}_{\text{пл}} \vec{H} + kH(\vec{v}_{\text{пл}} - \vec{v}_{\text{н}}) + \frac{\lambda-1}{\lambda+1} v_{\text{н}} \vec{H} \right]$$

можно получить из формулы (2.3) для высот, где электрическое поле оказывает преимущественное влияние [8]. Поправка, вносимая членом $kH(\vec{v}_{\text{пл}} - \vec{v}_{\text{н}})$, мала, если $k < 1$, что справедливо для высот, бóльших 130 км, а также для обычно создаваемых достаточно слабых облаков ($\lambda \approx 1$) на высотах, бóльших ~ 180 км.

Поскольку свободные атомы и ионы испускают свет, соответствующий лишь отдельным спектральным линиям, светимость даже довольно плотного искусственного облака плазмы оказывается весьма низкой. Чтобы отличить облако от фонового излучения неба, эксперимент (обычно с хорошо светящейся бариевой плазмой) проводится в сумерках, когда облако освещено Солнцем, а наблюдатели находятся в тени Земли. Солнечное излучение является постоянно действующим, наиболее простым и доступным средством ионизации и возбуждения частиц искусственной плазмы.

Для определения напряженности электрического поля необходимо провести фотографирование ионизованного облака из двух или более пунктов, чтобы на фотоснимках были видны одновременно изображения и облака звезд. По известным сферическим координатам звезд определяют координаты характерных точек облака; по изменению координат во времени рассчитывают скорость его движения.

В целом метод искусственных ионизованных облаков более чувствителен, чем метод двойных зондов, – им измерены ЭП напряженностью менее 1 мВ/м. Этот метод свободен от многих недостатков прямых измерений приборами со спутников и ракет, а возмущения, вносимые облаком в измеряемые ЭП, существенно меньше, чем возмущения от космических аппаратов, и в ряде случаев их можно оценить с достаточной точностью. К сожалению, оказалось, что ионизованные облака вносят в ионосферную плазму возмущения весьма сложной структуры, в определенной степени препятствующие простой интерпретации результатов наблюдений. Так, наряду с основным искусственно созданным облаком, которое обычно выпускается где-то в области F ионосферы, образуются так называемые «отраженные» облака в расположенных ниже ионосферных областях с высокой электрической проводимостью. Материалом для них служит естественная ионосферная плазма. Естественные процессы развития возмущений приводят к образованию последовательности тонких полос в первоначальном облаке [9, 10].

Скорость дрейфа ионосферной плазмы измеряют и не внося в неё искусственных возмущений. Это также весьма распространенный метод измерения ЭП [11, 12] с высокой точностью (до 0,3 мВ/м). Суммарное время, за которое удается получить данные о поле – порядка нескольких минут. Но у этого метода есть и очень существенные недостатки. Прежде всего число радиостанций, на которых возможно проведение измерений ЭП методом некогерентного рассеяния, очень ограничено, а их распределение по земному шару крайне неоднородно. В измерениях определяется лишь одна компонента скорости дрейфа, а следовательно, лишь одна компонента электрического поля. Наконец, дрейф плазмы может быть вызван не только действием ЭП, но и такими причинами, как движение нейтрального газа, сжатие и расширение ионосферы, внутренние гравитационные волны, потоки плазмы из протоносферы и др. Оценить роль этих факторов достаточно сложно.

Таковы методы измерения электрических полей в атмосфере, нашедшие наибольшее распространение. Из числа менее распространенных упомянем лишь некоторые. Так, были проведены измерения ЭП при помощи зондов Лэнгмюра, представлявших собой два электрически изолированных полуцилиндра [13]. По вольтамперной характеристике обоих полуцилиндров определялись электронная температура

и концентрация по обычной методике, а по разности токов ΔI на полуцилиндрах при их отрицательном потенциале удавалось получить сведения о потоке плазмы. Если считать, что этот поток определяется дрейфом плазмы в электрическом и магнитном полях, то

$$\Delta I = neA\phi \frac{\vec{E} \cdot \vec{H}}{H^2},$$

где n – электронная концентрация; e – заряд электрона; A – площадь поверхности каждого полуцилиндра; ϕ – фактор фокусировки.

Из-за некоторой неопределенности в величинах A и ϕ точность измерений зондами Лэнгмюра ниже, чем двойными зондами. Предполагалось, что другими факторами, влияющими на поток плазмы, т. е. столкновениями частиц и градиентами давлений, можно пренебречь, и поток возникает только под действием ЭП (это обычное для подобных измерений предположение).

Определение ЭП проводилось также по потокам тепловых ионов [14] в случаях попадания их в область тормозящего потенциала детекторов, пары которых устанавливались антипараллельно друг другу и перпендикулярно оси вращения ракеты. Тормозящий потенциал в этих измерениях поддерживался из условия постоянства тока на зонд, а измеряемой величиной являются изменения тормозящего потенциала при вращении ракеты. Чувствительность метода около 1 мВ/м, точность измерений – примерно 20 %. Отмечается согласие результатов эксперимента с измерениями ЭП двойными зондами.

Представляет интерес получение информации об электрических полях по радиолокационному прослеживанию следов ракет и спутников и данным о потоках плазмы, получаемым в результате изменения связи между двумя антеннами, когда попеременно то одна, то другая является то передающей, то приемной.

Перспективным считается метод измерения электрического поля по углу отклонения пучков заряженных частиц – электронов или ионов. Использовать этот метод целесообразно там, где плотность частиц среды мала настолько, что столкновения частиц практически отсутствуют. Описав одну или несколько гироокружностей, частицы пучка должны улавливаться детектором на спутнике. Измеряемым параметром является смещение пучка, обусловленное дрейфом его частиц в ЭП. Дрейф за счет действия ЭП необходимо отделить от дрейфа,

обусловленного градиентом МП. Принципиально этого можно достичь, меняя энергию пучка. В спутниковом эксперименте ток электронного пучка может составлять примерно 10^{-8} А. В электрическом поле напряженностью 1 мВ/м и МП 100 нТл дрейф пучка составит около 3 м за гиропериод. Преимуществом эксперимента можно назвать достаточную удаленность пучка от космического аппарата (в результате чего влияние его будет невелико), а также принципиальную возможность измерения и продольной компоненты ЭП. По-видимому, возбуждение неустойчивостей и колебаний в плазме может существенно осложнить измерения.

Итак, измерение электрических полей атмосферы Земли в принципе может проводиться на всех ее уровнях. В наземных условиях наиболее широко используются индукционный динамический метод (динамические полимеры) и более простой, но менее точный метод радиоактивных коллекторов. В тропосфере электрические поля (вместе с зарядом самолета) измеряются четырьмя динамическими полимерами. В верхней атмосфере измерения электрических полей ведутся методом двойных зондов, а также методом искусственных ионизованных облаков. В космическом пространстве для измерения электрических полей целесообразно использовать естественный вакуум с целью разработки и совершенствования метода отклонения пучка заряженных частиц в электрическом поле.

В заключение следует отметить, что основные методы измерения электрических полей разработаны для исследования электрических процессов в атмосфере с целью построения общей теории атмосферного электричества и решения ряда прикладных задач, в частности, прогноза погоды и искусственного воздействия на нее. Дополнительный электромагнитный фон, создаваемый источниками антропогенного характера, необходимо по возможности исключить или учесть при обработке экспериментальных данных, полученных в естественных условиях. С этой целью датчики в период измерений электрического поля располагались на значительных расстояниях от антропогенных источников.

Для измерения электрических полей в окрестности биообъектов необходимо учитывать особенности структуры возмущенного биообъектами поля, а также использовать эффективные методы экранирования биологических систем от совокупного действия полей многих источников помимо исследуемого.

Для дальнейшего совершенствования методов измерения электрических полей атмосферы Земли и излучений, создаваемых живыми системами, необходимо принять меры к увеличению чувствительности, разрешающей способности, малогабаритности и автоматизации измерений напряженности как медленно меняющихся электрических полей (типа унитарной вариации), так и переменных полей различных частотных диапазонов.

Библиографические ссылки

1. Phalson U. Theory of electric fields measurements conducted in the magnetosphere with electric probes // Space Sci. Revs. 1967. Vol. 7. № 2/3. P. 238 – 262.

2. Mozer F. S. Analysis of techniques for measuring DS and AC electric fields in the magnetosphere // Ibid. 1973. Vol. 14. № 2. P. 272 – 313.

3. Klimov S. I., Korepanov V. E. Some results of investigating the electric fields with Intercosmos 10 satellite // Stud. geophys. et geod. 1977. Roc. 21. № 2. P. 200 – 204.

4. Koot K., Brummond G., Schumann G. Ionospheric plasma drifts derived from wake measurements // Planet and Space Sci. 1971. Vol. 19. T. 3. P. 345 – 355.

5. Красногорская Н. В. Электричество нижних слоев атмосферы и методы его измерения. Л. : Гидрометеиздат, 1972. 323 с.

6. Красногорская Н. В., Ремизов В. П. Пульсации электрического поля атмосферы Земли. Физико-математические и биологические проблемы действия электромагнитных полей и ионизации воздуха. М. : Наука, 1975. С. 49 – 55.

7. Герендель Г., Люст Р. Искусственные облака плазмы в космическом пространстве // Успехи физической науки. 1979. Т. 98. Вып. 4. С. 709 – 721.

8. Haerendel G., Lust R., Rieger E. Nation of artificial ion clouds in the upper atmosphere // Planet. And Space Sci. 1967. Vol. 15. № 1. P. 1 – 24.

9. Linson L. M., Workman J. B. Formation of striation in ionospheric plasma clouds // J. Geophys. res. 1970. Vol. 75. № 16. P. 3211 – 3219.

10. Simon A., Sleeper A. M. Barium clouds growth in a highly conducting medium // *Ibid.* 1972. Vol. 77. № 13. P. 2353 – 2358.

11. Banka P. M., Rino C. L., Wickwar V. B. Incoherent scatter radar observations of westward electric fields and densities in the auroral ionosphere // *Ibid.* 1974. Vol. 78. № 1. P. 187 – 198.

12. Wedde T., Doupnic J. R., Banka P. M. Chatanika observations of the latitudinal structure of electric fields and particle precipitation on November 21, 1975 // *Ibid.* 1977. Vol. 82. № 19. P. 2743 – 2751.

13. Bering E., Kelley M., Mozer F. E. Split Langmuir probe measurements of currents, electric fields, temperatures and densities in an aurora // *Eos Trans. AGU.* 1970. Vol. 51. № 4. 404 p.

14. Carlson C. W. Measurements of auroral electric fields with a differential retarding potential analyzer // *Eos Trans. AGU.* 1971. Vol. 52. № 4. 329 p.

2.1.4. Электростатический флюксметр

В ВлГУ разработан флюксметр, отличающийся от известных тем, что в нем реализованы меры по уменьшению погрешности измерений. Применение цифрового метода измерения амплитуды сигнала измеряемого тока с входного преобразователя позволяет исключить погрешности, связанные с дрейфом нуля операционных усилителей, а также решить проблему оцифровки экспериментальных данных и передачи их в приемный компьютер. Такие приборы можно объединить в сеть. Флюксметр позволяет измерять напряженность электрического поля в пределах 10000 В/м при среднеквадратичном значении ошибки измерения 1 В/м. Рабочая полоса частот – 5 Гц, напряжение питания – 12 В.

При изучении атмосферного электрического поля вблизи поверхности Земли различные группы исследователей часто интересуют динамика во времени вертикального градиента потенциала поля. Под термином «вертикальный градиент потенциала у Земли» понимают либо действительное значение dV/dx на поверхности, либо потенциал на высоте 1 м в зависимости от того, каким образом производятся измерения. Но существенные различия в результатах, получаемых на основании этих двух определений, обнаруживаются чрезвычайно редко.

Градиент потенциала у поверхности Земли оказался наиболее легко измеряемым элементом атмосферного электричества. В настоящее время методы его измерения можно разделить в основном на две группы [1].

К первой группе относят методы измерения разности потенциала между двумя точками, расположенными на различных высотах, при этом одна из них обычно совпадает с поверхностью Земли. Для того чтобы измерить потенциал в некоторой точке, необходимо иметь устройство, с помощью которого проводнику сообщается потенциал, равный потенциалу окружающего воздуха. Вследствие проводимости воздуха изолированный проводник постепенно приобретает потенциал окружающей среды, и этот эффект был использован в первых измерениях такого типа (П. Ш. Лемонье (1752), Ч. Беккария (1775) и др.) [1]. Метод позволяет определить потенциал пространства путем измерения разности потенциалов между проводником и землей с помощью различных приборов при условии, что измерительные устройства имеют малую входную емкость и высокое входное сопротивление. При этом скорость процесса измерения весьма мала. Для ее увеличения используют коллекторы, которые, однако, требуют внесения поправок в результаты измерений.

При использовании методов второй группы значение градиента потенциала получают с помощью измерения «связанного заряда» на части поверхности Земли или на теле, соединенном с землей. Величина «связанного заряда» определяется градиентом напряженности поля. При его изменении меняется и величина «связанного заряда». Изменение напряженности поля, как правило, производится сторонними силами. В зависимости от того, как это делается, существуют различные виды приборов.

В одних из них, получивших название «электростатические флюксометры», или «индуцированные вольтметры», о величине градиента потенциала электростатического поля судят по амплитуде сигнала переменного тока. В других – выходной сигнал представляет собой постоянный пульсирующий ток. В одних конструкциях заземленный экран попеременно экспонирует и экранирует проводник, соединенный с землей через измерительное устройство.

В других конструкциях экран закреплен, а проводник перемещается относительно него, попеременно открываясь и закрываясь. В некоторых случаях используется несколько проводников, следующих один за другим, в течение времени экспозиции.

Исторически первым флюксометром был прибор Харнуэлла и Ван-Воориса (1932) [1]. Он состоял из измерительной неподвижной круглой пластины из материала с хорошей электропроводностью, над которой была закреплена другая пластина, состоящая из двух 90-градусных секторов круга. Между этими пластинами был помещен ротор, соединенный с землей и также состоящий из двух 90-градусных секторов. Ротор вращался в горизонтальной плоскости с постоянной скоростью так, что, когда секторы ротора оказывались под секторами верхней пластины, измерительная пластина частично открывалась и подвергалась действию поля. В промежутках между этими моментами она полностью экранировалась, и в цепи, соединяющей измерительную пластину с землей, возникал переменный ток, амплитуда которого была пропорциональна напряженности измеряемого поля. Для определения знака поля Ранс, Килинский и Аккарди [2] применили вспомогательный генератор и синхронный детектор.

Рассмотренный принцип работы измерителя напряженности электрического поля не претерпел существенных изменений с пятидесятих годов прошлого века. Разрабатывались новые схемы измерительных усилителей, вносились изменения в конструкцию прибора, но новых или иных принципов измерения электростатических полей, имеющих простую и надежную практическую реализацию, пока не предложено.

Флюксометр – прибор, предназначенный для измерения интенсивности медленно меняющихся во времени электрических полей, в частности, напряженности атмосферного электрического поля. В основе его работы лежит принцип действия электростатического генератора. Любая конструкция флюксометра должна преобразовывать измеряемое электрическое поле в быстро меняющееся переменное, которое воздействует на измерительный электрод, т. е. должен существовать механизм, посредством которого такое преобразование становится возможным. В классическом устройстве преобразование поля осуществляется

механическим способом за счет вращения лопастей, напоминающих крылья ветряной мельницы. Поэтому существует другое название флюксметра – FieldsMill, или «вертушка». Его конструкция показана на рис. 2.4.

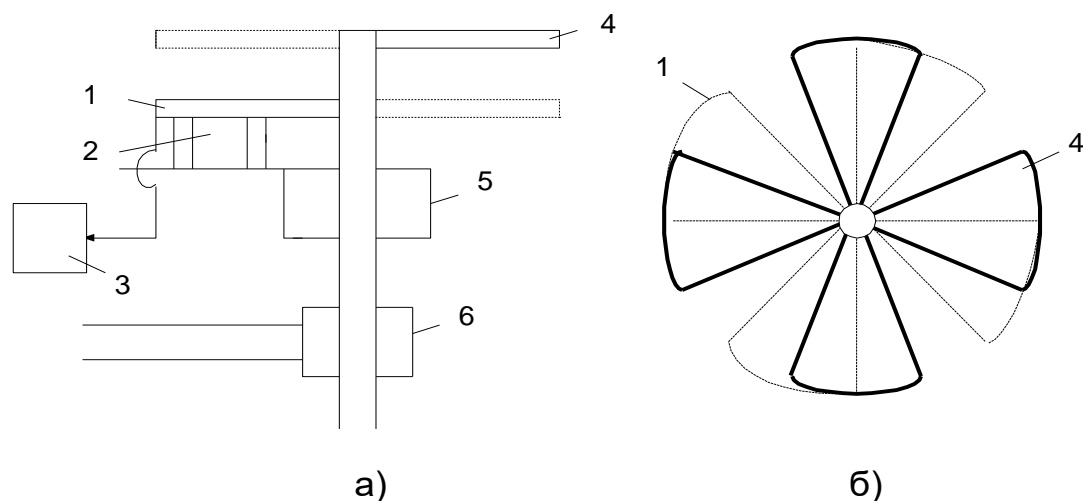


Рис. 2.4. Флюксметр: а – разрез; б – вид сверху; 1 – закрепленные лопасти; 2 – изолятор; 3 – усилитель; 4 – движущиеся лопасти; 5 – привод; 6 – опорный генератор

Прибор состоит из неподвижной измерительной пластины 1, закрепленной на изоляторах 2; вращающейся экранирующей пластины 4, соединенной с корпусом щетками; усилителя 3; коммутатора, или опорного генератора 6; привода (электромотора) 5.

За счет энергии электромотора лопасти экранирующей пластины как бы «режут» силовые линии измеряемого электрического поля. Так как измерительная пластина при этом находится в переменном электрическом поле, в ней индуцируются заряды, движение которых воспринимается усилителем. В отсутствие измеряемого электрического поля (например, при полной экранировке прибора) на выходе усилителя будет наблюдаться сигнал, величина которого определяется контактной разностью потенциалов между экранирующей и измерительной пластинами. Этот сигнал задает предел чувствительности флюксметра. Коммутатор, или опорный генератор, используется для определения знака направления поля.

Работу прибора можно объяснить и с иной точки зрения. Действительно, вращающаяся экранирующая и измерительная пластины образуют конденсатор переменной емкости. Если такой конденсатор поместить в постоянное электрическое поле, то через него потечет переменный ток, пропорциональный интенсивности поля. Но переменный конденсатор можно реализовать и изменением расстояния между пластинами. Эта идея используется в динамических конденсаторах вибрационного типа, которые также применяются для изучения атмосферного электричества. Однако такие приборы имеют более сложную конструкцию, чем флюксметр [3].

Ясно, что механическое изменение емкости измерительного конденсатора (датчика) сопряжено с пониженной надежностью прибора и является причиной появления дополнительных помех. Казалось бы, что модуляция емкости электрическим способом позволит существенно улучшить характеристики флюксметра. Этого можно достигнуть изменением диэлектрической проницаемости диэлектрика, находящегося внутри (снаружи) измерительного конденсатора [2], применением варикапов [4], электрической коммутацией воспринимающих пластин различной пространственной конфигурации [5, 6]. Однако свойства сегнетоэлектриков в значительной степени зависят от температуры и влажности внешней среды, варикапы имеют малый диапазон управляющих напряжений, а современные аналоговые ключи вносят значительные искажения в информационный сигнал. Именно эти обстоятельства, а также начинающаяся с нуля частотная характеристика прибора объясняют тот факт, что современные флюксметры по-прежнему имеют ротационный тип и широко используются в научных исследованиях.

Таким образом, классический электростатический флюксметр по-прежнему не утратил своих позиций среди измерительных приборов, но вместе с тем остаются пути его модернизации в части конструкции привода и электрической схемы.

Принимая во внимание приведенный выше анализ возможных погрешностей и предъявляемые к флюксметру технические требования, был разработан и изготовлен его действующий макет.

Библиографические ссылки

1. Чалмерс Дж. А. Атмосферное электричество : пер. с англ. / под ред. И. М. Имянитова. Л. : Гидрометеиздат, 1974. 420 с.

2. Имянитов И. М. Приборы и методы для изучения электричества атмосферы. М. : Изд-во ГТТИ, 1957. 483 с.

3. Мусин Р. Ф., Морозов В. А., Матлашов А. Н. Модуляционный измеритель напряженности слабых квазистатических электрических полей // Приборы и техника эксперимента. 1978. № 5. С. 127 – 128.

4. Гер А. А., Левин А. С., Носов Ю. Р. Электрометрический вариант // Полупроводниковые приборы и их применение. Вып. 28. М. : Сов. радио, 1974. 496 с.

5. Артамонов О. М., Зынь В. И., Курочкин Е. П. Измерение потенциалов на поверхности диэлектриков динамическим конденсатором // Реферативный журнал «Метрология и измерительная техника». 1974. № 6. С. 59 – 61.

6. Радиотехнические системы : учеб. для вузов / под ред. Ю. М. Казаринова. М. : Высш. шк., 1990. 496 с.

2.1.5. Система разнесенного в пространстве мониторинга электрического и геомагнитного полей пограничного слоя атмосферы на полигоне ВлГУ

С целью исследования электрического и геомагнитного полей инфранизкочастотного диапазона и воздействия их на организм человека создана система многоканального синхронного мониторинга электрического и геомагнитного полей на разнесенных в пространстве станциях: физический экспериментальный полигон ВлГУ; станция на озере Байкал Института солнечно-земной физики СО РАН; станция в поселке Паратунка (Камчатка), Институт вулканологии и сейсмологии

ДВО РАН; станция в г. Обнинск на базе научно-производственного объединения «Тайфун». Формируются базы экспериментальных данных по разнесенным в пространстве станциям. Создание многопунктной системы синхронных регистраций электрического поля пограничного слоя атмосферы с разнесением в пространстве на десятки и сотни километров систем регистрации позволяет исследовать, в частности, приливные вариации электрического поля, оказывающие глобальное воздействие на весь Земной шар. Также при совместной спектрально-корреляционной обработке экспериментальных данных по разнесенным в пространстве станциям можно добиться снижения воздействия местных помех и усилить эффект от влияния глобальных приливных процессов на электрическое и геомагнитное поля пограничного слоя атмосферы. Основные результаты исследований, базирующиеся на данных мониторинга электромагнитных полей на физическом экспериментальном полигоне, приведены в [1 – 10].

Основной экспериментальной базой проводимых исследований является физический экспериментальный полигон ВлГУ, расположенный в 40 км от г. Владимира на территории 4 га и служащий для непрерывных синхронных регистраций электрического и магнитного полей в диапазоне 0,00001 – 100 Гц. Комплекс приемных антенн включает в себя антенны наземного, подземного и подводного типов, магнитные антенны (феррозондовые магнитометры), флюксометры для измерения электростатического поля в приземном слое, систему графитовых электродов, метеокомплекс (рис. 2.5, 2.6).

На рис. 2.7 дана структура разнесенного в пространстве мониторинга.

На рис. 2.8 приведены примеры записей электрического поля датчиками и метеоданных на физическом полигоне ВлГУ. На рис. 2.8, *з, д* приведены примеры спектров электрического и геомагнитного полей в инфранизкочастотном диапазоне. Характер спектров говорит о том, что именно в этом частотном диапазоне наиболее сильно должно проявляться воздействие электромагнитного поля Земли (ЭМПЗ) на земные процессы.

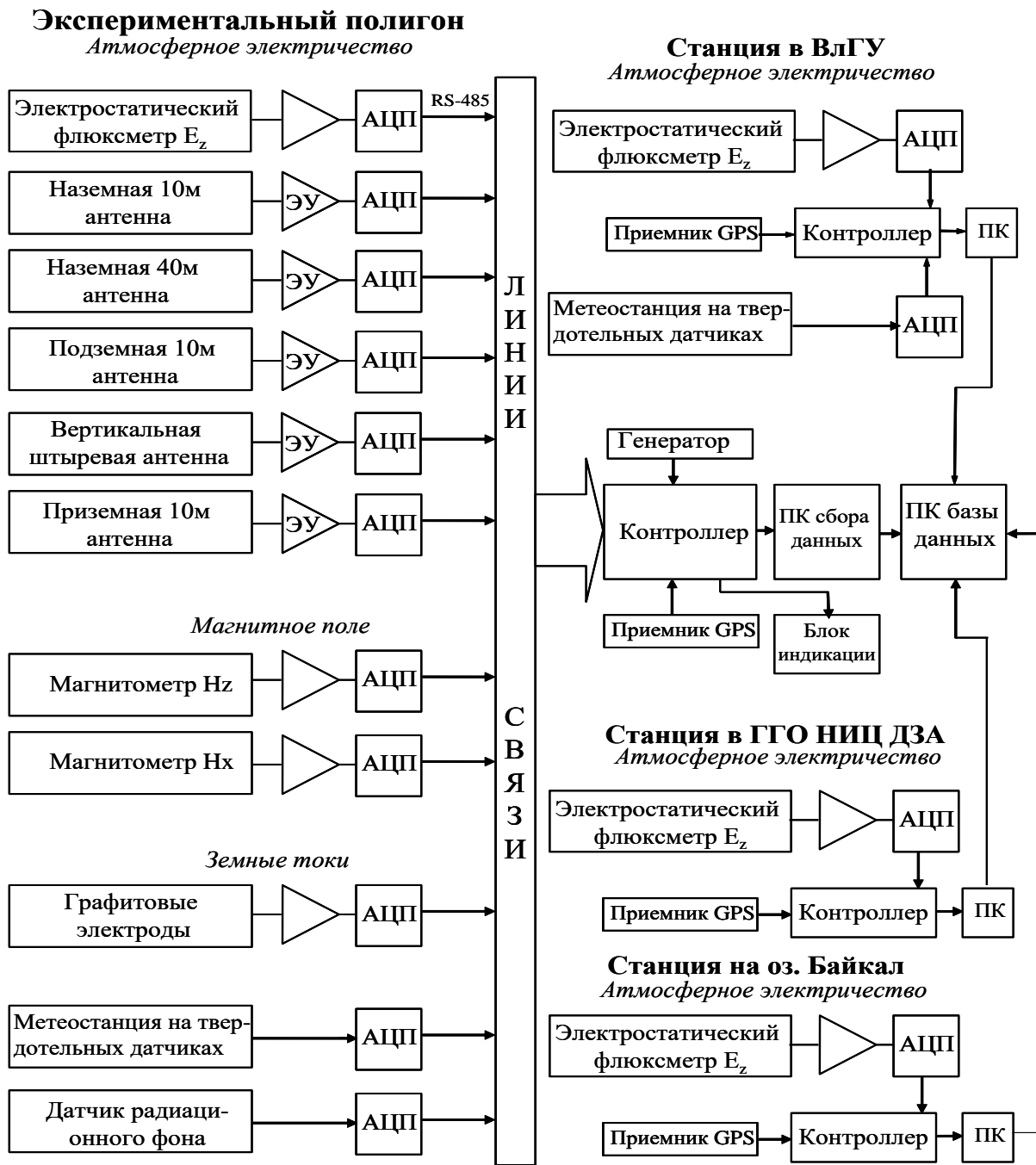


Рис. 2.5. Структура станций мониторинга E_z , разнесенных в пространстве, оснащенных датчиками электрического поля разработки ВлГУ: ГГО НИЦ ДЗА – Главная геофизическая обсерватория научно-исследовательского центра дистанционного зондирования атмосферы; АЦП – аналого-цифровой преобразователь; ЭУ – электрометрический усилитель



Электростатический флюксметр



Система регистрации данных



Метеостанция на твердотельных датчиках



Пункт расположения системы регистрации



Феррозондовый магнитометр

Рис. 2.6. Элементы системы мониторинга физического полигона ВлГУ

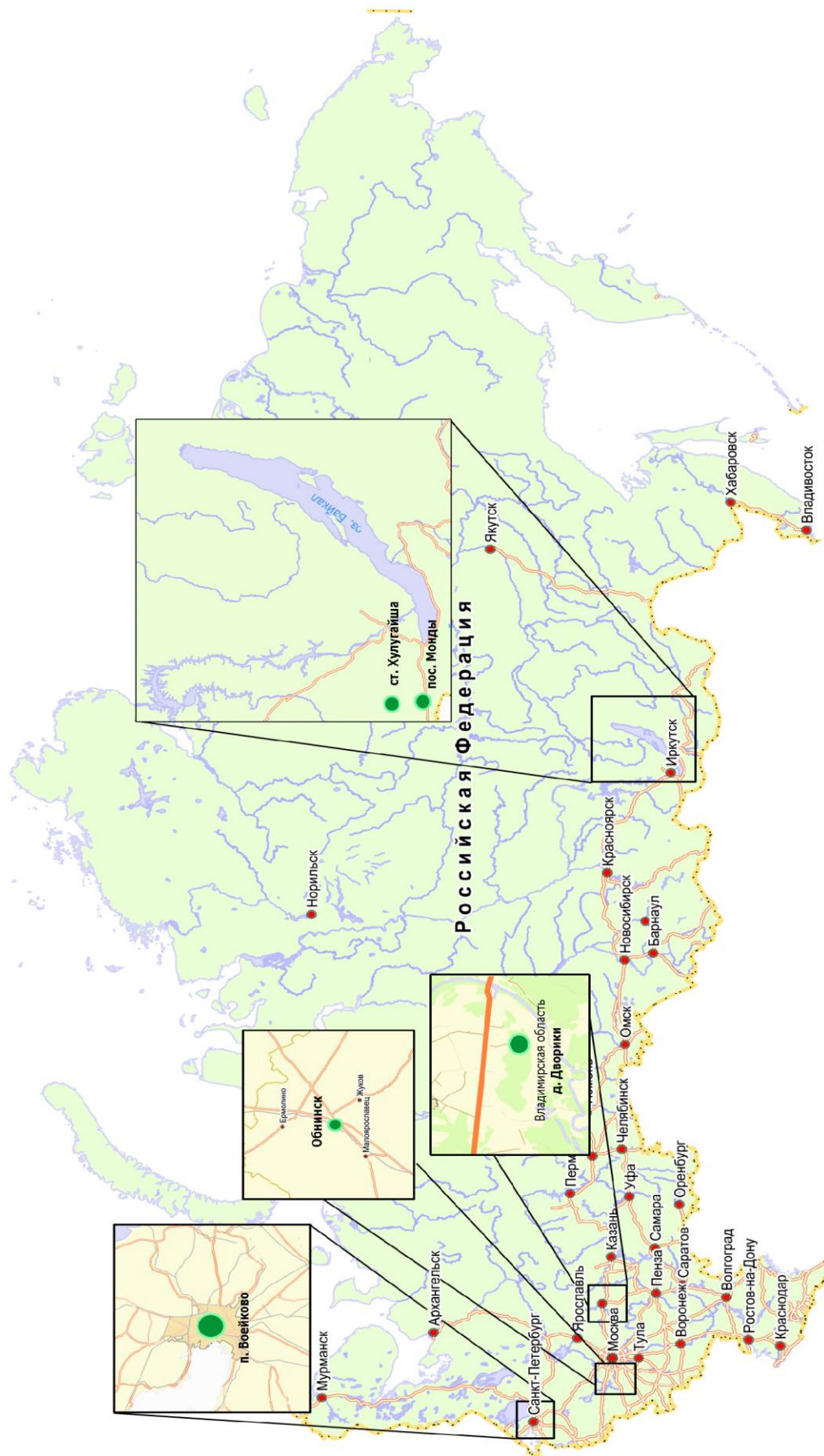


Рис. 2.7. Система разнесенного в пространстве мониторинга Ez

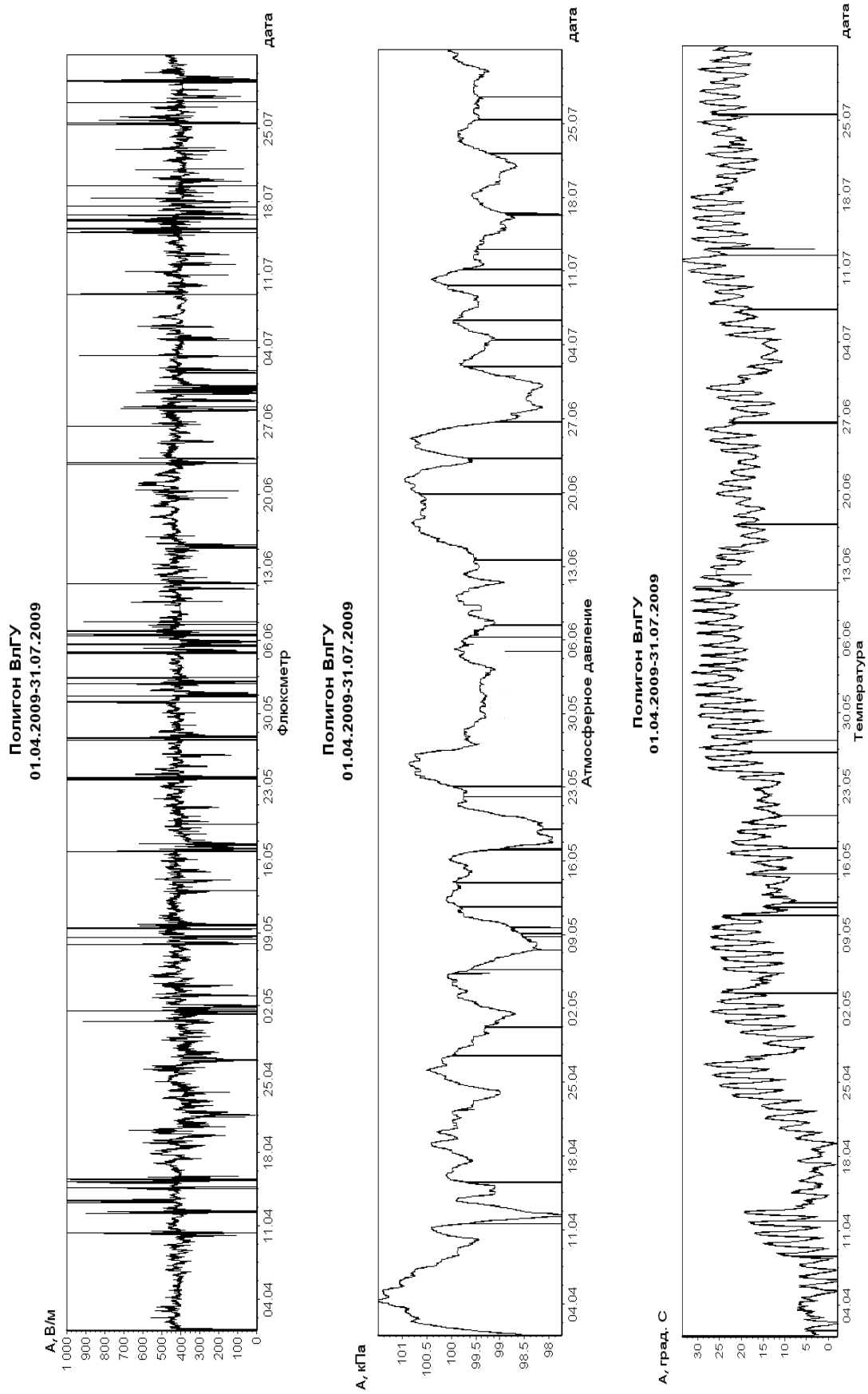
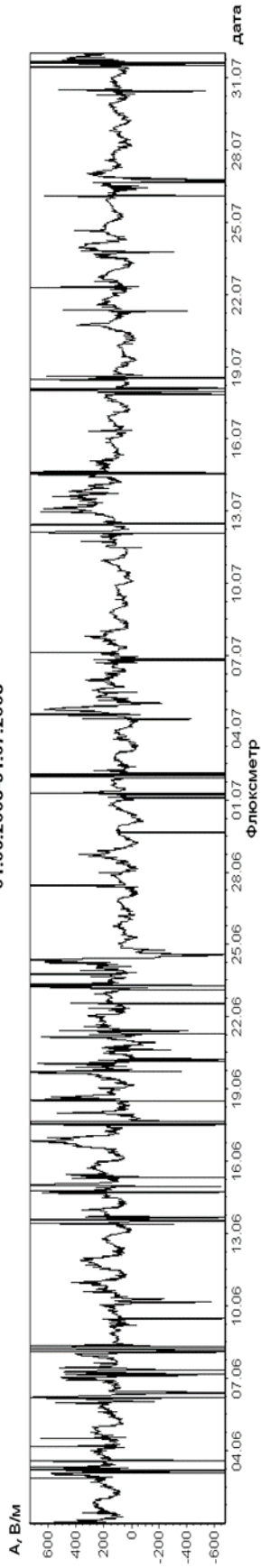
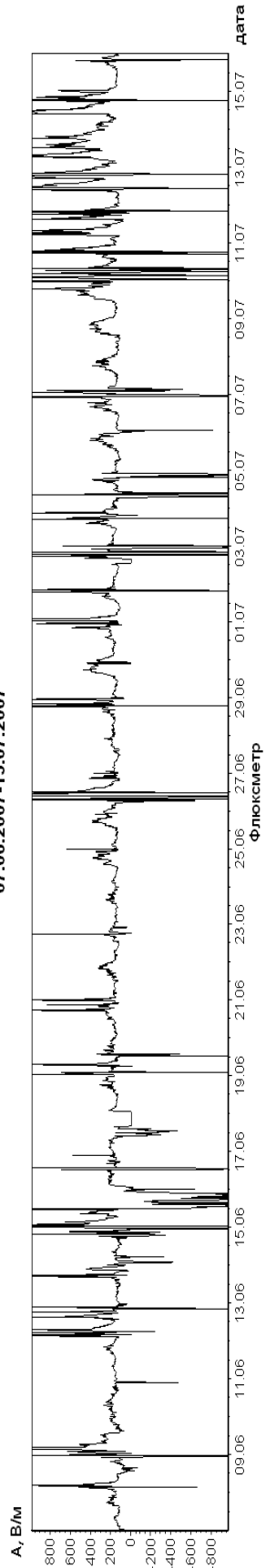


Рис. 2.8, а. Примеры экспериментальных данных мониторинга электрического поля пограничного слоя атмосферы на станции ВлГУ в 2009 году

**Флюксметр, оз. Байкал, п. Монды
01.06.2008-31.07.2008**



**Флюксметр, оз. Байкал, ст. Хулугайша
07.06.2007-15.07.2007**



**Флюксметр, оз. Байкал, п. Листвянка
01.10.2006-10.11.2006**

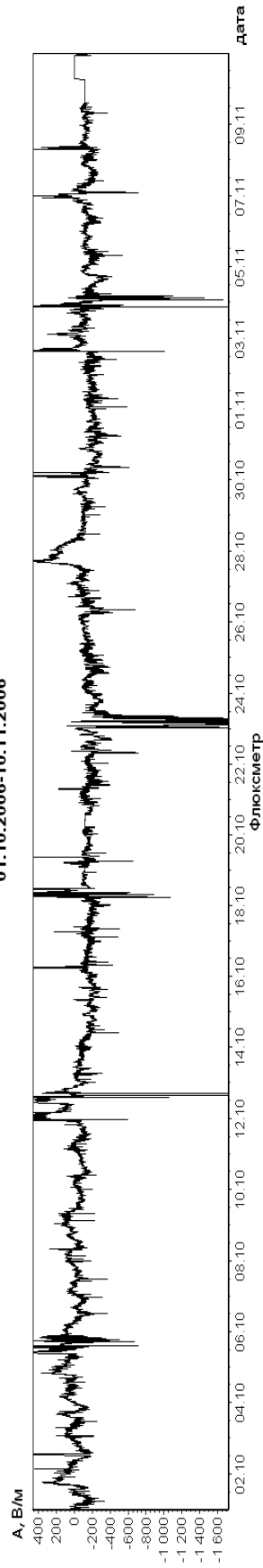
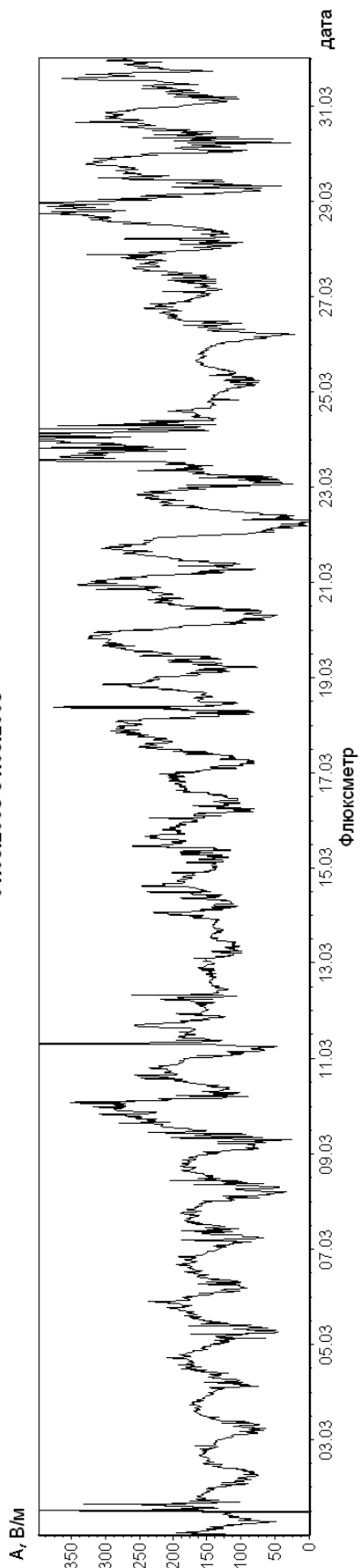


Рис. 2.8, б. Примеры экспериментальных данных мониторинга электрического поля пограничного слоя атмосферы на станциях оз. Байкал (пос. Монды, ст. Хулугайша, пос. Листвянка)

**Флюксметр, оз. Байкал, п. Монды
01.03.2008-31.03.2008**



**Флюксметр, оз. Байкал, ст. Хулугайша
01.03.2008-31.03.2008**

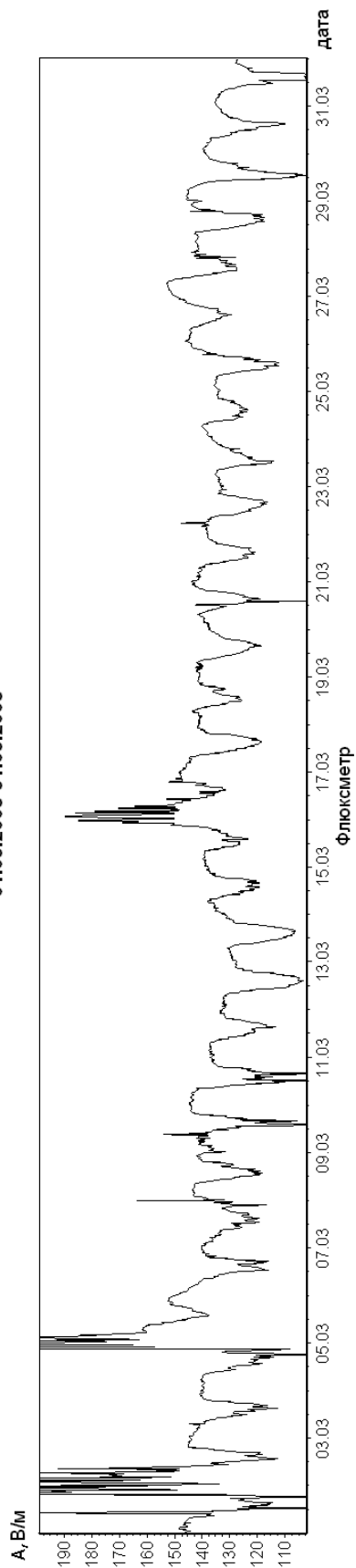
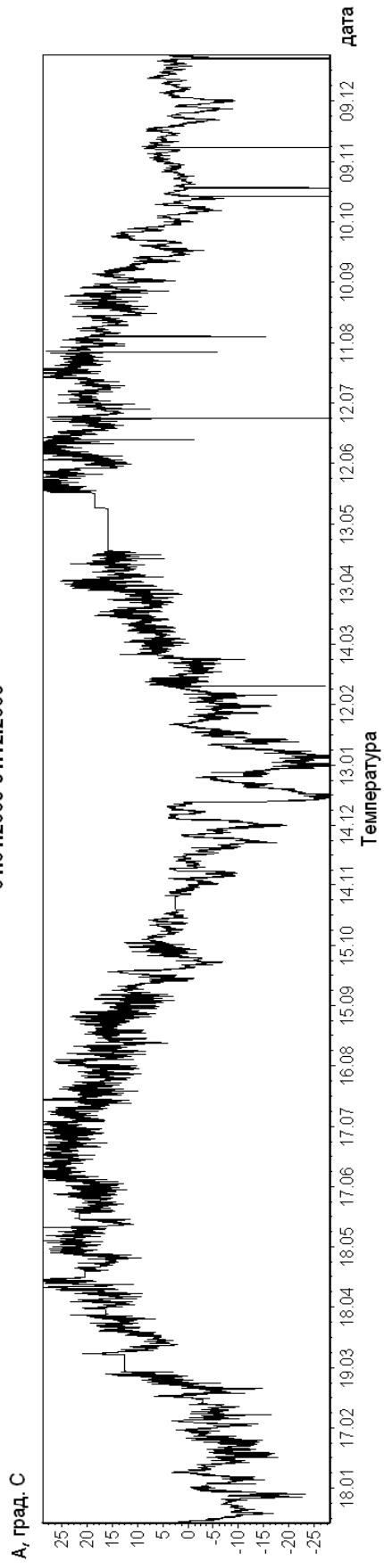


Рис. 2.8, в. Примеры синхронных записей данных мониторинга электрического поля пограничного слоя атмосферы на разнесённых в пространстве станциях (пос. Монды, ст. Хулугайша)

Полигон ВлГУ
01.01.2005-31.12.2006



Полигон ВлГУ
01.01.2005-31.12.2006

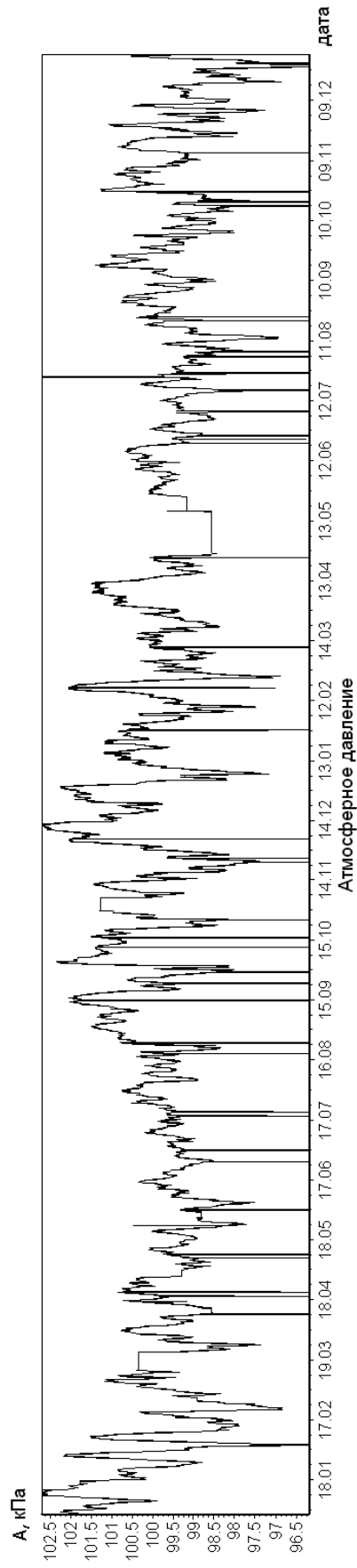
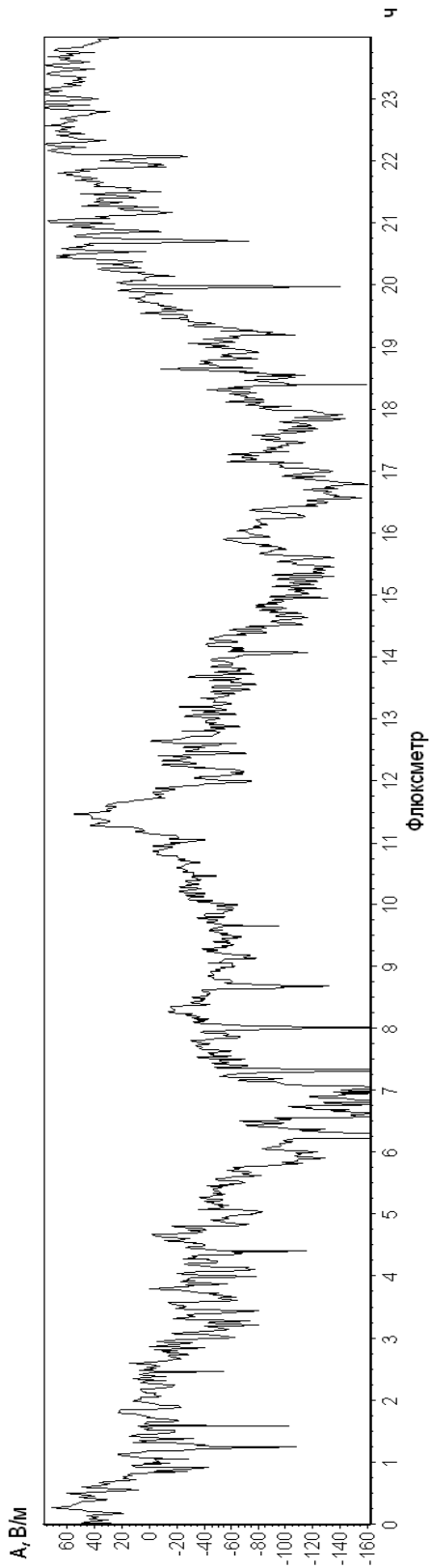


Рис. 2.8, г. Общие спектры электрического поля в инфранизкочастотном диапазоне по станциям Душети и Верхнее Дуброво

Байкал
06.10.2006



ОБНИНСК
13.08.2009

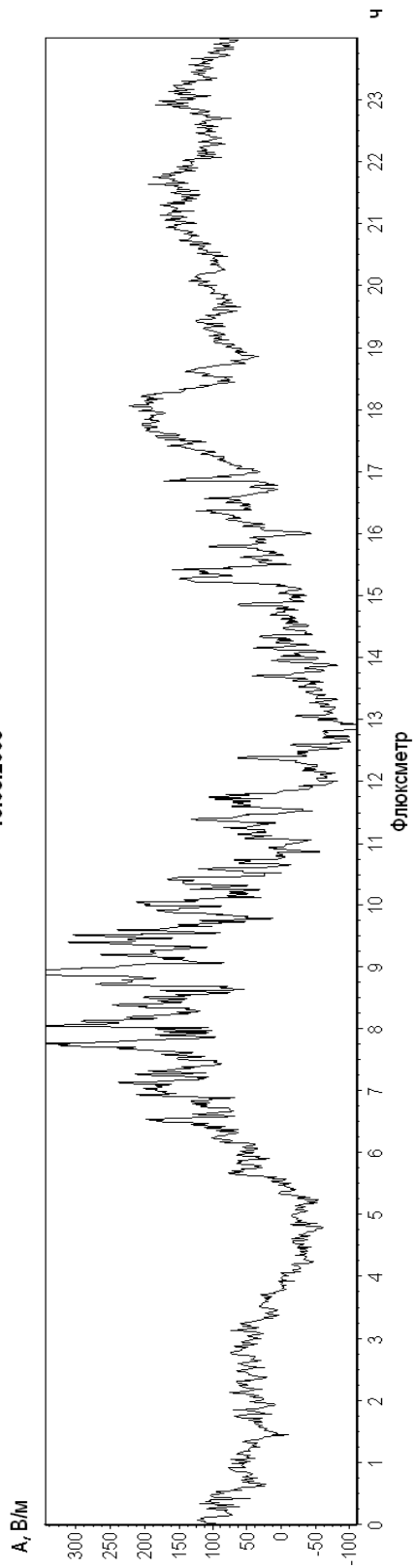


Рис. 2.8, д. Общие спектры геомагнитного поля по станции Мемамбецу

Библиографические ссылки

1. Грунская Л. В., Морозов В. Н. Экспериментальные и теоретические исследования вариаций напряженности электрического поля, обусловленных солнечными и лунными приливами в приземном слое атмосферы // Известия вузов. Физика. 2005. № 8. С. 33 – 39.

2. Грунская Л. В., Ефимов В. А. Приемно-регистрирующая аппаратура для исследования взаимосвязи электрического поля приземного слоя атмосферы с геофизическими процессами // Проектирование и технология электронных средств. 2006. № 1. С. 69 – 74.

3. Мобильный приемно-регистрирующий комплекс для мониторинга электромагнитного поля приземного слоя атмосферы / Л. В. Грунская [и др.] // Проектирование и технология электронных средств. 2005. № 2. С. 69 – 74.

4. Система многоканального синхронного мониторинга электромагнитных полей КНЧ диапазона приземного слоя / Л. В. Грунская [и др.] // Проектирование и технология электронных средств. Спец. вып. 2004. С. 38 – 45.

5. Анализатор собственных векторов и компонент сигнала : пат. № 116242 Рос. Федерация / Грунская Л. В., Исакевич В. В., Исакевич Д. В. ; заявл. 30.09.2011 ; опубл. 20.05.2012.

6. Грунская Л. В. Оценка параметров электрического поля приземного слоя атмосферы на основе метода корреляционного приема : монография. Владимир : Изд-во Владим. гос. ун-та, 2010. 123 с.

7. Лунные приливы в электрическом поле пограничного слоя атмосферы / Л. В. Грунская [и др.] // Известия вузов. Физика. 2010. Т. 53. № 1. С. 22 – 27.

8. Исследование воздействия лунных приливов на электромагнитное поле пограничного слоя атмосферы с помощью метода собственных векторов / Л. В. Грунская [и др.] // Известия высших учебных заведений. Физика. 2013. Т. 56. № 4. С. 65 – 70.

9. Грунская Л. В., Дорожков В. В., Исакевич В. В. Поиск корреляций между электромагнитным полем Земли крайненизкочастотного диапазона и периодическими гравитационными полями астрофизического происхождения // Известия высших учебных заведений. Физика. 2000. № 6. С. 36 – 41.

10. Грунская Л. В., Исакевич Д. В., Исакевич В. В. Выявление периодических составляющих с частотами астрофизических процессов во временных рядах вертикальной составляющей напряженности электрического поля пограничного слоя атмосферы Земли // *Пространство, время и фундаментальные взаимодействия*. М. : Профиль, 2014. Вып. 2. С. 54 – 71.

2.2. Методы измерения геомагнитного поля и его вариаций

За последние годы в связи с геомагнитными космическими и магнитобиологическими исследованиями возрос интерес к задачам измерения слабых магнитных полей (до нескольких нанотесл).

Классификацию методов измерения магнитных полей можно проводить различными способами. Удобно, в частности, выполнить ее в соответствии с физическими явлениями, которые положены в основу действия магнитометрического прибора. В настоящем обзоре рассмотрены лишь те работы, в которых описаны приборы, нашедшие широкое применение в геомагнитных исследованиях. Для современных магнитных измерений наибольшее распространение получили магнитостатические индукционные и квантовые магнитометры.

2.2.1. Магнитостатические магнитометры

Основой построения магнитометров этого типа являются чувствительные элементы – постоянные магниты, подвешенные на упругой, чаще всего кварцевой, нити [1, 2]. В получивших широкое признание магнитометрах (вариометрах) Боброва [8] чувствительный элемент выполнен в виде прямоугольной цельнокварцевой рамки, три стороны которой сделаны из пруткового плавленого кварца, а четвертая – из тонкой кварцевой нити с укрепленными на ней постоянным измерительным магнитом и кварцевым зеркалом. При изменении внешнего МП укрепленный на кварцевой нити магнит поворачивается на некоторый угол от начального положения до уравнивания момента вращения, обусловленного действием ГМП и моментом кручения нити. Мерой воздействия внешнего МП служит угол отклонения измерительного магнита, регистрация которого производится оптическим методом на фотографическую бумагу или пленку.

Приборы магнитостатического типа применяются для относительных измерений компонент ГМП и главным образом для регистрации их вариаций (с периодами от 3 – 5 мин до суток). Градуировка приборов производится при помощи витка с электрическим током. Цена деления вариометров обычно составляет 1 – 3 нТл/мм. Скорости протяжки бумаги равны 20 и 90 мм/ч [8].

Кварцевые магнитостатические вариометры имеют ряд достоинств, выгодно отличающих их от вариометров другого типа: высокая чувствительность, стабильность нуля, простота конструкции, надежность, поэтому они находят широкое применение. За последние годы в кварцевые вариометры были внесены многие усовершенствования [9 – 12]. Использование новых элементов в полевой магнитной вариационной станции (МВС) привело к упрощению ее конструкции, уменьшению габаритов и веса [9]. Разработаны и изготовлены H_z -вариометры, показания которых практически не зависят от их наклона благодаря применению маятника с дополнительным магнитом [10]. Созданы специальные вариометры для регистрации только коротко- или только длиннопериодных вариаций [11], а также вариометры с видимой записью [12]. Для измерения магнитных вариаций на дне моря созданы несколько типов донных МВС.

До последнего времени кварцевые вариометры обеспечивали в основном только аналоговую запись вариаций. Поэтому одной из актуальнейших задач было создание специальных преобразователей, или цифровых вариационных станций, выдающих информацию о вариациях МП в виде, удобном для ввода в ЭВМ.

Полная информация о геомагнитных приборах и методах измерений содержится в периодических изданиях НПО «Геофизика» – «Геофизическая аппаратура», в ряде трудов, изданных ИЗМИ РАН СССР [3 – 5], а также в обзорах [6, 7].

Для измерения компонент ГМП во Франции были разработаны цифровые компонентные МВС [14], которые вместе с ядерным магнитометром, измеряющим вариации модуля вектора ГМП, используются на нескольких обсерваториях. Аналоговые сигналы компонентных магнитометров преобразуются в цифровую форму и через регулярные промежутки времени перфорируются по международному телекоду, что позволяет передавать их по радио.

На основе кварцевого магниточувствительного элемента в СССР были разработаны преобразователи напряженности МП в цифровой код [15]. По способу преобразования измеряемого МП различают магнитостатические и магнитодинамические приборы с развертывающим преобразователем. В работах [15, 16] приведены принципиальные схемы и параметры преобразователей, отмечена перспективность использования кварцевых магниточувствительных элементов для создания цифровых вариационных станций.

Регистрация короткопериодных вариаций ГМП (с периодами от 3 с и выше) производится вариометрами Брюнелли [2], в которых благодаря применению отрицательной обратной связи отсутствует зависимость показаний вариометров от периода измеряемых вариаций. Усовершенствованная микровариационная станция с вариометрами Брюнелли имеет следующие параметры: диапазон периодов вариаций – 5 – 600 с, цена деления магнитограмм – 0,02 нТл/мм, скорость протяжки фотобумаги – 360 мм/с. Градуировка их производится также при помощи витка с электрическим током [17]. Для разведки земных недр используются передвижные магнитотеллурические лаборатории МТЛ-62 и МТЛ-71 [18], смонтированные на автомашинах или вездеходах. МТЛ регистрируют вариации магнитного и электрического полей с периодами 10 – 200 с, чувствительность магнитных каналов составляет 0,01 – 0,05 нТл/мм, электрических – 0,05 – 0,2 мВ/мм. Относительный дрейф нуля магнитометров не превышает 0,05 нТл/мин. Скорость протяжки фотобумаги – от 2000 до 3000 мм/с. Применением отрицательной обратной связи удалось снизить уровень собственных шумов и повысить чувствительность приборов [18].

2.2.2. Индукционные магнитометры

Действие индукционных магнитометров основано на законе электромагнитной индукции, т. е. на возникновении ЭДС в витке провода при изменении действующего на него магнитного потока. Чувствительность их определяется размерами и числом витков катушки, магнитными свойствами сердечника и зависит от частоты измеряемого поля. Распространению индукционных магнитометров способствовали появление сплавов высокой магнитной проницаемости (типа пермаллой) и применение их в качестве сердечников индукционных катушек [2].

Для измерения короткопериодных вариаций ГМП применяются индукционные катушки с ферромагнитным сердечником или без него, в том числе трехкомпонентные индукционные магнитометры [19, 20]. Трехкомпонентные магнитометры имеют усилители, обеспечивающие измерение вариаций в диапазоне частот от 0,005 до 100 Гц. Аналоговая запись вариаций производится с чувствительностью от 0,5 до 0,005 нТл/мм. Применение аналого-цифрового преобразователя позволяет получать информацию индукционных магнитометров в цифровой импульсно-кодовой форме, пригодной для ввода в ЭВМ [20].

Для измерения ГМП и его вариаций в верхней атмосфере на ракетах и спутниках применяются магнитометрические зонды [6]. Принцип их действия основан на измерении ЭДС, наводимой в зондирующей катушке при ее вращении во внешнем МП. На спутниках подобный магнитометр обеспечивал регистрацию вариаций ГМП в частотном диапазоне 0,1 – 1000 Гц [6].

Рассмотрим феррозондовые магнитометры (феррозонды), в которых в отличие от других индукционных приборов модуляция потока измеряемого МП через катушку производится путем периодического изменения магнитной проницаемости ферромагнитного сердечника.

Принцип действия магнитометра следующий. При питании переменным током первичной обмотки сердечника во вторичной обмотке, навитой на тот же пермаллоевый сердечник, индуцируется ЭДС, зависящая от компоненты МП и направленная вдоль оси сердечника. Частота модуляции обычно составляет от нескольких единиц до сотен килогерц, что обеспечивает высокую чувствительность при малых размерах катушки. Наибольшее применение имеют магнитометры, работающие на второй гармонике выходной ЭДС и использующие дифференциальные феррозонды с продольным возбуждением [21 – 23]. Феррозондовые магнитометры позволяют измерять не только напряженность, но и направление исследуемого МП. Они экономичны, имеют высокую чувствительность и надежность, непрерывный выходной электрический сигнал, вследствие чего так широк диапазон их применения (несмотря на имеющийся недостаток – дрейф нуля).

Буксируемые за кораблем феррозондовые магнитометры обеспечивают морскую съемку составляющих ГМП [7, 24]. Трехкомпонентный магнитометр успешно работал на шхуне «Заря» [22].

Для ориентации и стабилизации феррозондов на движущейся платформе применяются гироскопические устройства или маятниковые системы. Феррозондовые магнитометры используются в автономных МВС – в обсерваториях на суше [25] и на дне моря [13]. Цена деления МВС составляет 0,5 – 1 нТл/мм.

Феррозондовые трехкомпонентные магнитометры применяются также для геомагнитных индукционных исследований в широком диапазоне частот [26], а кольцевые феррозонды с продольным возбуждением используют для космических исследований [27]. Подобный магнитометр был установлен на поверхности Луны и обеспечил измерения МП и его вариаций с частотой до 3 Гц. Имеется много работ советских и зарубежных авторов, посвященных теории феррозондовых магнитометров [28, 29]. Исследования, выполненные в последние годы, направлены на повышение чувствительности и стабильности измерений [28]. В магнитометрах с трубчатым ферритовым сердечником чувствительность составляет 5 – 10 мкВ/нТл, нестабильность не превышает 2,5 нТл за 15 суток [29].

Измерять слабые МП можно магнитометром, основанным на применении тонких ферромагнитных пленок [6, 30]. Уникальные свойства таких пленок – отсутствие доменных барьеров, четко обозначенная осевая анизотропия, низкие потери на вихревые токи и высокое поверхностное сопротивление – обеспечивают применение их в приборах для магнитных измерений. Процесс измерения аналогичен измерениям на феррозонде с продольным возбуждением. Простейшее аналитическое описание процессов намагничивания тонких пленок предполагает, что пленки представляют собой единый домен, все магнитные изменения которого обусловлены когерентным вращением вектора намагниченности \vec{M} под влиянием внешнего поля и энергией одноосевой анизотропии. Благодаря большой величине коэффициента размагничивания в направлении, перпендикулярном поверхности пленки, \vec{M} всегда остается в плоскости пленки [30].

2.2.3. Квантовые магнитометры

Квантовые приборы включают три типа магнитометров, принцип действия которых основан на измерении частоты свободной ядерной прецессии (протонно-прецессионный магнитометр), на оптической ориентации атомов и на эффекте сверхпроводимости.

Принцип действия протонно-прецессионного магнитометра состоит в следующем [31]. Протоны (атомные ядра) обладают, кроме массы и электрического заряда, также механическим моментом количества движения $\vec{\rho}$ и магнитным моментом $\vec{\mu}$. Ядро можно представить в виде элементарного гироскопа, вдоль оси которого направлен магнитный момент. Внешнее магнитное поле напряженностью H стремится ориентировать ядра таким образом, чтобы их магнитные моменты повернулись вдоль этого поля, но механические моменты ядер препятствуют изменению ориентации. Под действием этих сил происходит прецессия ядер, при которой магнитные моменты ядер описывают конусы вокруг направления внешнего поля. Угловая частота прецессии пропорциональна модулю напряженности поля $|\vec{H}|$

$$\omega = \gamma_p |\vec{H}|, \quad \gamma_p = \frac{\vec{\mu}}{\vec{\rho}} - \text{гиромагнитное отношение протона.}$$

Измерение поля $|\vec{H}|$ сводится к измерению частоты прецессии. Так как γ_p является мировой константой, то измерения модуля вектора МП методом протонной прецессии могут быть названы абсолютными. Для получения свободной ядерной прецессии в протоносодержащей жидкости, находящейся в поле $|\vec{H}|$, создается дополнительное поляризующее поле $|\vec{H}_p|$, значительно превосходящее поле $|\vec{H}|$ и направленное к нему под углом. Для этого через обмотку датчика, внутри которой находится протоносодержащая жидкость, в течение некоторого времени пропускается ток. Возникшая принудительная ориентация протонов создает в датчике намагниченность \vec{M} , направленную вдоль результирующего поля. Поляризующее поле выключается достаточно быстро, чтобы за время выключения вектор \vec{M} практически не успел изменить своей ориентации. В этом случае вектор ядерного намагничивания начинает свободно прецессировать вокруг поля $|\vec{H}|$, наводя в обмотке датчика ЭДС, частота которой пропорциональна полю $|\vec{H}|$. После отключения источника тока, обеспечивающего поляризацию, обмотка датчика подключается к усилителю и сигнал, наведенный в датчике, усиливается до величины, необходимой для измерения частоты

томером. Необходимость поляризации приводит к дискретности измерений. Магнитометр измеряет модуль вектора магнитного поля. Для компонентных измерений необходима дополнительная специальная конечная система [31].

Протонно-прецессионные магнитометры нашли широкое применение вследствие высокой точности абсолютных и относительных измерений, широкого температурного диапазона, отсутствия дрейфа отсчетного уровня сигнала, практической независимости показаний прибора от ориентации датчика в пространстве относительно направления измеряемого поля (при соответствующей конструкции датчика), надежности и устойчивости в работе. Основные области применения этих магнитометров – измерения модуля \vec{H} буксируемыми за кораблем и самолетом приборами, космические исследования, поисковые геолого-разведочные работы и абсолютные наблюдения в обсерваториях [6, 7, 31]. Для увеличения чувствительности и быстродействия протонных магнитометров применяется метод динамической поляризации ядер [32]. Разработанный в ИЗМИ РАН протонный магнитометр ПМ-4 использовался для измерений магнитного поля на больших высотах с искусственных спутников Земли [33].

Новые разработки протонно-прецессионных магнитометров для морских и самолетных съемок имеют специальные приспособления для обеспечения одновременной аналоговой и цифровой регистрации [34]. Применение двух и более датчиков позволяет измерять градиент МП и обеспечивает нижний предел измерений 0,05 нТл [35, 36].

Для увеличения чувствительности ядерных магнитометров до сотых долей нанотеслы наиболее эффективным методом можно считать, по-видимому, фазовый метод измерения частоты сигнала прецессии. Описание фазового метода измерения частоты и анализ погрешностей магнитометра, работающего таким методом, даны в [37]. Протонный магнитометр ПМ-001, разработанный за последние годы, отличается высокой помехоустойчивостью датчика [38]. Прибор прошел всесторонние испытания и успешную проверку в Институте метрологии (ВНИИМ). Разрешающая способность магнитометра 0,2 нТл. Во всем диапазоне измеряемых полей (от 30 до 80 мсТл) среднеквадратическая погрешность составила $\pm 0,5$ нТл, не превышая ни в одном диапазоне 1,1 нТл.

2.2.4. Магнитометры с оптической ориентацией

Рассмотрим магнитометры с оптической ориентацией (накачкой) атомов. В магнитометрах, основанных на прецессии атомных магнитных моментов щелочных металлов и гелия в газообразном состоянии, поляризация магнитных моментов атомов осуществляется с помощью оптического излучения или спинового обмена, а детектирование магнитного резонанса – по изменению интенсивности и поляризации излученного атомами света [36]. Измерение МП сводится к измерению частоты перехода между зеемановскими подуровнями атомов, ориентированных методом оптической накачки. В магнитометрах используются эффекты взаимодействия атомов рабочего вещества (пары рубидия, цезия или гелия) с ЭМП двух диапазонов частот: радио и оптического. В силу дискретности энергетических уровней атома это взаимодействие носит резонансный характер.

Переход с одного уровня энергии на другой совершается при поглощении или испускании атомом кванта электромагнитной энергии. Для получения перехода предварительно создается большая разность населенностей зеемановских подуровней атомов путем поляризации возбуждающего света; такое состояние одновременно соответствует определенной ориентации атомов относительно МП. Теория магнитного резонанса для оптически ориентированной системы магнитных моментов атома приведена в [36].

Простейшей схемой построения датчика квантового самогенерирующего магнитометра является однокамерная схема с самогенерацией на частоте зеемановского перехода [39]. В магнитометре с одной камерой поглощения в момент магнитного резонанса (момент совпадения частоты наложенного радиополя с частотой прецессии оптически накачанных атомов газа рабочего вещества) возникает соответствующая модуляция проходящего сквозь камеру света на резонансной частоте. Амплитуда выходного сигнала такого магнитометра пропорциональна произведению $\sin\theta\cos\theta$, где θ – угол между оптической осью датчика и направлением измеряемого поля. В соответствии с этим прибор имеет так называемые «мертвые» зоны, ориентированные вдоль ($\theta = 0$) и перпендикулярно ($\theta = 90$) оптической оси датчика. Это создает значительные неудобства при измерении с подвижных платформ и приводит к уменьшению точности измерений или необходимости использовать дополнительные ориентирующие системы для сохранения

положения датчика относительно направления магнитного поля. Применение многокамерных датчиков хотя и улучшает положение, но приводит к значительному усложнению аппаратуры [39].

Уменьшение ориентационных погрешностей может быть получено либо при помощи системы автоподстройки частоты генерации на центр линии магнитного резонанса в самогенерирующем датчике, либо введением автоподстройки самогенерирующего магнитометра по опорному датчику [39, 40]. Квантовый магнитометр без «мертвых» зон ориентации разработан на основе двух функциональных схем магнитометров с различными ориентационными зависимостями, объединенных общей оптической системой [41].

Магнитометры с оптической ориентацией атомов щелочных металлов имеют ряд положительных качеств, благодаря которым они находят применение в его физических и других исследованиях: большие значения отношения сигнала к шуму и высокая чувствительность (до $1 \cdot 10$ нТл), широкий динамический диапазон, перекрываемый без переключений, высокое быстродействие [36, 42]. У квантовых цезиевых магнитометров, выпускаемых СКБ ФП АН РФ [43], разрешающая способность составляет от 1 до 0,01 нТл; результаты измерений регистрируются одновременно в цифровой и аналоговой формах. Такие магнитометры использовались в поисках погребенных ферромагнитных предметов при археологических раскопках [44] и для измерений магнитного поля биообъектов [39]. Квантовым цезиевым магнитометром КЦМ-1 были выполнены измерения с искусственного спутника Земли «Космос-321» по программе Мировой магнитной съемки [33].

Для компонентного измерения геомагнитного поля необходима дополнительная специальная колечная система [45, 46], которая обеспечивает измерения проекций полного вектора напряженности ГМП в геофизической (геомагнитной) системе координат либо в системе координат, связанной с движущимся объектом [43, 45]. Применение дифференциальной схемы включения магнитометров с оптической ориентацией атомов сделало возможными измерения градиентов МП, проведение исследований влияния берегового эффекта на геомагнитные вариации [7, 47].

Кроме рассмотренных выше квантовых магнитометров, использующих в качестве рабочего вещества пары щелочных металлов, раз-

работан квантовый гелиевый самогенерирующий магнитометр с оптической накачкой мета-стабильных атомов гелия [40]. Гелиевый магнитометр не уступает им по чувствительности, а по ряду параметров (линейная зависимость между измеряемым МП и частотой регистрируемого сигнала, симметричность резонансной линии) превосходит их.

2.2.5. Сверхпроводящие квантовые магнитометры

Рассмотрим далее сверхпроводящие квантовые магнитометры, обеспечивающие измерения слабых магнитных полей.

Принцип действия чувствительных элементов сверхпроводящих магнито- и градиентометров основан на одном из квантовых явлений, имеющих место в сверхпроводниках, обычно это эффект Джозефсона. Сверхпроводящий чувствительный элемент находится в криостате с жидким гелием. Создание таких приборов представляет большой интерес для различных физических и медико-биологических исследований.

Сверхпроводящие квантовые магнитометры могут обладать высокой чувствительностью (до 1,10 нТл) в динамическом диапазоне от 1 до 100 мкТл и быстродействием до $1 - 10^{-9}$ с [48, 49]. Однако из-за больших трудностей создания высокочувствительных магнитометров и необходимости достаточно долго поддерживать сверхнизкие температуры в настоящее время известны лишь лабораторные образцы приборов [48, 49].

Разработаны также магнитометры – флюксометры со сверхпроводящими квантовыми интерференционными датчиками, которые обеспечивают чувствительность до $1, 2 \cdot 10^{-4}$ нТл в диапазоне полей от 10^{-7} до 10^3 нТл [50, 51]. Приборы применяются для контроля за стабильностью сверхпроводящих магнитов и определения магнитной восприимчивости малых образцов ($0,15 \text{ см}^3$).

Для измерения слабых магнитных полей напряженностью до нескольких нанотесл применяются квантовые магнитометры, основанные на оптической ориентации моментов атомов, поляризованных резонансным излучением [52 – 54]. Одним из таких приборов является квантовый магнитометр, принцип действия которого основан на использовании эффекта пересечения (наложения) зеемановских подуровней основного состояния оптически ориентированных атомов в сверхслабом МП [52, 53]. Этот эффект наложения аналогичен эффекту пересечения уровней основного состояния атома в нулевом магнитном поле

(эффект Ханле). Возможность практической реализации такого метода рассмотрена в [54]. Одной из основных трудностей создания прибора является обеспечение компенсации внешних магнитных полей. Чувствительность имеющихся в настоящее время магнитометров еще не достигает теоретически возможной для этого метода (10^{-6} нТл) [54].

Кроме квантовых магнитометров для измерения слабых полей применяются магнитометры, основанные на гальваномагнитных эффектах [55, 56]. Разработан магнитометр на основе использования эффекта Холла с датчиком из антимолида индия [55]. Пороговая чувствительность прибора составляет $6,54 \cdot 10^{-3}$ нТл [55, 56].

Для измерения слабых магнитных полей, например магнитных полей биообъектов, необходимо исключить обычно существенно их превышающие МП внешней среды. Эффективность компенсационных катушек и экранов часто ограничивает возможности повышения чувствительности магнитометров и градиентометров, поэтому нам кажется целесообразным привести данные, касающиеся экранов и компенсирующих колец. Для компенсации магнитного поля и его вариаций, а также для создания малых однородных МП в небольшом объеме применяются ферромагнитные и сверхпроводящие экраны. В больших объемах компенсация ГМП обеспечивается путем использования экранов и расположенной внутри них системы колец. Наиболее эффективная компенсация ГМП была достигнута путем использования многослойных ферромагнитных и сверхпроводящих сферических экранов и компенсирующей системы колец при обеспечении испытаний и калибровки чувствительных магнитометров [57]. При этих испытаниях учитывалось взаимодействие сферических токовых систем с ферромагнитным экраном [58]. В работе [59] рассмотрена возможность компенсации поля рассеяния за пределами системы колец, в объеме которых создается однородное поле.

Задача компенсации вариаций геомагнитного поля существенно упрощается при применении автоматических систем питания компенсирующих колец, при этом надежнее обеспечивается и стабильность поля. В разработанном во Франции устройстве автоматической компенсации вектора ГМП магнитометры управляют током в системе компенсирующих катушек [60]. Это устройство позволяет компенсировать ГМП до $3 \cdot 10^{-2}$ нТл. В установке для автоматической компенсации

поля вариаций, разработанной в США, компенсация поля обеспечивается при помощи замкнутой цепи обратной связи, основным элементом которой служит рубидиевый магнитометр [61].

Итак, в зависимости от необходимости получения абсолютных или относительных данных о ГМП, требований к чувствительности, быстродействию, диапазону измеряемых полей должны быть использованы различные методы измерений. Для абсолютных измерений геомагнитного поля наиболее широко используются протонно-прецессионные магнитометры с разрешающей способностью до 0,05 нТл в диапазоне полей от 30 до 80 мкТл; у них высокая точность абсолютных измерений, широкий температурный диапазон, отсутствует дрейф нуля, показания магнитометра практически не зависят от ориентации датчиков. Относительные измерения МП можно выполнять любыми магнитометрами. Магнитостатические магнитометры являются наиболее простыми и надежными для измерений всех компонент геомагнитного поля. Их чувствительность – до 0,5 нТл/мм (при регистрации полей с периодами от 3 мин до суток) и до 0,01 нТл/мм (для полей с периодами от 0,05 до 10 мин). Индукционные магнитометры применяются для измерений величины и направления компонент ГМП (а также и градиентов) с частотами от 0,005 до 1000 Гц. Эти приборы дают непрерывный электрический сигнал и обеспечивают нижний предел чувствительности 0,005 нТл/мм в диапазоне полей от нескольких нанотесл до 100 мкТл. Магнитометры с оптической ориентацией атомов обеспечивают практически безынерционные измерения ГМП и их градиентов с нижним пределом 1,10 нТл в широком диапазоне полей, перекрываемом без переключений. Для измерения слабых магнитных полей до десятых долей нанотеслы разработаны несколько типов сверхпроводящих квантовых магнитометров и градиентометров, а также магнитометры, основанные на гальвано-магнитном эффекте, с пороговой чувствительностью от $6 \cdot 10^{-3}$ до $1 \cdot 10^{-6}$ нТл и быстродействием до $1 \cdot 10^{-9}$ с. Одной из основных трудностей измерения слабых магнитных полей является обеспечение экранировки от действия внешних электромагнитных полей.

Библиографические ссылки

1. Чечурина Г. Н. Приборы для измерения магнитных величин. М. : Энергия, 1969. 168 с.

2. Яновский Б. М. Земной магнетизм. Т. 2. Теоретические основы магнитометрического метода исследования земной коры и геомагнитные измерения. Л. : Изд-во ЛГУ, 1963. 161 с.
3. Геомагнитное приборостроение / под ред. Ш. Ш. Долгинова. М. : Наука, 1977. 107 с.
4. Анализ пространственно-временной структуры геомагнитного поля / под ред. А. Н. Пушкова. М. : Наука, 1975. 307 с.
5. Исследование пространственно-временной структуры геомагнитного поля / под ред. А. Н. Пушкова. М. : Наука, 1977. 271 с.
6. Жузгов Л. Н., Фастовский У. В. Магнитометрическая аппаратура // Итоги науки и техники. Геомагнетизм и высокие слои атмосферы. М. : ВИНТИ, 1972. Т. 1. С. 202 – 218.
7. Морская магнитометрическая аппаратура / В. В. Новыш [и др.]. М. : Недра, 1973. 58 с.
8. Бобров В. Н. Серия кварцевых магнитных вариометров // Геомагнетизм и аэрономия. 1962. Т. 2. № 2. С. 348 – 356.
9. Белов Б. А., Бурцев Ю. А., Мурашов Б. П. О повышении стабильности нулевого уровня вариометров с фотоэлектрическими преобразователями // Исследование пространственно-временной структуры геомагнитного поля. М. : Наука, 1977. С. 239 – 241.
10. Бобров В. Н., Бурцев Ю. А. Кварцевый Hz-вариометр для автономных вариационных станций // Геомагнетизм и аэрономия. 1970. Т. 10. № 4. С. 770 – 771.
11. Бобров В. Н., Сизов Ю. П. Длиннопериодный магнитный вариометр // Исследование пространственно-временной структуры геомагнитного поля. М. : Наука, 1977. С. 248 – 249.
12. Кварцевая магнитовариационная станция видимой записи / В. Н. Бобров [и др.] // Исследование пространственно-временной структуры геомагнитного поля. М. : Наука, 1977. С. 242 – 247.
13. Магнитовариационная аномалия на северо-восточном побережье Черного моря / В. С. Шнеер [и др.] // Исследование геомагнитного поля на акваториях морей и океанов. М. : ИЗМИ РАН, 1978. С. 125 – 137.
14. Schlich R. Enregistrement numerique direct due champ magnetique terrestre // Rev. phys. Appl. 1970. Vol. 5. № 1. P. 153 – 158.

15. Белов Б. А., Бурцев Ю. А., Мурашов Б. П. Преобразователи напряженности магнитного поля в цифровой код на основе кварцевого магниточувствительного элемента // Исследование пространственно-временной структуры геомагнитного поля. М. : Наука, 1977. С. 217 – 223.
16. Усленский Б. Г., Бурцев Ю. А., Бобров В. Н. Исследование магнитометрического Hz-вариометра с емкостным преобразователем. Геофизическая аппаратура. Л. : Недра, 1977. Вып. 61. С. 22 – 30.
17. Казак Б. Н., Распопов О. М. Магнитная микровариационная станция с автоматическим управлением // Геофизическая аппаратура. Л. : Недра, 1965. Вып. 26. С. 100 – 157.
18. Алексеев А. М., Бердичевский М. Н., Ланцов А. Е. Магнито-теллурическая лаборатория МТЛ-62. М. : ВНИИ геофизика, 1963. 18 с.
19. Баранский Л. Н. Расчет индукционного датчика для измерения слабых переменных магнитных полей // Геофизическая аппаратура. Л. : Недра, 1966. Вып. 28. С. 24 – 36.
20. Ан В. Н., Геллер Л. А., Казак Б. Н. Опыт применения аналого-цифрового преобразования для записи вариаций естественного электромагнитного поля Земли // Геомагнетизм и аэрономия. 1965. Т. 5. № 5. С. 896 – 900.
21. Янус Р. И., Фридман Л. Х., Дрожжина В. И. К теории дифференциальных феррозондов с продольным возбуждением // Геофизическое приборостроение. Л. : Недра, 1959. Вып. 3. С. 73 – 95.
22. Афанасьев Ю. В., Гольдкреер И. Г., Долгинов Ш. Ш. Вопросы проектирования феррозондовых магнитометров // Геофизическое приборостроение. Л. : Недра, 1960. Вып. 5. С. 40 – 58.
23. Афанасьев Ю. В. Феррозонды. Л. : Энергия, 1969. 168 с.
24. Маевский И. А., Новыш В. В., Фингер Д. Л. Буксируемый Hz-магнитометр на карданном подвесе // Геомагнетизм и аэрономия. 1965. Т. 5. № 3. С. 595 – 597.
25. Andersen P. An automatic magnetic observatory system // *Publs Earht Phys. Branch. Dep. Energy, Mines and Resour. Ottawa.* 1974. Vol. 44. № 11. P. 240 – 246.
26. Caner B., Draher H. Instrumentation for widefrequency-band geomagnetic induction work // *Ztschr. Geophys.* 1972. Bd. 38. № 1. P. 121 – 132.
27. Gyal P., Parkin C. W., Sonett Ch. P. Lunar surface magnetometer // *IEEE Trans. Geosci. Electron.* 1970. Vol. 8. № 4. P. 203 – 215.

28. Афанасьев Ю. В. Состояние и перспективы развития феррозондовой магнитометрии // Геофизическая аппаратура. Л. : Недра, 1977. Вып. 60. С. 17 – 35.
29. Primdahl P. Fluxgate sensors, principles and' properties // JAGA bull. 1973. № 34. P. 249 – 253.
30. Irons H. R., Schwee L. J. Magnetic thinfilm magnetometers for magnetic field measurement // IEEE Trans. Magn. 1972. Vol. S, SI. P. 61 – 65.
31. Ротштейн А. Я., Цирель В. С. Ядерные прецессионные магнитометры // Геофизическая аппаратура. Л. : Недра, 1974. Вып. 55. С. 16 – 25.
32. Применение динамической поляризации ядер для увеличения чувствительности ядерных прецессионных магнитометров / Г. В. Скроцкий [и др.] // Геофизическая аппаратура. Л. : Недра, 1970. Вып. 42. С. 10 – 57.
33. Dolginov Sh. Sh., Kozlov A. N., Chincevoi M. M. Magnetometers for space measurements // Rev. Phys. Appl. 1970. Vol. 5. № 1. P. 132 – 178.
34. Аэроморской протонный магнитометр / И. И. Беляев [и др.] // Геофизические поля северо-западной части Тихого океана. Владивосток, 1976. С. 127 – 135.
35. Hartmann P. Resonance magnetometers // IEEE Trans. Magn. 1972. Vol. MAG-8. № 1. P. 66 – 69.
36. Померанцев Н. М., Рыжков В. М., Скроцкий Г. В. Физическая основа квантовой магнитометрии. М. : Наука, 1972. 448 с.
37. Рыжков В. М., Таширов Е. В. Ядерный магнитометр с фазовым методом измерения частоты // Геофизическая аппаратура. Л. : Недра, 1975. Вып. 58. С. 3 – 12.
38. Протонный магнитометр ПМ-001 / Ю. П. Цветков [и др.] // Геомагнитное приборостроение. М. : Наука, 1977. С. 3 – 8.
39. Козлов А. Н., Синельникова С. Е., Шумов Л. А. Квантовый самогенерирующий магнитометр с автоподстройкой // Анализ пространственно-временной структуры геомагнитного поля. М. : Наука, 1975. С. 236 – 242.
40. Доватор Н. А., Житников Р. А., Кулешов П. К. Самогенерирующий гелиевый магнитометр с автоматической подстройкой фазы // Геофизическая аппаратура. Л. : Недра, 1974. Вып. 56. С. 15 – 20.

41. Рыжков В. М., Соловьев В. С. Квантовый магнитометр без мертвых зон ориентации // Геофизическая аппаратура. Л. : Недра, 1971. Вып. 46. С. 14 – 19.
42. Повышение чувствительности и быстродействия квантовых и ядерно-прецессионных магнитометров / Ю. Д. Долинский [и др.] // Геофизическая аппаратура. Л. : Недра, 1975. Вып. 57. С. 51 – 56.
43. Квантовые магнитометры разработки СКВ ФП АН СССР / А. И. Красильщиков [и др.] // Анализ пространственно-временной структуры геомагнитного поля. М. : Наука, 1975. С. 248 – 262.
44. Применение квантового магнитометра в исследовании археологических памятников / Г. А. Внучков [и др.] // Геомагнитное приборостроение. М. : Наука, 1977. С. 77 – 85.
45. Абсолютный морской компонентный магнитометр / Г. В. Алексеев [и др.] // Геофизическая аппаратура. Л. : Недра, 1974. Вып. 47. С. 35 – 40.
46. Чидсон Ю. С. Ориентационная зависимость сигналов квантового самогенерирующего магнитометра // Геофизическая аппаратура. Л. : Недра, 1977. Вып. 61. С. 30 – 37.
47. Иваница А. И., Фастовский У. В. Квантовый дифференциальный магнитометр КМ-8 // Геомагнитное приборостроение. М. : Наука, 1977. С. 16 – 21.
48. Бондаренко С. И. Сверхпроводящие квантовые градиентометры // Геофизическая аппаратура. Л. : Недра, 1975. Вып. 57. С. 3 – 8.
49. Zimmerman J. E. SQUID instruments and shielding for lot-level magnetic measurement // J. Appl. Phys. 1972. Vol. 48. 702 p.
50. Пестов Е. Н., Скродцкий Г. В. Квантовый флюксметр для измерения слабых и сверхслабых магнитных полей со сверхпроводящим квантовым интерференционным датчиком // Геофизическая аппаратура. Л. : Недра, 1971. Вып. 45. С. 24 – 28.
51. Advanced superconducting gradiometer magnetometer arrays and a novel signal processing technique / Wyrni W. M. [et al.] // IEEE Trans. Magn. 1972. Vol. MAG-11. № 2. P. 701 – 707.
52. Александров Е. Б., Бонч-Бруевич А. М., Ходовой В. А. Возможности измерения малых магнитных полей методами оптической ориентации атомов // Оптика и спектроскопия. 1967. Т. 23. № 2. С. 282 – 286.

53. Скродцкий Г. В., Соломахо Г. И. Явление пересечения атомных магнитных подуровней в основном состоянии и его применение в магнитометрии // Геофизическая аппаратура. Л. : Недра, 1973, Вып. 52. С. 3 – 15.
54. Квантовый магнитометр для сверхслабых полей / Б. А. Андрианов [и др.] // Геофизическая аппаратура. Л. : Недра, 1975. Вып. 57. С. 3 – 8.
55. Арустаманова А. В., Петипов В. А., Суханов С. Магнитометр слабых полей на основе датчика Холла // Геофизическая аппаратура. Л. : Недра, 1965. Вып. 26. С. 15 – 19.
56. Owston C. Hall-effect magnetometer for small magnetic fields // J. Sci. Instrum. 1967. Vol. 44. P. 798 – 800.
57. Овчаренко П. С. Высокоэффективные ферромагнитные экраны // Геофизическая аппаратура. Л. : Недра, 1974. Вып. 56. С. 126 – 130.
58. Овчаренко П. С., Приданников Л. Н., Малых В. А. Учет взаимодействия сферических токовых систем с ферромагнитным экраном при испытаниях и калибровке высокочувствительных магнитометров // Геомагнитное приборостроение. М. : Наука, 1977. С. 71 – 73.
59. Бледов В. А., Ротштейн А. Я. О создании систем для получения однородного поля с компенсацией поля рассеяния // Геомагнетизм и аэрномия. 1970. Т. 10. № 6. С. 1133 – 1135.
60. Argenee G. Dispositif de compensation automatique du vecteur champ magnetique terrestre // Rev. Phys. Appl. 1970. Vol. 5 № 1. P. 159 – 163.
61. Driscoll R. L., Olsen P. T. Compensation of earth's field variations by field controlled rubidium oscillator // Rev. Sci. Instrum. 1971. Vol. 42. № 10. P. 1427 – 1431.

2.3. Магнитобиология и магнитотерапия

За последнее время магнитобиология достигла серьезных успехов в решении прикладных задач прежде всего благодаря широкому использованию постоянных МП в терапевтических целях. Однако в оценке эффективности широкого внедрения МП в клиническую практику настораживает тот факт, что магнитное поле играет роль универсального средства от множества патологий, и это достигается незначительными вариациями параметров: напряженности, экспозиции, локализации омагничивания [1]. Очевидно, использование МП в терапии должно основываться на детальном знании его влияния на интактный организм. Эти знания можно получить, обратившись к исследованиям,

которые, в частности, свидетельствуют в некоторых случаях о неблагоприятном действии магнитного поля на организм в различных производственных условиях [2]. Кроме того, целый ряд экспериментально-клинических исследований характеризуют МП как фактор, активно нарушающий деятельность метаболических систем углеводного, липидного и белкового обменов [3]. Естественно, чтобы примирить в клинической практике два взаимоисключающих биологических действия МП – терапевтическое и патологическое, – необходимо знание как молекулярных механизмов, так и закономерностей ответных реакций организмов на воздействие МП в норме и патологии. Поскольку биохимические реакции протекают с чередованием парамагнитно-диамагнитных состояний промежуточных и конечных продуктов метаболизма, МП может вызвать изменение скорости как прямых, так и обратных реакций, что определяет возможность взаимокompенсации изменений, вызванных МП в биохимических звеньях. Тогда биологический эффект магнитного поля интегрально можно интерпретировать как итог нескомпенсированных изменений в биохимических звеньях, трансформированных на клеточный и органный уровни. Необходимым условием для успешного терапевтического применения магнитного поля должно явиться знание тех молекулярных нарушений, из-за которых возник патологический процесс, адекватный выбор воздействия МП не только на нарушенную при патологии молекулярную систему, но и на соседние системы. На основании таких сведений и общих законов регуляции липидного, углеводного и белкового обменов могут быть разработаны общетеоретические и методические основы магнитотерапии для выбора значения напряженности МП, его локализации и длительности омагничивания.

Биохимические механизмы адаптации наиболее важны в жизни организмов, ибо составляют существо «интимных» метаболических процессов клетки [4]. И с этой точки зрения общие закономерности биохимической эволюции и адаптационных взаимодействий организмов с физико-химическими факторами внешней среды могут быть поняты в рамках строгих физико-химических закономерностей. Биохимические изменения в организмах большей частью адаптивны на уровне основных метаболических процессов и макроскопически не проявляются. Именно биохимическая адаптация к изменению факторов внешней среды позволяет сохранить постоянство анатомической и

физиологической форм организмов. Для стационарного протекания жизненных процессов организма необходимо, чтобы гомеостаз метаболических функций осуществлялся в определенном направлении и с определенной скоростью, соответствующей оптимальному режиму обмена организма с внешней средой энергией, веществом и информацией. Для достижения этой цели возможны следующие превращения с биологически важными макромолекулами: изменение типов макромолекул, их концентрации и адаптивной регуляции функций макромолекул. Организмы синтезируют макромолекулы белков, нуклеиновых кислот, липидов, полисахаридов и их взаимно группирующихся комплексов, составляющих основу специфических свойств живых систем, одновременно сочетая при этом образование высокоэнергетических соединений и низкомолекулярных предшественников, а также генерирование восстановителей [4, 5].

Можно полагать, что магнитное поле влияет прежде всего на гомеостаз живых систем, изменяя скорость и направленность радикальных метаболических реакций как наиболее чувствительных параметров адаптационной системы организма, т. е. в основе механизмов действия магнитного поля должны быть те же физико-химические закономерности, что и в основе процессов адаптации к ним. В настоящее время можно считать доказанной способность МП изменять кинетику радикальных химических реакций [6, 7] и, видимо, это доказательство можно распространить на радикальные биохимические реакции, по крайней мере, на кинетику свободнорадикальных реакций перекисного окисления липидов [8].

Эффекты МП в кинетике химических реакций предсказывались еще в конце XIX столетия и только в 1913 году было обнаружено влияние МП на флуоресценцию паров йода. Эксперименты по исследованию действия МП на реакции в растворах долгое время оставались безрезультатными. Теоретически возможно смещение химического равновесия за счет изменения магнитной восприимчивости химической системы [9], но относительное изменение константы скорости реакции очень мало и, например, в МП напряженностью 1 Тл не превышает 0,1 %. Под действием магнитного поля ориентация ассоциатов молекул или макромолекул с анизотропией магнитной восприимчивости хотя и может изменить их реакционную способность, но незначительно – эф-

эффекты не превышают 0,1 % в полях порядка 1 Тл [10 – 12]. Обнаруженное влияние МП на фотофизические процессы с участием триплетных электронов в кристаллах стимулировало поиск подобных эффектов в растворах [13]. Открытие явления химической поляризации ядер и электронов положено в основу физического механизма влияния магнитного поля на радикальные химические реакции в растворах и способствовало созданию строгой теории этого явления [6]. Теория влияния МП на скорость радикальных химических реакций и реакций с участием молекул в триплетных возбужденных состояниях в растворах способна предсказывать оптимальные условия возникновения эффектов, где могут наблюдаться магниточувствительные стадии [7, 9, 14].

Может ли теория [6] явиться основой для объяснения действия магнитного поля на биохимические процессы в живых организмах? По-видимому, может, поскольку биохимические реакции, несмотря на их особенности, подчинены законам элементарного химического акта; многие биохимические реакции, из которых часть ферментативные, идут через стадии свободнорадикальных метастабильных состояний; радикальная пара является детектором МП, благодаря возникающей в ней спиновой динамики переходов между уровнями различной мультиплетности, индуцируемых внешним и локальным МП электрон-ядерной системы. Вмешательство МП, оцениваемое по зеемановскому и сверхтонкому взаимодействиям, изменяет вероятность протекания реакций за счет ранее запрещенных переходов.

При знании физико-химического механизма все большее значение приобретает поиск биохимических закономерностей реакций биологических систем на воздействие МП. Для решения этой проблемы необходимо знать не только молекулярный механизм влияния магнитного поля, но и способ трансформации молекулярных изменений на клеточный и органный уровни, а также (а это, пожалуй, самое важное) изучить роль адаптационных и регуляторных систем в формировании реакций организма на действие МП, что, по существу, и является биологическим эффектом магнитных полей.

В практической магнитобиологии уже сегодня можно руководствоваться накопленными теоретическими и экспериментальными данными о влиянии МП на ферментативные системы углеводного и липидного обменов в миокарде, отделах центральной нервной системы (ЦНС) и других

системах организма, поэтому своевременно ставить вопрос о формировании теоретических положений в магнитобиологии и магнитотерапии [15, 16]. В настоящее время можно пусть в самом общем виде получить важные практические рекомендации: какие напряженности МП необходимы, в каких патологических случаях следует (или не следует) применять МП, каково оптимальное время омагничивания объекта, необходима ли локализация МП на патологическом очаге или вне его.

Результаты, полученные при исследовании теоретических и экспериментальных химических и биохимических моделей, свидетельствуют о сложной зависимости изменения скорости радикальных химических реакций от напряженности МП. Если биохимическая система адекватна, т. е. она определена в рамках закономерностей действия МП на радикальные химические реакции, то для такой системы может быть предсказана теоретически или получена экспериментально зависимость изменения скорости реакции от напряженности МП. В современной магнитотерапии возникает острая необходимость знания молекулярных нарушений, лежащих в основе возникшей патологии, с целью определения того, какие системы радикальных биохимических реакций следует активировать, а какие ингибировать с учетом конкретных взаимодействий в реагирующих компонентах, т. е. необходимо вскрыть патологию на молекулярном уровне [3, 8].

Изменение скорости реакции под влиянием магнитного поля – процесс практически мгновенный и, следовательно, время омагничивания (экспозиция) объекта всецело должно зависеть от времени срабатывания адаптационных систем в момент раскомпенсации. При этом следует учитывать порог биохимической адаптации, циркадные и сезонные изменения исследуемой биохимической системы. Перестройка большинства молекулярных процессов и переход их на новый метаболический уровень в клетке заканчивается за 15 – 20 минут (синтез белков, липидов, гормонов и других молекул; процессы проницаемости, возбуждения ограничиваются десятками миллисекунд). Видимо, 20 минут и есть лимитирующая экспозиция действия МП для определенных молекулярных перестроек при конкретном циркадном значении активности исследуемой метаболической системы [16]. Произведение напряженности H на экспозицию T ($H \cdot T$) можно рекомендовать

как гипотетическую, но экспериментально определяемую «дозу» омагничивания, для которой величина биомагнитного эффекта в каждом конкретном случае должна быть оптимальной. В клетке существует многоступенчатая регуляция любого метаболического процесса, контролируемого, в свою очередь, ЦНС. Если активность исследуемого метаболического звена полностью подавлена развитием патологии, то активация и восстановление его функций должны происходить через резервные интактные пути при участии ЦНС, что и определяет требования к локализации МП. При частичной утрате активности звена активация может быть достигнута локально, непосредственно в патологическом очаге или через посредство воздействия также и на другие системы организма.

Итак, биологическое действие магнитного поля может быть интерпретировано с позиций молекулярного механизма, согласно которому его влияние выражается в изменении кинетики и направленности биохимических радикальных реакций и в первую очередь реакций перекисного окисления липидов. На первичное воздействие МП у живого организма возникают многочисленные адаптационные реакции на разных уровнях его жизнедеятельности, протекание которых определяет биологический эффект.

Терапевтическое действие магнитного поля может быть тем значительнее, чем полнее выявлены нарушенные патологией биохимические параметры организма (биоритмы, адаптационный порог, время ответной реакции), на которые МП должно оказать нормализующее действие.

Библиографические ссылки

1. Применение магнитных полей в клинике : тез. докл. обл. конф. Куйбышев, 1976. 199 с.
2. Гигиеническая оценка магнитных полей : материалы симп. М., 1972. 169 с.
3. Применение магнитных полей в клинической медицине и эксперименте : тез. докл. 2-й Поволж. конф. Куйбышев, 1979. 243 с.
4. Хочачка П., Сомеро Д. Стратегия биохимической адаптации. М. : Мир, 1977. 398 с.

5. Ньюсхолм Э., Старт К. Регуляция метаболизма. М. : Мир, 1977. 407 с.
6. Учаченко А. Л. Химическая поляризация ядер и электронов. М. : Наука, 1974. 246 с.
7. Франкевич Е. Л. Магнитные поля и скорость реакции // Вестник АН СССР. 1978. Т. 2. С. 80 – 86.
8. Аристархов В. М., Пирузян Л. А. Роль биохимических процессов в ответных реакциях биосистем на воздействие магнитных полей // Известия АН СССР. Серия Биология. 1977. № 6. С. 915 – 919.
9. Сагдеев Р. З., Салихов К. М., Молин Ю. Н. Влияние магнитного поля на процессы с участием радикалов и триплетных молекул в растворах // Успехи химии. 1977. Т. 46. № 4. С. 569 – 601.
10. Аристархов В. М., Пирузян Л. А., Цыбышев В. П. Физико-химические основы первичных механизмов биологического действия магнитного поля // Реакции биосистем на магнитные поля. М. : Наука, 1978. С. 6 – 25.
11. Дорфман Я. Г. О специфике воздействия магнитных полей на диамагнитные макромолекулы в растворах // Биофизика. 1962. Т. 7. № 6. С. 733 – 736.
12. Аристархов В. М. Критические замечания о теоретических обоснованиях биологических эффектов магнитного поля // Известия АН СССР. Серия Биология. 1979. № 1. С. 122 – 123.
13. Соколик И. А., Франкевич Б. Л. Влияние магнитных полей на фотопроецессы в органических твердых телах // Успехи физических наук. 1973. Т. 3. Вып. 2. С. 261 – 288.
14. Влияние МП на скорость разложения H_2O_2 каталазой и комплексом ЭДГА с Ge^{+3} / Л. М. Вайнер [и др.] // Биофизика. 1978. Т. 23. Вып. 2. С. 234 – 241.
15. Удинцев Н. А., Канская Н. В. Влияние магнитного поля на сердце. Томск : Изд-во ТГУ, 1978. 124 с.
16. Холодов Ю. А. Реакции нервной системы на электромагнитные поля. М. : Наука, 1975. 206 с.

2.4. Применение электромагнитных полей в диагностике и терапии

Проблема применения ЭМП в медицине в диагностических и лечебных целях развивается в двух направлениях: 1) регистрация внутренних (эндогеннообразуемых) ЭМП; 2) воздействие внешними ЭМП (экзогенное воздействие) с целью обнаружения и разрушения патологического очага или замедления патологического процесса.

Внутренние поля меняются при различных функциональных состояниях и патологических процессах. Использование внутренних электромагнитных полей базируется на их тесной связи с метаболическими процессами и молекулярной организацией организма. Регистрация внутренних ЭМП – наиболее чувствительный диагностический метод, позволяющий в ряде случаев получить сведения о состоянии организма безболезненным и бесконтактным способом, не используя стандартные методики забора крови, биопсийного материала, посевов и введения различных зондов. Эти методы не имеют противопоказаний для применения.

В терапевтических целях часто ограничиваются воздействиями внешних, иногда высокоинтенсивных ЭМП. В настоящее время еще недостаточно учитывается роль резонансного действия ЭМП на молекулярную организацию и влияние его на патологические процессы, не используется возможность воздействия на сумму воспринимающих структур потоком излучений волн разной длины, для каждой из которых имеется селективно поглощающая структура.

Наиболее важными структурами, воспринимающими излучение, являются мембраны, вода, ферменты, ионы, их взаимосвязь друг с другом, а на уровне организма – его функциональное состояние. Мембраны состоят из белков, жиров, углеводов, погруженных в структурированную воду. С мембранами связаны многие ферменты, в липидах мембран протекают процессы свободнорадикального перекисного окисления (СРПО). Изменение структуры мембран, наблюдающееся при действии некоторых излучений, вызывает изменение активности ферментов, синтеза макроэргических соединений, интенсивности СРПО. Эти изменения на клеточном уровне могут проявиться нарушениями в проницаемости, всасывании, устойчивости мембран к гипоксии, действию других факторов.

Для проявления биологического действия электромагнитного поля необходима вода, включенная в единый комплекс «макромолекула – вода», являющийся единой упорядоченной структурой с собственным регулярным ЭМП [2]. Подобный комплекс обеспечивает создание возбужденных состояний, возникновение и распространение возбуждения [3], рецепцию ЭМП. Вода ответственна за основной биологический эффект при действии микроволн: поглощает 98 % падающего излучения с длиной волны 3 см [4].

Комплекс «вода – фермент» воспринимает электромагнитную энергию как непосредственно за счет наличия полос поглощения, так и при миграции энергии между молекулами. Ферменты изменяют свою активность при поглощении ЭМП, а также при воздействии радиотоксинов преимущественно липидной природы, при нарастании концентрации активированных форм кислорода, изменении структуры мембран.

Следующий рецептирующий компонент – ионы, степень гидратации которых определяет разнообразие реакций при действии электромагнитного поля. Увеличение связей между молекулами воды уменьшает гидратацию ионов, ослабление связей – усиливает ее [1]. Внешнее ЭМП воспринимается также нуклеиновыми кислотами. При действии излучения с длиной волны, соответствующей полосе поглощения, наблюдается либо разрушение связей, либо передача энергии другим молекулам, либо излучение энергии возбужденной молекулой [5, 6].

Один из наиболее важных признаков живого – обмен информацией между его составными элементами. Он осуществляется внутренними ЭМП [6 – 9], молекулами циклических нуклеотидов, белков, ферментов, а также некоторыми клетками [10 – 11], что приводит к формированию процессов деления, интеграции, узнавания клетками друг друга [12 – 16]. Наиболее полно обмен информативными молекулами разработан в теории креаторных связей [17]. На интенсивность обмена информацией влияет как состояние внутриклеточного метаболизма, так и состояние мембран для информативных молекул, вызывая «возмущение» в каналах передачи информации, что приводит к изменению отдаленных необлучаемых клеток. Возможно также непосредственное влияние на информативную связь, осуществляемую внутренними электромагнитными полями.

Рассмотрим применение каждого из диапазонов ЭМП – от гамма-излучений до радиоволн – в диагностических и терапевтических целях, обосновывая эффективность действия этих методов теми влияниями, которые наблюдаются в организме при действии конкретного вида излучений.

1. Ионизирующее излучение. Различают прямое воздействие ионизирующего излучения на молекулы, приводящее их в состояние возбуждения или к разрушению, и опосредованное воздействие – на реакции между макромолекулами и активированными молекулами воды [18]. В самые ранние сроки после облучения отмечается повышение количества радиотоксинов. Показано, что молекулы радиотоксинов находятся в свободнорадикальном состоянии [19, 20] и усиливают СРПО [20 – 22]. Ионизирующая радиация на биохимическом уровне вызывает нарушение процессов гликолиза и окислительного фосфорилирования как при непосредственном воздействии на ферменты и мембраны, так и при опосредованном действии через увеличение СРПО, которое также оказывает разобщающее воздействие на процессы окисления. В повреждающем действии важная роль принадлежит кислороду, по этой причине оксигенация увеличивает поражение, а гипоксия оказывает защитное воздействие [23]. Повреждающее действие выражено у активных форм кислорода (супероксид-анион радикала) и усиливается как по причине их образования под действием облучения, так и в силу ингибирования супероксиддисмутазы, понижающей уровень активных форм кислорода.

В терапевтических целях ионизирующая радиация применяется для полного разрушения патологических очагов (опухоли) и замедления патологических процессов (патохимических и патофизиологических), например, хронического воспаления (болезнь Бехтерева, упорные к лечению формы радикулитов и др.). Введением изотопов, селективно накапливающихся в органах и тканях, также воздействуют на патологические процессы до полного разрушения патологических очагов (опухоли щитовидной железы, болезни крови и др.).

Диагностическое использование ионизирующей радиации основано на различной проницаемости тканей для этого излучения. При изменениях в органах (опухоль, туберкулез, повреждения) можно видеть на рентгеновских снимках соответствующее изменение [24]. Внутрен-

нее ЭМП данного диапазона образуется при распаде естественных изотопов и действии космического излучения. Однако введением радиоактивных изотопов уровень излучения можно повысить и получить информацию о состоянии органов и тканей. Распределение изотопов определяется функциональным состоянием органов, избирательным поглощением различных изотопов, что позволяет выявить начальные стадии заболевания [25].

При больших дозах облучения отмечается развитие астенизации организма, ослабление функций систем и органов, снижение иммунологической защиты. Ослабление функций в первую очередь затрагивает нервную систему.

2. Ультрафиолетовая радиация. Первичной воспринимающей структурой, по-видимому, являются молекулы белка, с которых энергия возбуждения передается на молекулы липидов, стимулируя СРПО [26 – 30]. Ультрафиолет поглощают также нуклеиновые кислоты, каротиноиды, хиноны, цитохромы и некоторые другие пигменты. На клеточном уровне это приводит к разрушению мембран, микросом, выходу метаболитов и ферментов в цитоплазму, что еще более ухудшает повреждение [31]. Наблюдаются мутагенные и летальные эффекты, зависящие от дозы облучения, длины волны, состояния облучаемых объектов, наличия в них защитных систем (антиоксиданты, ферменты репарации и др.).

Ультрафиолетовая (УФ) радиация, являясь неспецифическим стимулятором физиологических процессов организма, воспринимается поверхностью кожи, внутренние ткани надежно защищены от ее действия. Подводя световоды к тканям, можно наблюдать разнообразные эффекты от УФ-радиации; если такой структурой будет мозг, то возможно развитие некоординированных движений, эпилептических припадков (наши предварительные эксперименты). УФ-радиация применяется при лечении тонзиллитов, болезней кожи (зимняя форма псориаза, язвенное повреждение кожи), воспалительных и трофических процессов. В естественных условиях УФ-излучение представлено в солнечном спектре и находит применение в гелиотерапии совместно с действием оптического и инфракрасного излучений.

Установлено следующее соответствие между длинами волн УФ-радиации и биологическим действием: 180 – 275 нм – повреждающее действие, 275 – 400 нм – антирахитическое и слабобактерицидное,

320 – 400 нм – эритемнозагарное действие. Основой применения внешнего УФ для диагностики является тот факт, что при развитии патологических изменений меняется структура белков, ферментов, мембран, следовательно, изменяется реакция организма на облучение – изменяется флуоресценция тканей, что позволяет установить наличие патологии, например, развитие опухоли [32 – 33]. Регистрация эндогеннообразуемых полей позволяет обнаружить в одних случаях снижение интенсивности УФ-излучения (опухоль) [34], в других – увеличение его (болезнь сосудов). В настоящее время внутреннее УФ-излучение регистрируется совместно с оптическим на установках по определению сверхслабого свечения [35].

3. Оптическое излучение (ОИ). Эффект действия оптического излучения определяется присутствием в биообъектах молекул и структур, поглощающих длины волн ОИ (фотосинтез, рецепция света глазом, эритемное воздействие и др.) [36 – 38]. При воздействии ОИ значительной мощности необходимо учитывать слагаемые от ударных процессов и теплового повреждения тканей. Оптическое излучение влияет на структуры мембран (воздействие слабых потоков в течение примерно 60 мин) и активность мембранно-связанных ферментов.

В терапии оптическое излучение используется для повышения неспецифической резистентности организма, а также (при большой интенсивности) – для разрушения поверхностно расположенных очагов.

Применение оптического и УФ-излучения совместно с фотосенсибилизаторами (метоксипсорален, метксален, гематопорфирин и его производные) увеличивает эффект при лечении псориаза, некрозов и опухолей [39 – 40]. Более выраженные эффекты наблюдаются при использовании оптических квантовых генераторов (лазеров) для лечения глаз, кожных болезней, опухолей, особенно меланом [41, 42]. Интересен факт, что облучение одной опухоли вызывает регресс другой, расположенной отдельно и не облученной [43, 44]. Поскольку титр противоопухолевых антигенов не возростал, значит, имеются другие механизмы защиты в организме помимо иммунологической, а именно – неиммунологическая система, включающая тиоловые соединения, антиоксиданты, липиды, липазы, супероксиддисмутазы и др. [45 – 47]. Все перечисленные соединения имеют связь с генерацией организмом ЭМП. Возможно, что внутренние ЭМП самостоятельно выполняют не-

которую защитную роль. Исходя из различной чувствительности составных частей организма к разным длинам волн, считается возможной «настройка» лазерного излучения на селективное взаимодействие с определенными тканями, особенно при введении селективно поглощающих красителей [48]. Это позволит не только изменить состояние тканей, но и перестроить измененные ткани в нужном направлении.

В диагностических целях внешнее излучение применяется для осмотра пазух, полостей тела и кожных поверхностей. Внутреннее оптическое излучение регистрируется хемоллюминесцентным методом в нативных тканях или сыворотке крови [35]. Нами показана возможность создания камер для определения суммарного ОИ организма или некоторых его частей. Они напоминают камеры для исследования общего обмена, однако для регистрации ОИ используются определенные фотоэкранирующие устройства (ФЭУ) (ФЭУ 37, ФЭУ 42, ФЭУ 42б, ФЭУ 85 и др.). Отмечено, что при наличии незначительного венозного застоя в нижних конечностях наблюдается возрастание ОИ конечностей. При различной патологии уровень оптического излучения сыворотки крови или гомогената ткани меняется: повышается (атеросклероз, лучевая болезнь, туберкулез) или понижается (опухолевый и гипоэндокринные процессы [42 – 52]). Уровень ОИ зависит от уровня и вариаций СРПО.

4. Инфракрасное (ИК) излучение. ИК-излучение вызывает возбуждение молекул, комплексов и структур. Однако возбуждение затрагивает преимущественно вращательную и колебательную способности молекул. При длительном или интенсивном воздействии ИК-лучей меняется структура мембран, активность ферментов. В результате при поглощении тканями ИК-излучения развиваются местные процессы: увеличивается проницаемость кровеносных и лимфатических сосудов, освобождаются биологически активные вещества. В дальнейшем присоединяются общие процессы: изменение температуры, интенсификация обмена, увеличение числа эозинофилов и скорости оседания эритроцитов (СОЭ), стимуляция иммуногенеза. При интенсивном ИК-излучении происходят процессы разрушения организма.

В терапевтических процедурах ИК-излучение используется как составной элемент гелиотерапии и совместно с другими видами излучений (ОИ, УФ) при лечении кожных болезней и астенизации организма.

Воздействие внешнего ИК-излучения для диагностических целей практически не используется за исключением тех случаев, когда дискомфорт человека при нахождении в поле ИК-радиации расценивается как ответ астенизированного организма с хроническими воспалительными процессами (туберкулез, болезнь Бехтерева).

Интересным и перспективным является регистрация внутреннего ИК-излучения организма, уровень которого меняется при развитии патологического процесса. Эти изменения в органах и тканях выявляются в начальных стадиях и увеличиваются по мере развития патологии. Регистрация внутреннего ИК-излучения используется для диагностики болезней нервной, сердечно-сосудистой систем и др. Теоретически можно предположить, что при наличии приборов достаточно высокой чувствительности возможна регистрация любых изменений процессов метаболизма [53 – 57].

5. Радиоволновое излучение. Физической основой для действия радиоволн на организм является наличие в нем ионов, диполей, свободных радикалов, полярных микро- и макромолекул, наличие внутренних ЭМП и электрических токов. Биологический эффект определяется длиной волны действующего излучения, интенсивностью, важностью для организма воспринимающих поле структур, селективностью воздействия.

В действии внешнего радиоволнового излучения различают:

- тепловое действие эндогенного характера;
- селективное действие, т. е. поглощение определенными тканями энергии различных диапазонов длин волн;
- специфическое действие на определенные органеллы [58 – 60].

Энергия внешних электромагнитных полей поглощается тканями за счет диэлектрических потерь, ионной проводимости, резонансных явлений. Резонансное поглощение становится возможным, когда частота внешнего воздействия близка к частоте собственных колебаний макромолекул, их комплексов и боковых цепей. Для резонансного взаимодействия необходимо наличие воспринимающих структур – УВЧ, например, поглощается преимущественно белковыми молекулами, а микроволны – комплексами молекул воды [5, 60]. Яркое подтверждение эффекта резонансного воздействия СВЧ-излучений было получено в опытах с гемоглобином. Установлено, что облучение одной длиной

волны (7 мм) приводит к выраженным изменениям (диссоциации молекулы гемоглобина на субъединицы), а действие другой длины волны, даже достаточно близкой, эффекта не оказывает [61 – 63]. Для резонансного взаимодействия характерны выраженные изменения в организме при действии слабых потоков излучения. Биологические эффекты могут измениться, если в падающем потоке сохранится несколько длин волн, для каждой из которых в организме имеется резонансно настроенная структура.

К действию внешних ЭМП радиодиапазона высокую чувствительность проявляет нервная система. При недозированном облучении отмечаются жалобы на общую слабость, снижение памяти, внимания, работоспособности, бессонницу. У экспериментальных животных нарушается условнорефлекторная деятельность, изменяется биоэлектрическая активность мозга и др. [64]. Малые дозы микроволн ингибируют СРПО.

Возможности применения электромагнитных полей в терапии полностью не раскрыты. В медицине используются ЭМП различных частотных диапазонов: УВЧ-терапия, импульсная УВЧ-терапия, индуктотермия, сантиметровая, дециметровая ВЧ-терапия, импульсная СВЧ-терапия. В терапии также используются постоянные электрические поля (франклинизация), переменные МП низкой частоты (магнитотерапия).

Применение ЭП, а также внешних статических полей основано на изменении диэлектрических свойств тканей при патологических процессах. Определяя эти изменения, можно получить ценные диагностические признаки. Регистрация внутренних ЭМП радиодиапазона нашла клиническое применение в виде магнитокардиографии, магнитоэнцефалографии. Эти методы не требуют наложения электродов или каких-либо других манипуляций на пациенте. Использование данных о биополях даст новые возможности в бесконтактной диагностике. Эти методы требуют клинического осмысливания и дальнейшего изучения, поскольку регистрируемые ЭМП внутреннего происхождения продемонстрированы на незначительном контингенте больных и малом числе нозологических форм. Возможности использования внутренних ЭМП в терапии – недостаточно ясная проблема. По-видимому, о подобном воздействии можно говорить при аутотренинге и бальнеологи-

ческом лечении. Внутренние ЭМП затрагиваются при лечении антиоксидантами, при использовании ингибиторов супероксиддигидрогеназы, при действии внешних излучений. Однако методы целенаправленного влияния на внутренние эндогенные ЭМП, а также электромагнитные «каналы» связи в организме не ясны в настоящее время. Требуются дальнейшие исследования, чтобы определить роль внутренних ЭМП и возможности управления ими. Очень перспективным для терапии является поиск резонансных структур в организме и создание «мозаики» действующих на них внешних излучений.

Библиографические ссылки

1. Аскоченская Н. А., Петин Н. С. Структура воды и ее роль в биологических системах // Успехи современной биологии. 1972. Т. 73. С. 288 – 305.
2. Привалов П. Л. К вопросу о состоянии и роли воды в биологических системах // Биофизика. 1958. Т. 3 № 6. С. 738 – 742.
3. Сент-Дьердьи А. Биоэнергетика. М. : Физматгиз, 1960. 155 с.
4. Василенко Ф. Д. Физическое обоснование действия физических факторов на организм // Физические факторы в комплексном лечении и профилактика внутренних и нервных болезней / под ред. А. Н. Образова. М. : Медицина, 1971. С. 29 – 104.
5. Самойлова К. А. Действие ультрафиолетовой радиации на клетку. Л. : Наука, 1967. 196 с.
6. Мостовников В. А., Хохлов И. В. Взаимодействие клеток человека с помощью электромагнитных волн оптического диапазона // Препринт № 128. Минск : Наука и техника, 1977. 14 с.
7. Казначеев В. П. О межклеточных дистантных взаимодействиях в системе двух тканевых культур, связанных оптическим контактом // Сверхслабые свечения в биологии. М. : Наука, 1972. С. 224 – 227.
8. Ивлиев Ю. А. Некоторые возможные механизмы информационного взаимодействия в молекулярных физико-биологических системах // Биофизика. 1976. Т. 21. Вып. 1. С. 15 – 20.
9. Тарусов Б. Н. Информационное значение сверхслабого свечения // Труды МОИП. М. : Наука, 1972. Т. 39. С. 9 – 16.
10. Меерсон Ф. З. Пластическое обеспечение функций организма. М. : Наука, 1967. 318 с.

11. Межклеточные взаимодействия / под ред. Г. В. Лопашова. М. : Наука, 1970. 255 с.
12. Дорофеев Г. И., Кожемякин Л. А., Ивашкин В. Г. Циклические нуклеотиды и адаптация организма. Л. : Наука, 1978. 182 с.
13. Певзнер Л. З. Функциональная биохимия нейроглии. Л. : Наука, 1972. 199 с.
14. *Он же.* Обмен нуклеиновых кислот и белка в нервной системе // Итоги науки и техники. Физиология человека и животных. М., 1972. Т. 10. С. 124 – 199.
15. Трумэн Д. Биохимия клеточной дифференцировки. М. : Мир, 1976. 188 с.
16. Федоров Н. А. Биологическое и клиническое значение циклических нуклеотидов. М. : Медицина, 1979. 184 с.
17. Косицкий Г. И., Ревич Г. Г. Креаторная связь и ее роль в организации многоклеточных систем. М. : Наука, 1975. 124 с.
18. Окала Ш. Радиационная биохимия клетки. М. : Мир, 1974. 407 с.
19. Серкиз Я. И., Рябова Э. З., Чеботарева Е. Е. Спонтанное и индуцированное излучение сыворотки крови как показатель степени лучевого поражения животных // Радиобиология. 1975. Т. 15. № 5. С. 716 – 721.
20. Эйбус Л. Х. Молекулярный механизм повреждения клеток и защита от действия ионизирующей радиации // Радиобиология. 1973. Т. 13. № 5. С. 651 – 661.
21. Бурлакова Е. Б., Алесенко А. В., Молочкина Е. М. Биоантиоксиданты в лучевом поражении и злокачественном росте. М. : Наука, 1975. 213 с.
22. Тарусов Б. Н. Хемилкминесценция липидов при облучении // Первичные и начальные процессы биологического действия радиации. М. : Наука, 1972. С. 50 – 54.
23. Рампан Ю. И., Анохин Ю. Н. Проблема усиления биологического действия ионизирующих излучений // Радиобиология. 1975. Т. 15. № 6. С. 843 – 849.
24. Фанарджян В. А. Рентгенодиагностика. Ереван : Айастан, 1977. 606 с.
25. Фатеева М. Н. Очерки радиоизотопной диагностики. М. : Медгиз, 1960. 268 с.

26. Свободнорадикальное окисление липидов биологических мембран / С. Н. Орлов [и др.] // Биофизика 1976. Т. 21. № 2. С. 276 – 279.
27. Владимиров Ю. А., Арчаков А. И. Перекисное окисление липидов в биологических мембранах. М. : Наука, 1972. 252 с.
28. Конев С. В., Волотовский И. Д. Введение в молекулярную фотобиологию. Минск : Наука и техника, 1971. 230 с.
29. Владимиров Ю. Д. Хемилкминесценция, сопряженная с образованием липидных перекисей в биологических мембранах // Биофизика. 1972. Т. 17. № 4. С. 702 – 706.
30. Волотовский И. Д., Шефсо Л. М., Конев С. В. Влияние УФ света на структуру мембран эритроцитов и на каталитические свойства мембранной ацетилхолинэстеразы // Молекулярная биология. 1976. Т. 10. № 5. С. 1027 – 1034.
31. Зотиков Л. А., Пинчук В. Г. Некоторые аспекты проблемы лизосом // Цитология. 1969. Т. 2. № 10. С. 1205 – 1220.
32. Карякин А. В., Анисимова И. Н. Флуоресценция легочной ткани в норме и при раке легкого // Биофизика. 1962. Т. 7. № 2. С. 146 – 149.
33. Брумберг И. Е., Шунаева С. Е. Ультрафиолетовая флуоресценция лейкоцитов крови при их повреждении // Цитология. 1964. Т. 66. № 6. С. 766 – 768.
34. Гурвич А. Г., Залкинд С. Я., Песоченский Б. С. Учение о раковом тушителе // Теория и клиника. М. : АМН СССР, 1947. 99 с.
35. Гербек Э. Э., Афризмон А. Ф., Гербек Г. В. Метод регистрации сверхслабого свечения живой ткани // Новые методы диагностики и лечения, разработанные в Томском медицинском институте. Томск : Изд-во ТТУ, 1974. Вып. 2. С. 3 – 36.
36. Сазоненко М. К. О фотодинамической стимуляции скелетной мышцы лягушки // Биофизика. 1963. Т. 8. № 6. С. 681 – 689.
37. Тамар Г. Основы сенсорной физиологии. М. : Мир, 1976. 520 с.
38. Пэдхэм Ч., Сондэрс Дк. Восприятие света и цвета. М. : Мир, 1978. 256 с.
39. Fairish I. H., Fitzpatrick T. B., Bathak M. A. Motherapy of psoriasis with methoxalen and longwave ultraviolet light // N. Engl. J. Med. 1974. Vol. 291. № 23. P. 1207 – 1211.

40. Treatment of psoriasis with oral psoralens and longwave ultraviolet light / J. Swaribeek [et. al.] // Acta dermatovener. 1975. Vol. 55. № 5. P. 367 – 376.
41. Гамалея Н. Ф. Лазеры в эксперименте и клинике. М. : Медицина, 1972. 232 с.
42. Пигментные опухоли / под ред. Р. Иконописова. София : Медицина и физкультура, 1977. 268 с.
43. Klein E., Klein I. Antigenic properties of lymphomas induced by the Moloney agent // J. Nat. Cancer Inst. 1968. Vol. 32. P. 547 – 568.
44. Goldman L., Rochwell R. I. Lasers in medicine // N. J. Gordona. Breach, 1971. 385 p.
45. Appfel C. A. Nonimmunological host defenses // Rev. Cancer Res. 1976. Vol. 36. P. 1527 – 1537.
46. Fridovich I. Superoxide dismutases. Advances in enzymology // M. J. ets. 1974. Vol. 41. P. 36 – 97.
47. Нанкин В. З. Защитные ферментные системы и перекисное окисление липидов в норме и патологических состояниях // Биоантиоксиданты в регуляции метаболизма в норме и патологии : тез. докл. Черноголовка, 1978. С. 23 – 25.
48. Лазеры на красителях / под ред. Ф. П. Шефера. М. : Мир, 1976. 329 с.
49. Журавлев А. И. Спонтанное метаболическое свечение плазмы и сыворотки крови в видимой области спектра // Сверхслабые свечения в медицине и сельском хозяйстве : тр. МОИП. М. : Изд-во МГУ, 1974. Т. 50. С. 9 – 27.
50. Журавлев А. И., Журавлева А. И. Сверхслабое свечение сыворотки крови и его значение в комплексной диагностике. М. : Медицина, 1975. 128 с.
51. Владимирская Ю. А., Арчаков В. А. Перекисное окисление липидов в биологических мембранах. М. : Наука, 1978. 252 с.
52. Коган А. Х. Свободнорадикальное перекисное окисление липидов и патогенез коронароокклюзионного инфаркта миокарда // Свободнорадикальное окисление липидов в норме и патологии. М. : Наука, 1976. С. 68 – 71.
53. Миркин Л. И., Стерлин Ю. Г. Статическая модель термографических изображений медико-биологических объектов // Медицинская радиология. 1977. Т. 22. № 3. С. 38 – 49.

54. Термография в диагностике некоторых хронических заболеваний органов пищеварения / К. А. Морозов [и др.] // Врачебное дело, 1979. № 4. С. 73 – 76.

55. Значение термографии в диагностике сердечно-сосудистых заболеваний / Л. В. Солдаткина [и др.] // Терапевт. 1976. Т. 48. № 9. С. 96 – 101.

56. Использование тепловидения при массовом обследовании с целью выявления начальных стадий каротидной недостаточности / О. А. Хондкариан [и др.] // Труды Горьковского медицинского института. 1977. Вып. 82. С. 93 – 94.

57. Зарецкий В. В., Выховская А. Г. Клиническая термография. М. : Медицина, 1976. 168 с.

58. Быкова Е. Б., Файтельберг Я. А., Бланк В. Р. Изучение активности окислительно-восстановительных реакций в органах пищеварения для оценки действия СВЧ // Вопросы курортологии : тез. докл. науч.-практ. конф. врачей-курортологов. Минск, 1973. С. 72 – 73.

59. Габович Р. Д., Никберг И. И. Гигиенические аспекты гелиометеорологических воздействий в патологии органов кровообращения // Гигиена и санитария. 1978. № 3. С. 94 – 97.

60. Скурихина И. А. Современное состояние высоко-, ультравысоко- и сверхвысокочастотной электротерапии // Вопросы высоко-, ультравысоко- и сверхвысокочастотной электротерапии. М. : ЦНИИКиФ, 1971. С. 5 – 20.

61. Девятков Н. Д., Храпов В. В., Гарибов Р. Э. Влияние миллиметрового излучения малой интенсивности на гамма-резонансные спектры гемоглобина // Доклады АН СССР. 1975. Т. 225. № 4. С. 962 – 965.

62. Кудряшова В. А., Ильина С. А., Фалеев А. С. Исследование резонансного воздействия волн миллиметрового диапазона на гемоглобин // Гигиена труда и биологическое действие электромагнитных волн радиочастот. М., 1972. С. 64 – 65.

63. Коренева Л. Г., Гайдук В. Й. О принципиальной возможности резонансного взаимодействия сверхвысокочастотных колебаний на гемоглобин // Доклады АН СССР. 1970. Т. 193. № 2. С. 465 – 468.

64. Холодов Ю. А. Реакции нервной системы на электромагнитные поля. М. : Наука, 1975. 207 с.

2.5. Методы измерения электромагнитных полей живых организмов

Измерение электромагнитных полей, создаваемых каким-либо источником, в том числе и биообъектами, в принципе может проводиться по электрической и магнитной компонентам. Поскольку уровень ожидаемых сигналов в непосредственной близости от поверхности тела находится в пределах от единиц микровольт до десятков милливольт (при измерении электрической компоненты) или десятых долей нанотеслы (при измерении магнитной компоненты), то для измерения биоэлектромагнитных полей экспериментаторы используют специальные методы и особо чувствительную аппаратуру. Наибольший интерес представляют способы измерения ЭМП биообъектов на сравнительно низких частотах, соответствующих частотам электрических процессов, протекающих в организме.

В настоящее время для оценки внешних ЭМП живых систем используются главным образом электрометрический метод и метод частотного преобразования сигнала (при регистрации электрической компоненты), индукционный метод и метод, использующий явление сверхпроводимости (при регистрации магнитной компоненты). Выбор объекта исследования (целостный организм, изолированные структуры) определяет конкретную реализацию этих методов.

2.5.1. Методы измерения электрических полей организмов

Дистанционный метод регистрации электрических полей вблизи живых систем отличается от соответствующих методов контактной регистрации биопотенциалов лишь тем, что один из отводящих электродов (незаземленный) заменяется датчиком поля – пластиной. В отличие от методики, изложенной в работе [1], измерительные приборы и объект исследования обычно помещаются в электростатический экран [2].

Измерительные приборы, используемые различными экспериментаторами, можно разделить на две группы: 1) ламповые электрометры с высоким входным сопротивлением (от 10 до 10^{12} Ом) и малой входной емкостью (от 5 до 0,05 пФ) в полосе пропускания от 0 до 100 Гц и чувствительностью порядка $10^{-3} - 10^{-4}$ В [3 – 5]; 2) высокочувствительные усилители, выполненные на базе полевых транзисторов МДП-

структур, входные сопротивления которых находятся в пределах от 10^{11} до 10^{16} Ом, входная емкость порядка 0,05 нФ в полосе частот от 10^{-2} до 10^7 Гц и эффективное напряжение шумов при короткозамкнутом входе 7 – 10 мкВ [6 – 8].

Конструктивно входные каскады измерительных приборов выполняются в виде отдельных блоков, тщательно экранируются от внешних полей, а экраны заземляются. Датчики поля в зависимости от цели эксперимента имеют диаметр от 10 до 60 мм. Регистрация сигналов проводится либо на экране осциллографа с последующим фотографированием, либо на бумажной ленте самописца [3 – 9]. В некоторых случаях на входе индикаторных приборов включаются полосовые фильтры для регистрации отдельно электрических полей сердца, дыхания и др.

При измерении электрических полей изолированных структур важен способ их возбуждения и наличие или отсутствие контактов объекта исследования с проводящими телами [3,10]. Метод измерения ЭП возбужденных изолированных структур характеризуется тем, что измерительный прибор гальванически не связан с объектами исследования (нерв, сердце), а стимуляция их осуществляется от автономного генератора. В экранированной камере располагаются только входные электрометрические блоки усилителя и объект исследования. Датчики поля выполнены в виде металлических дисков, окруженных кольцом, заземленным через сопротивление, рабочей является только наружная сторона диска.

Другая модификация [5, 7] этого метода предусматривает регистрацию ЭП изолированных структур высокочувствительным измерительным усилителем с симметричным входом и высоким входным сопротивлением $10^{11} - 10^{16}$ Ом. На МДП-транзисторах, где в качестве датчиков поля использованы диски диаметром 1 мм, измеряется разность потенциалов между двумя дисками, присоединенными ко входам усилителя, при этом расстояние между центрами дисков составляет 17 мм. Этим прибором измерялись не только потенциалы, но и напряженность поля, цена деления датчика была 0,1 В/мм [7].

Более качественные измерения полей биологических объектов могут быть получены при использовании усилителей, собранных на базе полевых МДП-транзисторов в отсутствие гальванических связей

между измерительным прибором и объектом исследования. Для корректного измерения разности потенциалов, наведенных в двух идентичных дисках-датчиках, расстояние между их центрами должно быть больше диаметра используемых датчиков. Однако это условие пока не выполняется.

Заслуживает внимания метод измерения электрического поля сердца [11, 12], в котором в качестве «антенны» датчика использована помимо дисков замкнутая оболочка – камера. По этому методу испытуемый после нейтрализации поверхностного заряда подсоединяется при помощи индифферентного электрода к одному из входов измерительного усилителя с входным сопротивлением $5 \cdot 10^9$ Ом, а камера – ко второму входу.

Все большее распространение получает метод регистрации электрического поля сердца через диэлектрическую прокладку для устранения артефактов движения, причем использование прокладок с удельным сопротивлением $10 - 10$ Ом · см и относительной диэлектрической проницаемостью $1,5 - 5$ в полосе частот от $0,2$ до 150 кГц позволяет рассматривать систему как емкостный делитель [11 – 13]. Действующий макет установки представляет собой два истоковых повторителя, собранных по сложной схеме с комбинированной обратной связью. Входное сопротивление каждого плеча усилителя в рабочем диапазоне частот составляет $5 \cdot 10^{10}$ Ом при входной емкости 6 пФ. Датчик поля конструктивно выполняется на электродах из фольгированного с обеих сторон стеклотекстолита размерами $42 \times 30 \times 8$ мм [11]. Некоторые авторы используют электроды на основе сегнетокерамики [13].

Принципиально новый метод измерения электрического поля живых организмов (поля сердца) предложен в работе [14]. В качестве датчиков поля предлагается использовать сегнетоэлектрические пластины с высокой (порядка 10^4) диэлектрической проницаемостью, которая, как известно, изменяется при помещении пластины в электрическое поле. Именно это свойство сегнетоэлектриков используется для индикации полей биообъектов. Для усиления сигналов, наведенных в датчике, применяются измерительные усилители с уровнем шумов порядка 2 мкВ в полосе частот до 1 кГц. Параметры аппаратуры и предлагаемая методика эксперимента дают основания считать этот метод весьма перспективным [14].

Для измерения электрического поля сердца по методу [15] антенна в виде штыря длиной около 1 м располагается на некотором расстоянии от тела человека. Непосредственно к антенне-датчику присоединяется устройство для согласования импедансов источников поля и регистрирующего прибора, входное сопротивление которого выбирается равным 10 Ом в полосе частот от 0 до 3 кГц. Измерения проводятся вне экранированной камеры. Компенсация помехи осуществляется путем вычитания в специальном устройстве сигналов, наведенных в двух аналогичных антеннах (рис. 2.9), причем вторая антенна регистрирует только помеху. Измерительные усилители собраны на полевых транзисторах и позволяют измерить сигналы амплитудой от 0,15 мВ и выше. Положительным качеством этого метода являются высокая разрешающая способность и возможность индикации поля сердца человека вне экранированной камеры.

Индикация инфранизкочастотного электрического поля (ИНЧ ЭП) (рис. 2.10), генерируемого живым организмом, осуществляется в настоящее время методом прямого усиления или частотного преобразования сигналов.

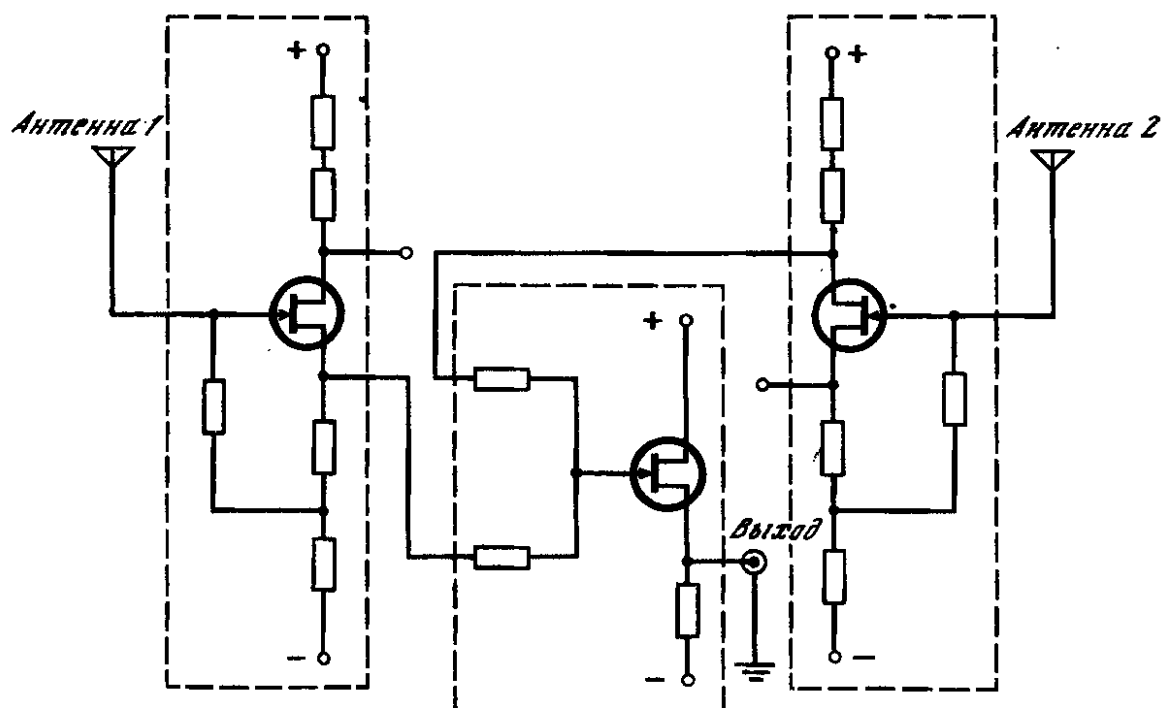


Рис. 2.9. Электрическая схема входных каскадов и схема вычитания помехи при измерении ЭП сердца

В первом случае для регистрации полей сердца и нерва используются высокочастотные усилители, отличающиеся от описанных выше [3 – 9] более высоким входным сопротивлением ($10^{17} - 10^{18}$ Ом) и граничной нижней частотой ($10^{-6} - 10^{-7}$ Гц). Наиболее распространен второй метод, суть которого заключается в следующем: либо силовые линии источника поля взаимодействуют с проводником, приводимым в движение механическим или электродинамическим вибратором, либо силовые линии исследуемого поля периодически пересекают неподвижный проводник. В обоих случаях ток, наведенный в датчике-проводнике, служит мерой напряженности исследуемого поля [16].

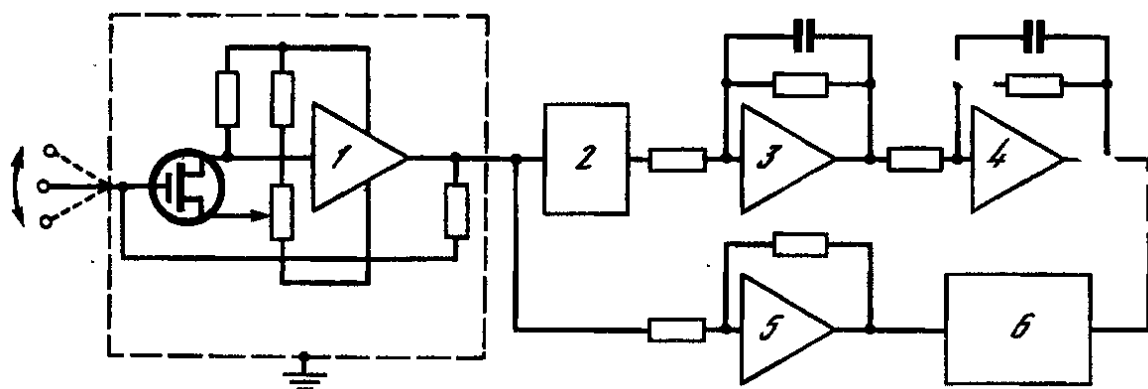


Рис. 2.10. Блок-схема установки для измерения ИНЧ-поля организмов:
 1 – выносной блок предварительного усилителя; 2 – усилитель низких частот;
 3 – 4 – схема выделения огибающей с фильтрами; 5 – усилитель сигналов, наведенных в неподвижном датчике; 6 – регистратор

Конкретная реализация метода преобразования частоты каждым экспериментатором осуществляется по-своему [8, 9]. В качестве датчиков поля обычно применяются металлические диски, шарики, пластины, стержни из золота, платины, стали, никеля [9]. В ряде случаев экспериментаторы, располагая датчик поля (пластину) на расстоянии около 1 мм от поверхности объекта исследования, рассматривают систему как плоский конденсатор, одной пластиной которого является объект, а другой – вибрирующий с определенной частотой датчик. Электрический ток, наведенный в датчике, регистрируется измерительным прибором, входное сопротивление которого обычно выбирается в пределах $10^9 - 10^{11}$ Ом, а частоты преобразования – от долей до сотен герц [8, 9].

Метод безгальванической связи объекта исследования и измерительного прибора использовался для регистрации инфранизкочастотных электрических полей организма человека. Измерительные усилители были выполнены на базе МДП-транзисторов отечественного производства. Емкость датчика поля, присоединенного ко входу измерительного усилителя, была не более 1 – 2 пФ, постоянная времени устройства не превышала 0,2 с, частота колебания датчика регулировалась в пределах от 0,5 до 2 Гц, что обеспечивало работу системы в токовом режиме [9]. На бумажной ленте самописца регистрировалась огибающая электрического тока, наведенного в датчике.

Блок-схема установки приведена на рис. 2.10. Другая модификация этого метода предполагает использование на входе усилителя электродинамического преобразователя (с частотой преобразования 200 – 300 Гц), что позволяет расширить полосу пропускания устройства и применить более низкоомные (10 Ом) усилители. Схема датчика представлена на рис. 2.11.

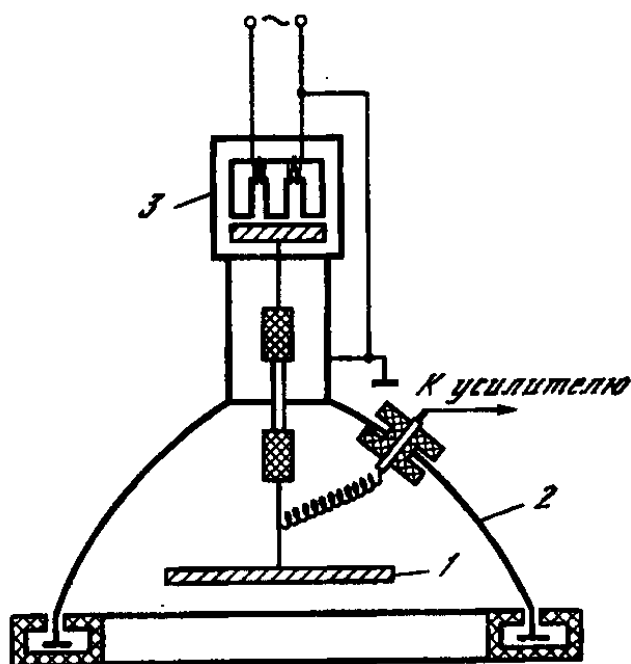


Рис. 2.11. Схема датчика с электрическим преобразователем сигнала: 1 – дисковый датчик поля; 2 – экранирующий колпачок; 3 – электродинамический преобразователь

Принципиально другой метод регистрации ИНЧ-полей хотя и не получил к настоящему времени широкого применения, однако заслуживает внимания [17]. Основной принцип действия прибора, разработанного на основе расчетов [16], состоит в следующем (рис. 2.12). Датчик поля (пластина или стержень) подключается к накопительному конденсатору. Через промежуток времени, соответствующий полупериоду измеряемого сигнала, происходит переполюсовка датчика, причем выбор формы переключающего напряжения позволяет добиться значительного подавления высших гармоник. Чувствительность предложенного метода составляет 10^{-4} В, дрейф нуля – не более 2 мВ/ч, амплитудная характеристика в интервале от 0,3 до 10 мВ линейна, ширина полосы пропускания при частоте переключения 8 Гц составляет 0,4 Гц. После накопления сигнал поступает на вход электрометрического усилителя с входным сопротивлением 10^{11} Ом и регистрируется измерительным прибором. Подавление внешней помехи осуществляется вычитанием сигналов, наведенных в двух идентичных каналах, причем один из них принимает только помеху. Принципиальная схема накопительных цепей и фильтров приведена на рис. 2.12.

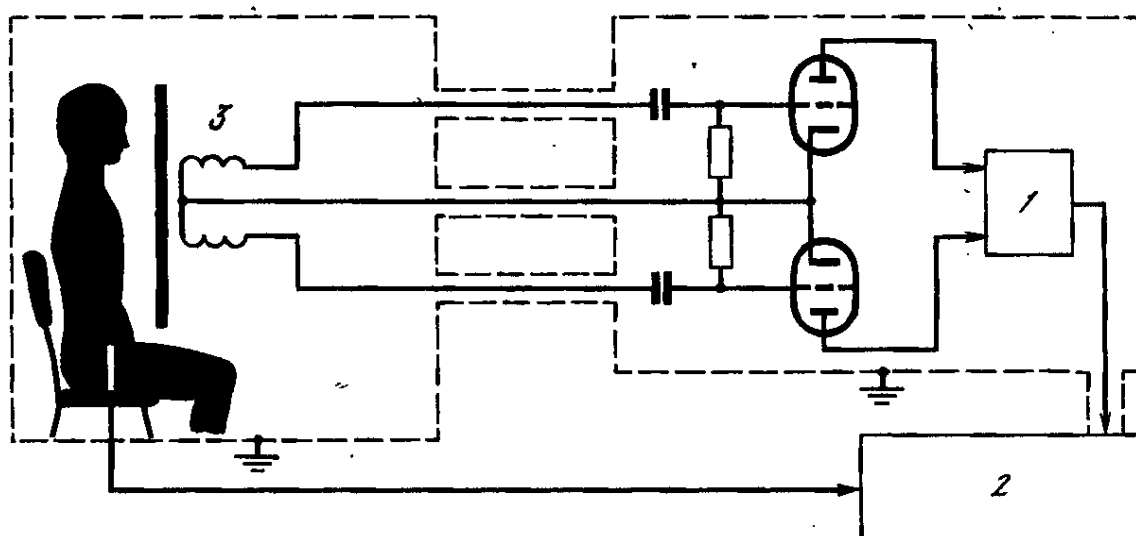


Рис. 2.12. Блок-схема установки для измерения МП сердца человека:
1 – электронный усилитель; 2 – регистратор; 3 – индукционный датчик поля

Для регистрации внешних электрических полей живых организмов в проводящей среде, например ЭП у водных организмов (рыб), практически пригодны методы классической электрофизиологии,

обеспечивающие дистантное измерение «биопотенциалов», генерируемых электрогенными структурами и органами. Для индикации таких полей используется высокочувствительная измерительная аппаратура (10 – 10 В) с достаточно высоким входным сопротивлением (10 – 10 Ом). В качестве датчиков поля используются шариковые хлорсеребряные и серебряные электроды, возможно использование электродов и другой конфигурации [18, 19]. Регистрация сигналов осуществляется прямым фотографированием с экрана электронно-лучевой трубки или на бумажной ленте самописца.

2.5.2. Методы измерения магнитных полей биообъектов

Поскольку в спектрах биопотенциалов были обнаружены высокочастотные компоненты [20], была предпринята попытка бесконтактной их регистрации радиотехническими методами. Измерительная установка, использованная в [21], назначалась для регистрации ЭМП по магнитной компоненте и состояла из антенн-датчиков поля и малошумящих усилителей, питание которых в целях лучшей помехозащитности осуществлялось от аккумуляторов. Входные каскады усилителей были настроены по данным [20] на 3 и 150 кГц и имели чувствительность порядка 0,1 – 0,2 мкВ. Измерения проводили в экранированной камере, однако такой метод оказался неперспективным, так как уровень сигнала на этих частотах был сравним с уровнем шума. Внимание исследователей было привлечено к регистрации ЭМП организмов в более низкочастотном диапазоне.

В настоящее время методы индикации магнитного поля возбужденных изолированных структур (нерва, сердца) и целостных организмов подразделяются на два основных класса: индуктивные методы и методы, основанные на использовании эффекта сверхпроводимости.

Регистрация электромагнитного поля возбужденных изолированных структур при помощи многовитковых индукционных катушек осуществлена рядом экспериментаторов [22 – 29]. Индукционные катушки, использованные ими, отличались наличием или отсутствием ферритовых сердечников, электростатических экранов и числом витков. В опытах [29] по регистрации полей нерва использовались катушки размерами 2 × 6 × 3 мм, содержащие по 3000 витков каждая. Сигналы, поступающие с датчиков, усиливались высокочувствитель-

ными (порядка 10 В) усилителями и регистрировались на экране осциллографа, однако параметры использованного усилителя не были рассчитаны на индикацию импульсного сигнала (потенциала действия нерва). Методика, предложенная в работах [27, 28], позволяла осуществлять индикацию импульсной ЭДС (порядка 0 – 0,02 мкВ), наведенной в индукционной катушке в экранированной камере с высокой степенью защиты от внешних помех. Более совершенные индукционные методы применялись для индикации полей целостного организма (порядка 0,1 – 1 нТл) по градиентометрическому принципу с использованием одной индукционной катушки в камере при высокой степени экранировки [24 – 32].

Для повышения чувствительности индукционных методов необходимо увеличить число витков катушки, что приведет к резкому возрастанию размеров датчиков и уменьшению разрешающей способности установки. Попытки повысить чувствительность установки путем введения ферритовых сердечников и массивных наконечников не дали желаемого результата, так как сами по себе искажали распределение магнитного поля [30 – 32]. Однако однокатушечный метод позволяет обеспечить бóльшую чувствительность, чем двухкатушечный. Примером может служить индикация магнитного поля головного мозга человека – магнитоэнцефалограмма [31].

Сооружение более совершенных камер и разработка высокочувствительных к МП сверхпроводящих квантовых интерферометров позволили создать более совершенный метод индикации магнитного поля организмов, чувствительность которого ограничивалась лишь собственным шумом магнитометра (порядка 0,1 нТл), намного более низким, чем шумы приборов другого типа [31, 32]. Однако этот метод не может полностью удовлетворить исследователей, поскольку требует высокой степени экранировки от внешних помех (что трудно выполнить технически), сложной усилительной и криогенной аппаратуры, а также необходимости жестко ориентировать магнитометр относительно вектора напряженности магнитного поля Земли.

Таким образом, к настоящему времени для измерения электрической компоненты ЭМП наиболее приемлемы используемые в технике электрометрии методы, обеспечивающие высокое (порядка 10^{10} – 10^{16} Ом) входное сопротивление и достаточную чувствительность в полосе ча-

стот от 0 до 10^6 Гц. Для измерения магнитной компоненты ЭМП оптимальным является градиентометрический метод, использующий датчики с оптической накачкой в парах цезия [33], как наиболее эффективный и не требующий сооружения экранирующих камер и сложной криогенной техники.

Библиографические ссылки

1. Burr H., Maurc A. Electrostatic fields of the soiatio nerve in the frog // YaleJ. Biol. Med., 1949. P. 21.

2. О происхождении внешнего электрического поля, регистрируемого вблизи человека и животных / У. С. Валеев [и др.] // Украинский физиологический журнал. 1973. Т. 19. № 1. С. 99 – 103.

3. Валеев У. С., Торнуев Ю. В., Ракитянский Д. Ф. К вопросу об электрическом поле нерва // Биофизика. 1970. Т. 15. № 4. С. 652 – 656.

4. Гуляев И. П., Заботин В. И., Шлиппенбах Н. Я. Электроаурограмма нерва, мышцы и сердца лягушки, сердца и мускулатуры человека // Доклады АН СССР. 1968. Т. 180. № 6. С. 1064.

5. *Они же*. Электроаурограммы человека и животных // Нервная система. Л. : Изд-во ЛГУ, 1968. Вып. 9. С. 159 – 172.

6. Ауорограмма одиночного аксона рецептора растяжения речного рака / И. П. Гуляев [и др.] // Доклады АН СССР. 1972. Т. 207. № 3. С. 750 – 752.

7. *Они же*. Ауральное поле изолированного нерва, мышцы // Биофизика. 1974. Т. 19. № 2. С. 290 – 294.

8. Торнуев Ю. В. Дистантная регистрация низкочастотных электрических полей организма // Физические методы и вопросы метрологии биомедицинских измерений. М., 1978. С. 36.

9. Торнуев Ю. В., Собакин М. А. Регистрация электрических полей биологических объектов // Материалы I съезда ВНМТС. М., 1975. Т. 1. С. 150.

10. Торнуев Ю. В. О происхождении внешнего электрического поля возбужденного изолированного нерва в воздухе // Физиологический журнал СССР им. И. М. Сеченова. 1972. Т. 58. № 9. С. 1385 – 1390.

11. Филякин Б. Ф. Регистрация электрического поля вблизи человека для оценки электрических и механических проявлений деятельности сердца : автореф. дис. ... канд. техн. наук. М. : АМН СССР, 1973. 16 с.

12. Филякин Б. Ф. Измерение параметров ближней зоны электромагнитного поля сердца для оценки электрической активности сердца // *Материалы науч.-техн. конф. Воронеж : Изд-во Воронеж. политехн. ин-та, 1972. С. 217 – 219.*

13. Вылегжанин О. И. Электрические электроды для регистрации электрокардиограммы // *Физические методы и вопросы метрологии биомедицинских измерений. М., 1972. С. 41 – 43.*

14. Лобанова Е. С. Разработка высокочувствительной аппаратуры для измерения электрической напряженности поля биообъекта // *Физические методы и вопросы метрологии биомедицинских измерений. М., 1972. С. 101.*

15. Pat. (USA) 3555529. Apparatus for measuring electrical field radiation from living bodies / Aut. Brown G. et al. Field, 12.01.71.

16. Валеев У. С., Ковалев Д. П., Торнуев Ю. В. Синхронный емкостный накопитель для измерения инфранизкочастотных полей в воздухе // *Автометрия. 1969. № 4. С. 127 – 130.*

17. Валеев У. С. Измерение в воздухе электромагнитных полей инфразвуковых частот синхронным накоплением зарядов // *Автометрия. 1967. Т. 104. № 1. С. 125 – 128.*

18. Барон В. Д., Михайленко Н. А. О структуре электрического разряда морской лисицы // *Биофизика. 1974. Т. 22. В 2. С. 369 – 371.*

19. Барон В. Д., Протасов В. Р., Саблин-Яворский А. Д. О квазипостоянном электрическом поле вблизи рыб // *Доклады АН СССР, 1978. Т. 258. № 20. С. 718 – 721.*

20. Volker W. K., Candib W. Detection and analysis of high frequency signals from muscular tissues with ultra-low noise amplifier // *IRE Intern. Conf. RLC. 9. 1960.*

21. Малахов А. Н., Максимов А. С., Нефедов Ю. Я. Об электромагнитной гипотезе биологической связи // *Бионика. М. : Наука, 1965. С. 297.*

22. Краюхин Б. В. Возможна ли электроиндукция в тканях живого организма? // *Памяти А. В. Леонтовича. Киев : Изд-во АН УССР, 1948. С. 37.*

23. Метод регистрации магнитного поля сердца – магнитокардиография / Ю. Д. Сафонов [и др.] // *Бюллетень экспериментальной биологии и медицины. 1967. Т. 64. № 9. С. 47 – 51.*

24. Baule G. M., McPree R. Detection of the magnetic field of the heart // Amer. HeartJ. 1963. Vol. 66. № 95. P. 639.

25. Хведелидзе М. А., Думбадзе С. И., Суртуладзе Т. Г. О биоэлектромагнитном поле // Бионика. М. : Наука, 1965. С. 302.

26. Further observation of the magnetic fields accompanying nerve transmission and tetanus / Generally J. A. [et al.] // J. Fsyohol. 1962. Vol. 54. P. 201.

27. Generally J. A., Holfer N. I., Classcook W. R. Magnetic fields accompanying transmission of nerve impulses in the frog sciatic // J. Psychol. 1961. Vol. 2. P. 52.

28. The magnetocardiogramm in cardiac disordereu / I. Saarinen [et al.] // Cardiovasc. Res. 1974. Vol. S. № 6. P. 820 – 834.

29. Seipel I., Morrow R. D. The magnetic field accompanying neuronal activity of nervous system // J. Wash. Acad. Soi. 1960. Vol. 50. № 6. P. 1 – 4.

30. Cohen D. Magnetic field around the torso: production by electrical activity of the human heart // Science. 1967. Vol. 156. № 3775. P. 652.

31. Cohen D. Magnetoencephalography: evidence of magnetic fields around the head produced by alphe-rhythm currents // Science. 1963. Vol. 161. № 3843. P. 734.

32. Cohen D., Gilber E. Magnetonography. Magnetic field'around the human body produced by askeletal muscular // Appl. Phys. Lett. 1972. Vol. 21. № 3. P. 114 – 116.

33. О регистрации магнитных полей человека / М. Н. Ливанов [и др.] // Доклады АН СССР. 1978. Т. 238. № 1. С. 253 – 256.

2.6. Методы измерения электрических параметров клеток и их использование в биологии и медицине

Основы электрофизики клетки были заложены в 30-е годы XX века. Однако в последнее время интерес к этой области биофизики вновь возрастает. Связано это с появлением современных автоматизированных приборов для измерения электрических параметров клеток и развитием новых подходов к изучению и интерпретации результатов электрофизических измерений. Для современного этапа изучения электрофизики клетки характерен рост числа прикладных исследований и комплексный подход в изучении нескольких электрических параметров

клеток с привлечением различных методов. Основное преимущество электрофизического исследования клеток состоит в том, что его можно проводить достаточно быстро, не нарушая целостности клеток, при минимальном искажающем влиянии внешних факторов. Все это выгодно отличает электрофизические методы исследования от ряда других, например химических.

Исследование электрических параметров клеток дает возможность изучать структуру и свойства клеточной поверхности и внутриклеточного содержимого, механизмы проницаемости клеточных мембран, характеризовать физиологическое состояние клеток в процессе их развития или повреждения в результате внешних, в том числе и медикаментозных, воздействий. Наиболее часто используются следующие электрические параметры клеток: электрокинетический потенциал, электрофоретическая подвижность, электрическая поляризуемость, удельная электропроводность, диэлектрическая проницаемость и поверхностный заряд.

Практическое использование электрокинетических исследований клеток крови определяется большой биологической значимостью заряда клетки как характеристики свойств и структуры клеточной поверхности. Именно они определяют регуляцию транспорта веществ через поверхность и взаимодействие клеток между собой и с внешней средой [1, 2]. Агрегативная устойчивость клеток, реология крови и деформируемость эритроцитов, пространственно-структурная организация движущейся крови в крупных кровеносных сосудах и микроциркуляция в капиллярах, оценка зрелости клеток и фаз клеточного цикла, изменение клеточной поверхности разных возрастных групп эритроцитов, взаимодействие антигенов и антител на клеточных поверхностях – во всех этих областях важную роль играют электрокинетические характеристики клеток, связанные с их биологическими функциями.

Использование в клинической практике электрокинетических характеристик клеток крови основано на том, что для поддержания оптимального состояния гемостаза организма форменные элементы крови должны обладать устойчивым зарядом [3]. Изменение его служит интегральным показателем сложных патологических изменений кровообращения и биохимических сдвигов в организме.

В электрокинетических измерениях экспериментально определяемым параметром является скорость движения клетки в суспензии под

действием постоянного однородного электрического поля, по которой рассчитывают электрокинетический потенциал и плотность поверхностного заряда исследуемых клеток. Общепринято использовать нормированную скорость – отношение скорости движения клетки в электрическом поле к его напряженности – электрофоретическую подвижность (ЭФП). При оформлении результата электрокинетических измерений целесообразно пользоваться экспериментально полученной гистограммой с подобранным шагом по подвижностям, а в случае сравнительно гомогенной суспензии – средним значением ЭФП и дисперсией. Для гетерогенных суспензий, состоящих из нескольких субпопуляций клеток, среднее значение ЭФП серии измерений теряет смысл.

Перечислим наиболее распространенные в настоящее время методы измерения ЭФП: микроэлектрофорез, метод препаративного разделения по зарядам частиц гетерогенной суспензии в свободном потоке [4–7] и метод лазерной доплеровской спектроскопии [1]. Во всех перечисленных методах измеряется ЭФП клеток, разница между ними заключается лишь в способах регистрации.

В работе [8] описана микроэлектрофоретическая полуавтоматическая установка, в которой вместо традиционной методики измерения времени прохождения клеткой заданного пути определяется расстояние, пройденное ею в электрическом поле за фиксированное время. Это позволяет повысить точность одного измерения и сократить общее число измерений при среднеквадратичной погрешности не более 3 %. Следует также отметить автоматическую установку [9] для микроэлектрофореза, где используется гелий-неоновый лазер и вращающийся с заданной скоростью диск с радиальными щелями, через которые отраженный от движущихся клеток свет лазера попадает на фотодетектор. Сигнал с детектора поступает на электронное устройство, преобразующее сдвиг частоты на величину ЭФП клеток. Этот метод измерения ЭФП более чувствителен, чем метод доплеровской спектроскопии и позволяет определить ЭФП клеток с высокой точностью за короткий промежуток времени.

В настоящее время известны две промышленные установки для микроэлектрофореза: цитоферометр «Оптон» и «Пармоквант». Цитоферометр – компактный и простой в обращении прибор. Но ручной режим работы делает измерения очень трудоемкими и длительными с по-

грешностью более 3 %. «Пармоквант» [10] – полностью автоматизированный прибор для микроэлектрофореза. В нем предусмотрены три режима работы: ручной, полуавтоматический и автоматический; используются разные варианты обработки результатов измерений на ЭВМ и вывод результатов на печатающее устройство. Полная автоматизация ввода пробы измерений к обработке результатов позволяет быстро (ЭФП ста клеток измеряется за несколько минут) и с высокой точностью (1 %) получить результаты в виде таблицы и гистограммы с расчетом основных значений (среднего значения ЭФП дисперсии, числа измеренных клеток).

Принцип метода препаративного разделения по зарядам [4 – 6] заключается в том, что гетерогенная суспензия, подлежащая разделению, вводится тонкой струйкой в равномерно текущий поток жидкости, поперек которого приложено электрическое поле. Вследствие различного смещения клеток под действием поля исходная струя разделяется на фракции, которые отбираются коллектором в разные пробирки. Этот метод позволяет быстро (десятки – сотни секунд) без больших повреждений препаративно разделить по зарядам разные биологические суспензии – клеточные, субклеточные, молекулярные. Разрешающая способность этого метода несколько меньше, чем метода электрофореза на поддерживающих средах, но он незаменим в тех случаях, когда необходима высокая скорость разделения.

С середины 1970-х годов несколько фирм ФРГ (Бендер и Хобейн, Лабомед, ДЕСАГА, Биотроник) и США (Бриикман Инструментс) освоили промышленный выпуск приборов для рассматриваемого метода препаративного разделения электрофорезом в свободном потоке (модели Эльфор-5, ФФ-48). Эти приборы имеют прямоугольную камеру, эффективное термостатирование, инжектор для равномерного ввода суспензии в камеру разделения и некоторые непринципиальные технические различия. Разрешающая способность приборов по измерению подвижностей (порядка 10^{-9} м²/(с · В)) и производительность (1 – 3 мл/ч) всех устройств примерно одинакова. В последней модели прибора «Эльфор II» есть блок оптической регистрации фракций в процессе разделения. Результаты оптического анализа обрабатываются и выводятся на печатающее устройство в виде гистограммы.

При измерении электрокинетических характеристик клеток крови следует иметь в виду, что вещества, добавляемые в кровь для

предотвращения ее коагуляции (антикоагулянты), могут существенно исказить результаты измерений. В частности, предынкубация с гепарином приводит к необратимому увеличению ЭФП клеток крови. Эффект действия гепарина пропорционален его концентрации и характеризуется разной степенью влияния на субпопуляцию клеток в гетерогенной суспензии [11]. Предынкубация форменных элементов крови в течение 15 мин с 1%-ным раствором цитрата натрия, 0,135%-ным раствором оксалата натрия, 0,25 и 0,5%-ными растворами этилендиаминтетрауксусной кислоты (ЭДТА) не оказывает необратимого воздействия на величину заряда клеточной поверхности, следовательно, при электрокинетических измерениях эти вещества в данных концентрациях могут быть использованы в качестве антикоагулянтов. При длительной работе с клетками крови ЭФП эритроцитов уменьшается [12]. С целью воспроизведения результатов измерений ЭФП клеток крови их неоднократно «отмывают» центрифугированием и затем помещают в известный буфер. Эти процедуры могут изменить поверхность клеток и тоже исказить результаты измерений. Так, ЭФП эритроцитов, «отмытых» 0,85%-ным раствором хлористого натрия, увеличивается [13], однако они гибнут быстрее (особенно пятикратно «отмытые» эритроциты), чем в плазме крови.

В последние годы было опубликовано несколько новых способов и устройств по изучению электрокинетических характеристик клеток и использованию этих характеристик для препаративного разделения.

В работах [14, 15] для измерения ЭФП эритроцитов использован метод флуоресцентных зондов, который заключается в одновременной регистрации объема клеток и интенсивности флуоресценции после добавления в суспензию поликатионов, окрашенных флуоресцеин-изотиоцианатом. Оказалось, что средняя интенсивность флуоресценции в 1 мкм^2 поверхности клетки пропорциональна ЭФП эритроцитов и является мерой плотности поверхностных отрицательных зарядов клетки. С целью изучения распределения плотности поверхностных отрицательных зарядов в работе [16] использован метод микрофотографий, полученных с помощью электронной микроскопии. Для увеличения разницы в ЭФП отдельных групп клеток в гетерогенной суспензии поверхность клеток модифицируют путем добавления в суспензию микросфер [17]. Для получения узкоспецифической модифика-

ции только одного вида клеток микросферы предварительно иммунологически сенсibilизируют, т. е. намного увеличивают их сродство с клетками определенного вида. После такой обработки авторам удалось электрофоретически разделить два вида эритроцитов (человеческие и индюшиные), которые до обработки имели близкие значения электрофоретической подвижности.

Интересен метод выделения эритроцитов из цельной крови путем использования магнитного поля [18]. Сущность его заключается в том, что при пропускании цельной крови через фильтр (проволочную сетку, помещенную между полюсами магнита) при определенных скоростях потока и напряженности МП все эритроциты задерживаются, а лейкоциты и тромбоциты проходят через сетку. Однако живые и неживые лимфоциты периферической крови в неоднородном поле ведут себя по-разному: живые выталкиваются из области сильного магнитного поля, а неживые перемещаются по градиенту его напряженности [19]. Исходя из этого, методика выделения эритроцитов магнитным путем нуждается в некотором уточнении.

Измерение ЭФП клеток находит в настоящее время применение при изучении нормальных и патологических изменений в организме при различных внешних воздействиях и заболеваниях: иммунологических, онкологических, сердечно-сосудистых и др. [20 – 24].

В иммунологических и гистологических исследованиях на клетках животных использовался проточный электрофорез [22]. Значительная часть работ [21, 25] посвящена клиническому использованию клеточного электрофореза в онкологии. Отмечено изменение ЭФП тромбоцитов в начальной стадии инфаркта миокарда и при артериальном тромбозе в ограниченный период времени (для инфаркта – в течение 10 ч, для тромбоза – в течение 24 ч) [26]. Дальнейшее изменение ЭФП проследить не удалось, так как использование в лечебной практике антикоагулянтов (в особенности гепарина) приводит к восстановлению нормального значения ЭФП. Стрессовые состояния снижают ЭФП, что в значительной степени сказывается на повышении агглютинации форменных элементов крови [27]. Любые неблагоприятные воздействия на эритроциты ведут к разрушению менее стойких стареющих эритроцитов, обладающих меньшим зарядом. Установлено, что старение эритроцитов связано с увеличением положительно заряженных групп на

мембране [28, 29]. Исследование распределения эритроцитов по фракциям при препаративном разделении проточным электрофорезом крови больных пароксимальной ночной гемоглобинурией и гипопластической анемией показало, что среднее значение ЭФП эритроцитов у больных ниже, чем у здоровых [30].

Обширную информацию о электрофизических свойствах клеток дают методы диэлектрической спектроскопии, предназначенные для измерения диэлектрической проницаемости и удельной электропроводности клеток. В частности, изучение частотной зависимости этих электрических параметров позволяет определить свойства клеточных мембран и цитоплазмы в нативном состоянии [31, 32].

Наиболее широкое применение при измерении диэлектрических характеристик суспензий нашли мостовые методы [33]. Следует отметить, что мосты с индуктивно связанными плечами (трансформаторные мосты) обеспечивают более высокую чувствительность и простую защиту от паразитных связей [34]. Основная трудность при мостовых измерениях в мегагерцовом диапазоне заключается в выборе образцовой меры активных сопротивлений, так как на этих частотах необходимо использовать безреактивные резисторы с минимальными значениями паразитных емкостей и сложную кинематическую схему переключения. Одним из авторов обзора уравнивание моста по активной составляющей проводилось путем изменения электропроводности жидкости в ячейке, включенной в эталонное плечо моста. В мегагерцовом диапазоне частот применяют также методы, основанные на использовании резонансных контуров. В качестве примера можно привести методы коммутируемого [35] и регенерированного [36] контуров. Применяют также метод синхронного детектирования, который позволяет выделить активную и реактивную составляющие сигнала, несущего информацию о параметрах объекта [37]. Подробное описание различных измерительных ячеек для диэлектрических измерений дано в обзоре [38]. Различные аспекты интерпретации диэлектрических измерений обобщены в монографии [39].

Применение диэлектрической спектроскопии в медицине определяется возможностью исследования с ее помощью клеточной проницаемости, содержания и подвижности белков, патологических процессов в органах и тканях, а также действия на ткани повреждающих факторов

[4, 27, 31, 40, 41]. Однако, несмотря на большие потенциальные возможности метода диэлектрической спектроскопии, он все еще не нашел широкого применения на практике вследствие отсутствия специальной аппаратуры и неоднозначности интерпретации результатов измерений. За последние годы появился ряд работ, содержащих анализ результатов диэлектрических измерений на основе рассмотрения многооболочечной электрофоретической модели клетки [42]. Дальнейшее развитие данного направления повысит значимость диэлектрических измерений в научных и прикладных исследованиях.

В работах [43] в широком диапазоне частот от 30 Гц до 30 мГц исследована частотная дисперсия диэлектрической проницаемости и электропроводности крови и показаны возможности практического применения диэлектрической спектроскопии в медицине. Анализ данных, полученных авторами указанных выше работ, позволил сделать вывод о том, что дисперсия диэлектрических параметров крови в радиодиапазоне хорошо объясняется мембранной моделью [44 – 47], основанной на теории Максвелла – Вагнера. Различного рода отклонения в диэлектрических спектрах от нормы, наблюдающиеся при различных воздействиях на кровь, объяснены в рамках этой модели либо изменением проницаемости клеточной мембраны (изменение удельной электропроводности при постоянной диэлектрической проницаемости), либо агрегированием клеток (изменение диэлектрической проницаемости при постоянной удельной электропроводности). Исследование диэлектрических спектров крови больных дернициозной анемией и полицитемией показало, что они отличаются от спектров нормальных клеток [48]. При анемии диэлектрическая проницаемость крови меньше, а удельная электропроводность больше нормальных значений. При полицитемии диэлектрическая проницаемость больше или равна норме, а удельная электропроводность гораздо меньше нормы. В целом авторы пришли к выводу, что диэлектрическая спектроскопия обеспечивает количественную диагностику некоторых параметров крови и позволяет исследовать как субмолекулярные (проницаемость мембран), так и молекулярные (дипольная поляризация белков) и надмолекулярные (образование сгустков) структурные процессы в крови.

Частотная дисперсия электрических свойств клеток может также исследоваться путем изучения электроориентации и диэлектрофореза

клеток, обусловленных взаимодействием электрического дипольного момента клеток с внешним электрическим полем. Действие ЭП заданной частоты приводит к ориентации продольной оси асимметричных клеток вдоль или поперек силовых линий поля (электроориентация), а также к направленному перемещению клеток в неоднородном электрическом поле и их осаждению на электродах (диэлектрофорез). Индуцированный дипольный момент суспензионных частиц, в том числе клеток, – новая и пока что недостаточно исследованная электроповерхностная характеристика частиц, важность изучения которой показана в работах [49 – 51]. Обычно рассчитывают не сам дипольный момент клеток, а их электрическую поляризуемость, равную отношению дипольного момента к напряженности электрического поля.

Ориентация клеток асимметричной формы в ЭП приводит к возникновению ряда электрооптических явлений, обусловленных оптической анизотропией суспензии ориентированных клеток. На основе этих явлений разработаны электрооптические методы анализа электрических и геометрических свойств клеток путем измерения светорассеяния, двулучепреломления или дихроизма клеточных суспензий [49]. При электрооптическом исследовании клеток непосредственно измеренным параметром будет величина электрооптического эффекта α , которую характеризуют безразмерным отношением [50]

$$\alpha = \frac{A_E - A_0}{A_0},$$

где A_0 , A_E – оптическое свойство суспензии в отсутствие и при наложении электрического поля.

В общем виде зависимость электрооптического эффекта от параметров клеток, поля и среды выражается соотношением

$$\alpha = \alpha_\infty F(p, \gamma, E, T),$$

где α_∞ – эффект при полной ориентации клеток, зависящий от их геометрических и оптических параметров; F – функция, характеризующая зависимость эффекта от постоянного дипольного момента клеток p , от их электрической поляризуемости γ , напряженности электрического поля E и абсолютной температуры среды T ; эта функция стремится к 1 при увеличении E . Подробный анализ функции F для различных электрооптических эффектов и ее связь с функцией распределения клеток по ориентациям выполнен в работах [49, 50].

К основным электрическим свойствам клеток, определяемым электрооптическими методами, относятся электрическая поляризуемость и постоянный дипольный момент.

Существует несколько независимых способов определения электрической поляризуемости клеток на основе электрооптических измерений.

1. Метод сравнения экспериментальной зависимости электрооптического эффекта от квадрата напряженности приложенного ЭП с теоретическими кривыми этой зависимости, вычисленными при различных отношениях постоянного и индуцированного моментов [52].

2. Метод с использованием нестационарных электрооптических эффектов. Используются два варианта измерений [50]. В первом из них определяют начальный наклон кривой нарастания эффекта и соотношение площадей, ограниченных кривыми нарастания и спада; во втором определяется минимальное значение напряженности ЭП, при котором нарушается начальная линейная зависимость. Приравняв энергию ориентации к энергии теплового движения, можно найти приближенное значение электрического момента.

3. Метод исследования частотной зависимости электрооптических эффектов, позволяющий различить постоянные и индуцированные дипольные моменты клеток. При этом используется тот факт, что клетки не могут ориентироваться под действием постоянного момента, при частоте поля во много раз больше собственной частоты вращения клеток они не будут следовать за изменением поля [50].

Наиболее часто используют комбинацию первого и третьего из упомянутых выше методов, а именно: по начальному линейному участку зависимости электрооптического эффекта от квадрата напряженности электрического поля на частотах, где вклад постоянного момента равен нулю, определяют поляризуемость частиц по формуле [53]

$$\gamma = \frac{4J_0}{F(k)} kT \left(\frac{\Delta\alpha}{\Delta E^2} \right)_0^{v=v_i},$$

где $J_0 = \frac{\sin(2k)}{k} - \left(\frac{\sin k}{k} \right)^2$; $F(k) = \frac{J_0}{3} + \frac{\sin 2k}{4k^3} - \frac{l_k}{2k^2}$;

$$k = k' l_b \sin \left(\frac{\theta}{2} \right); \quad k' = \frac{2\pi}{\lambda}; \quad \sin x = \int_0^x \frac{\sin t}{t} dt;$$

где l_k – длина клетки, аппроксимируемой цилиндром; ν_i – частота поля, на которой измеряется эффект, l_b – длина волны света в растворе; θ – угол наблюдения светорассеяния; $\left(\frac{\Delta\alpha}{\Delta E^2}\right)_{\nu=\nu_i}^0$ – наклон кривой при $E \rightarrow 0$ и частоте ν_i ; k – постоянная Больцмана.

Для таких больших частиц, как клетки, данные о постоянном моменте весьма противоречивы. Поэтому авторы работы [49] делают вывод о том, что к изучению постоянного дипольного момента можно приступать только после накопления достаточной информации об электрической поляризуемости частиц, так как только ее можно измерять в чистом виде.

Предлагается ввести понятие электрической поляризуемости на единицу длины, на единицу поверхности клетки или использовать некоторую функцию, которая зависит от соотношения осей клетки [49]. В качестве другой возможности оценки свойств клетки предлагается вычислять электрический заряд [49] или эффективные диэлектрическую проницаемость и удельную электропроводность клеток [54 – 57] по их поляризуемости.

Электроориентацию и диэлектрофорез таких крупных частиц, как клетки, можно изучать путем наблюдения под микроскопом за поведением клеток в поле [4, 57]. В турбодиметрической методике регистрации электроориентации и диэлектрического осаждения клеток [4] объединяются четыре существовавших ранее независимо друг от друга направления исследований электрических свойств клеток – изучение электроориентации, диэлектрофореза, электрооптических и диэлектрических свойств клеток – в одно направление, обеспечивающее более полную биофизическую информацию о клетках с перспективой быстрого и надежного контроля их электрических параметров.

Для реализации турбодиметрического метода используется измерительная ячейка [58]. Эффекты электроориентации и диэлектрофореза оцениваются по величине относительного изменения оптической плотности суспензии. Надежное различие этих эффектов, когда первый из них вызывает увеличение, а второй – уменьшение оптической плотности суспензии достигается путем пропускания светового пучка ортогонально плоскости решетчатых электродов ячейки. Разделение этих эффектов во времени осуществляется соответ-

ствующим выбором величины прикладываемого к электродам напряжения. Пути оптимизации электродной системы и геометрии измерительной ячейки рассматриваются в работе [59]. Наибольший практический интерес представляет исследование частотной зависимости электроориентационного и диэлектрофоретического спектров.

В ряде случаев для надежной регистрации электроориентации возникает необходимость использовать высокие концентрации клеток в суспензии и повышенные напряженности ЭП, например, при измерении клеток с малой асимметрией формы и низкой величиной электрической поляризуемости. При этом следует учитывать, что эти меры могут привести к изменению процесса ориентации клеток в поле. С ростом концентрации суспензии уменьшается расстояние между клетками и наблюдается усиление взаимного влияния наведенных электрических дипольных моментов клеток друг на друга и как следствие увеличение агрегации и агрегации клеток [60]. Увеличение напряженности ЭП может привести к изменению формы клеток [61], проницаемости цитоплазматической мембраны [62], а в случае применения неоднородного ЭП – к наложению эффектов диэлектрофоретического осаждения и электроориентации при их регистрации турбодиметрическим методом. Использование способа регистрации электроориентации, основной особенностью которого является одновременное определение изменений оптической плотности суспензии при двух взаимно перпендикулярных по отношению к направлению светового пучка ориентациях клеток в неоднородном ЭП, позволяет избежать отмеченных выше нежелательных эффектов. Для этой цели применяют двухлучевой фотометр и две измерительные ячейки, конструкция которых аналогична описанной выше. Электродная система ячеек подключается к генератору таким образом, что в одной ячейке силовые линии электрического поля направлены вдоль светового потока, а в другой – поперек направления светового потока. Когда в первой ячейке происходит продольная по отношению к направлению света ориентация клеток, что вызывает увеличение потерь световой энергии и повышение оптической плотности суспензии, во второй ячейке наблюдаются поперечная ориентация клеток и уменьшение оптической плотности суспензии. В результате алгебраического суммирования сигналов от фотоприемников получают вдвое бóльший сигнал, чем при использовании

одной измерительной ячейки. При этом значительно увеличивается отношение сигнала к шуму, обусловленного флуктуацией интенсивности источника света, а также происходит компенсация влияния на измерения диэлектрофоретического осаждения клеток из-за однонаправленности соответствующих ему изменений оптической плотности в обеих ячейках. Увеличение точности, чувствительности и информативности электроориентационных измерений с применением двухлучевого турбодиметрического метода регистрации позволяют проводить исследования при низких концентрациях клеток в суспензии и при меньшем эффективном напряжении на электродах ячейки.

Следует отметить, что при исследовании электроориентации и диэлектрофореза клеток используются среды с достаточно низкой электропроводностью (менее $0,1 \text{ См} \cdot \text{м}^{-1}$). Дело в том, что при малой электропроводности не только уменьшаются выделение джоулева тепла и влияние поляризации электродов – факторов, вызывающих нежелательное конвекционное движение жидкости в объеме измерительной ячейки, но и обеспечивается достижение бóльшей электрической поляризуемости клеток, так как значительная ее часть имеет межфазную природу и уменьшается с ростом электропроводности.

Таким образом, на основании приведенных выше данных по исследованию электрофоретической подвижности, диэлектрической проницаемости, удельной электропроводности и электрической поляризуемости клеток крови с применением различных методов измерения можно сделать вывод о том, что исследование электрических характеристик клеток представляет большой общебиологический и практический интерес для изучения общих закономерностей функционирования организма, диагностики заболеваний, эффективности медикаментозного лечения. Исследование электрокинетических свойств клеток крови находит в настоящее время широкое применение при изучении нормальных и патологических изменений в организме. В последние годы интенсивно развиваются новые подходы к изучению и интерпретации результатов электрофизических измерений на основе диэлектрических и оптических методов. Первые результаты по их практическому применению для медицинских целей свидетельствуют о большой перспективности этих методов для изучения структуры и физиологического состояния клеток.

Библиографические ссылки

1. Свенсон К., Уэбстер П. Клетка. М. : Мир, 1980. 303 с.
2. Зингбуш П. Молекулярная и клеточная биология. М. : Мир, 1982. Т. 2. 438 с.
3. Харамоненко С. С., Ракитянская А. А. Электрофорез клеток крови в норме и патологии. Минск : Беларусь, 1974. 144 с.
4. Разделение клеточных суспензий / А. И. Мирошников [и др.]. М. : Наука, 1977. 168 с.
5. Methods of cell separation. Ed. Catsimpoolas IT // Plenum. 1977, Vol. 1. P. 376 ; 1979. Vol. 2. P. 316 ; 1960. Vol. 3. P. 203.
6. Мирошников А. И., Фомченков В. М., Иванов А. Ю. Метод и аппаратура электрофореза в свободном потоке // Методы фракционирования ядерных клеток крови и костного мозга. М. : Ин-т гематологии и переливания крови, 1980. С. 34 – 63.
7. Uzgirisfi E. Laser Dopplernethods in electrophoresis // Pror. Surface Sci. 1981. Т. 81. Vol. 10. P. 52 – 164.
8. Установка для измерения электрофоретической подвижности клеток / А. Ю. Иванов [и др.] // Проблемы гематологии и переливания крови. 1979. № 3. С. 52 – 55.
9. A new automatic methods for measuring cell electrophoretic mobility / H. Shlmlzu [et al.] // Froc. Japan Acad. 1979. Vol. 55B. P. 418 – 423.
10. Шеппе Г., Шюгт В., Унтер Р. Результаты испытаний автоматизированного микроскопа для электрофореза частиц «Пармоквант» // Йенское обозрение. 1978. № 5/6. С. 232 – 235.
11. Темнов А. В., Мирошников А. И., Тищенко В. В. Влияние антикоагулянтов на электрокинетические характеристики клеток // Проблемы гематологии и переливания крови. 1982. № 1. С. 29 – 34.
12. Streif F., Stoltz J. F., Vigneron C. Rev. Faraday. 1971. Vol. 14. P. 335 – 339.
13. Larcан A., Stoltz J. F. Biorheology. 1973. Vol. 10. P. 189 – 205.
14. Valet G., Bamberger S., Hofman H. Flay cytometry as a new method for the measurement of electrophoretic mobility of erythrocytes .using membrane charge staining by fluorescelnated polycatlon // J. Hist o chem. and Cytochem. 1979. Vol. 27. P. 342 – 349.

15. Морозова Г. И., Добрецов Г. Е. Регистрация изменения поверхностного заряда эритроцитов и модельных мембран с помощью флуоресцентного зонда // Биофизика. 1982. Т. 26. Вып. 2. С. 329 – 330.
16. Negative charge distribution and density on the surface of oxygenated normal and sickle red cells / L. J. Clark [et. al.] // Blood. 1981. Vol. 57. P. 675 – 678.
17. Rembaum A., Dreyer W. J. Immunomicrospheres: reagents for cell labeling and separation // Science. 1980. № 19. Vol. 208. P. 364 – 368.
18. Paul S., Roath S., Melvill D. Differential blood separation using a high gradient magnetic field // Brit. J. Hematol. 1978. Vol. 38. P. 273 – 280.
19. Магнитные свойства и магнитная седиментация лимфоцитов / Ю. А. Плывинь [и др.] // Лейкозология. Рига : Зинатне, 1979. С. 50 – 54.
20. Чижевский А. Л. Электрические и магнитные свойства эритроцитов // Киев : Наук. думка, 1975. 93 с.
21. Sherbet G. V. The biophysical characterization of the cell surface // Academic Press, 1978. 287 p.
22. Клеточный электрофорез – его теоретическое и практическое значение / Г. И. Ковинец [и др.] // Проблема гематологии и переливания крови. 1979. Т. 24. № 2. С. 40 – 44.
23. Трешинский А. И., Мицук И. И. Электрические свойства крови // Анестезиология и реаниматология. 1981. Т. 4. С. 17 – 21.
24. Левтов В. А., Регирер С. А., Шадрин Н. Х. Реология крови. М. : Медицина, 1982. 270 с.
25. Йенсен Г. Л. К вопросу об основах и значении измерения ЭФП в диагностике злокачественных опухолей // Йенское обозрение. 1978. № 5/6. С. 236 – 240.
26. Larcen A., Stoltz G. F., Voiry A. M. Problemes de Eeanimation // SPBJ, Paris. 1971. Vol. 1. P. 911 – 918.
27. Губанов Н. И., Утепбергенов А. А. Медицинская биофизика. М. : Медицина, 1978. 335 с.
28. Крылов А. А. Клинико-экспериментальные материалы // Патологическая физиология и экспериментальная терапия. М. : Медицина, 1962. С. 46 – 50.

29. Kordth V. J., Seamen G. V. F. Ked cell aging. U. Anomalous electrophoretic properties of neuraminidase treated human erythrocytes // J. Cell. Physiol. 1978. Vol. 95. P. 209 – 220.

30. Препаративное разделение эритроцитов крови больных пароксимальной ночной гемоглобинурией и гипопластической анемией / Г. И. Козинец [и др.] // Лабораторное дело. 1981. № 10. С. 595 – 598.

31. Шван Г. Электроскопия биологических веществ в поле переменного тока // Электроника и кибернетика в биологии и медицине. М. : Изд-во иностр. лит., 1963. С. 71 – 108.

32. Carstensen B. L., Marquis S. S. Dielectric and electrochemical properties of bacterial cells // Spores. 1975. Vol. 6. P. 563 – 571.

33. Эшвхейн С. Л. Измерение характеристик конденсаторов. М. : Энергия, 1965. 236 с.

34. Трансформаторные измерительные мосты / Ф. Б. Гриневиц [и др.]. М. : Энергия, 1970. 150 с.

35. Александров Ю. А, Барабанов Н. Н., Селиверстова В. М. Установка для измерения диэлектрической проницаемости сред с большой электропроводностью // Заводская лаборатория. 1974. № 3. С. 279 – 280.

36. Михайленко А. А. Повышение точности измерений резонансным методом диэлектрической проницаемости веществ, обладающих большой проводимостью // Измерительная техника. 1974. № 8. С. 50 – 53.

37. Полянский А. С., Машников Л. Б., Гальперин Л. Н. Автоматический диэлектрический спектрометр // Приборы и техника эксперимента. 1976. № 1. С. 130 – 135.

38. Бондаренко Н. П. Измерительные ячейки для исследования электрических свойств жидких диэлектриков // Труды Ленинградского политехнического института им. Н. И. Калинина. 1966. № 276. С. 70 – 77.

39. Челидзе Т. Л., Деревянко А. И., Куриленко О. Д. Электрическая спектроскопия гетерогенных систем. Киев : Наук. думка, 1977. 230 с.

40. Седунов Б. И., Фрак-Каменецкий Д. А. Диэлектрическая проницаемость биологических объектов // Успехи физических наук. 1963. № 4. С. 617 – 639.

41. Андреев В. С. Кондуктометрические методы и приборы в биологии и медицине. М. : Медицина, 1973. 335с.

42. Asami K., Hanai T., Koizumi N. Dielectric analysis of b'.ooli sus-
pensions in the light of the theory of interfacial polarizability // *Blophys. J.*
1980. Vol. 31. P. 215 – 228.
43. Диэлектрическая спектроскопия крови. Диэлектрические спек-
тры нормальной крови человека / Т. Л. Челидзе [и др.] // *Биофизика.*
1973. Т. 18. С. 932 – 935.
44. Челидзе Т. Л. Диэлектрическая спектроскопия крови. Диэлектри-
ческие спектры эритроцитов в интервале 15 – 75 °С и замечания о темпе-
ратурном оптимуме гомеостаза // *Биофизика.* 1974. Т. 19. С. 96 – 99.
45. Челидзе Т. Л., Кикнадзе В. Д., Кевлишвили Г. Б. Диэлектриче-
ская спектроскопия крови. Диэлектрические спектры крови при физико-
химических воздействиях // *Биофизика.* 1974. Т. 19. С. 479 – 483.
46. Челидзе Т. Л. К механизму альфа-дисперсии диэлектрической
проницаемости крови // *Биофизика.* 1974. Т. 19. С. 1100 – 1101.
47. Электропроводность цитоплазмы эритроцитов / Т. Л. Челидзе
[и др.] // *Биофизика.* 1980. Т. 25. С. 1023 – 1026.
48. Электрические свойства крови при пернициозной анемии и по-
лицитемии / И. Л. Яковлев [и др.] // *Материалы 27-й научной сессии*
Грузинского НИИ гематологии и переливания крови. Тбилиси, 1975.
С. 405 – 407.
49. Электрооптика коллоидов / С. Р. Стоилов [и др.]. Киев : Наук.
думка, 1977. 200 с.
50. Stoylov S. P. Colloid electrooptics electrically induced optical phe-
nomena in disperse systems // *Adv. Coll. Interf. Boi.* 1971. Vol. 3. P. 45 – 110.
51. Jennings B. S., Morris V. J. Light soattering by bacteria. 2. Size and
electrical properties of S.coli // *J. Coli. Int. Sci.* 1974. Vol. 49. P. 89 – 97.
52. Yosldolca K., Watanabe H. Dielectric properties of proteins. 2.
Electric birefringence and diohrolsm // *Physical Principles and Techniques of*
Protein Chemistry. New York : Acad. Press, 1969. 367 p.
53. Wippler C. Diffusion-dela lumlere des solutions macromoleculaires //
J. Chlm. Phys. 1956. Vol. 53. P. 328 – 345.
54. Овчаренко Ф. Д., Маляренко В. В., Шилов В. Н. Исследование
электропроводности и электроориентации коллоидных частиц // *Колло-
идный журнал.* 1977. Т. 39. С. 73 – 79.

55. Фомченков В. М., Денесго А. И. Теоретическая модель высокочастотной релаксации электроориентации бактериальных клеток // Электронная обработка материалов. 1980. № 2. С. 65 – 70.

56. Фомченков В. М., Мазанов А. Л., Брезгунов В. Н. Влияние дисперсии электрических параметров клеток на их ориентацию в переменном электрическом поле // Биофизика. 1982. № 4. С. 665 – 669.

57. Pohl H. A. Dielectrophoresis: The behavior of neutral matter In non-uniform electric fields // London : Cambr. Univers. Press, 1978. 579 p.

58. Диэлектрическое поведение клеточных суспензий / В. М. Фомченков [и др.] // Электронная обработка материалов. 1975. № 2. С. 60 – 65.

59. Фомченков В. М., Мирошников А. И. Ячейки для исследования электроориентации и диэлектрофореза клеток // Электронная обработка материалов. 1979. № 4. С. 91 – 93.

60. Die kettenbildung skinetik als messparameter fur die dielelrtrophorese von zellen / K. F. Schmidt [et. al.] // Studia biophysica. 1979. Vol. 75. P. 81 – 91.

61. Friend A. W., Flack D., Schwan H. P. Low frequency electric field induced in the shape and motility of amoebae // Science. 1975. Vol. 187. P. 357 – 359.

62. Zellen mit manipu-lierten funktionen neuen perspektiven fur zellbiologie / U. Zimmermann [et. al.] // Angev. Chem. 1981. Vol. 93. P. 332 – 351.

2.7. Исследование взаимосвязи показателей здоровья человека с геофизическими полями и солнечной активностью

На физическом полигоне кафедры общей и прикладной физики Владимирского государственного университета с 1999 года осуществляется непрерывный мониторинг электромагнитных полей инфранизкочастотного диапазона, метеофакторов и радиационного фона. С 2009 года совместно с Управлением Роспотребнадзора по Владимирской области с использованием статистических данных по смертности населения, а также по обращаемости детей с заболеваниями дыхательной системы за период с июля 2004 года по декабрь 2006 года по г. Владимиру осуществлялась работа по исследованию воздействия космических и геофизических факторов на показатели здоровья населения.

1. Взаимосвязь обращаемости детей с заболеваниями органов дыхания с геофизическими характеристиками

Исследования взаимосвязи обращаемости детей с заболеваниями органов дыхания с геофизическими характеристиками осуществлялись с использованием баз данных Управления Роспотребнадзора по Владимирской области и баз данных результатов мониторинга электрического поля, температуры воздуха, атмосферного давления и относительной влажности физического экспериментального полигона ВлГУ [1, 2]. Для анализа были взяты данные по обращаемости детей с заболеваниями бронхиальной астмой, обструктивным бронхитом и ларинготрахеитом за период с июля 2004 года по декабрь 2006 года по Владимирской области, которые сопоставлялись с синхронными данными геофизических параметров.

По результатам исследований были проанализированы корреляционные связи указанных факторов. Коэффициент корреляции вертикальной составляющей напряженности электрического поля и обращаемости детей с обструктивным бронхитом за период с сентября 2005 года по декабрь 2006 года по г. Владимиру составил 0,44 при вероятности ошибки $\leq 0,1$ (рис. 2.13).

Коэффициент корреляции температуры воздуха и обращаемости детей с обструктивным бронхитом за сентябрь 2005 года – декабрь 2006 года по г. Владимиру составил 0,47 при вероятности ошибки $\leq 0,001$ (рис. 2.14).



Рис. 2.13. Обращаемость детей с обструктивным бронхитом и напряженность электрического поля за сентябрь 2005 г. – декабрь 2006 г.

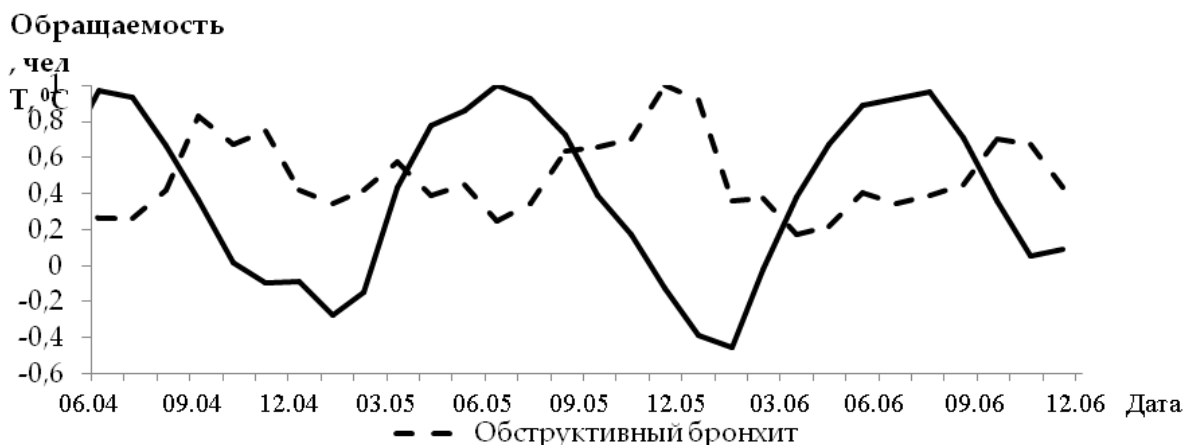


Рис. 2.14. Обращаемость детей с обструктивным бронхитом и температура воздуха за июль 2004 г. – декабрь 2006 г.

Исследования показали, что непосредственная связь уровня заболеваемости бронхиальной астмой, обструктивным бронхитом и ларинготрахеитом с уровнем напряженности электрического поля пограничного слоя атмосферы достаточно слабая (коэффициент корреляции составил 0,01 – 0,3). Выявлено, что уровень напряженности электрического поля пограничного слоя атмосферы влияет на соотношение между уровнями заболеваемости, указанными выше.

2. Взаимосвязь смертности по Владимирской области с геофизическими характеристиками

Исследования проводились на основе базы данных по смертности людей по Владимирской области со 2 июля по 27 сентября 2003 года и с 21 мая по 30 октября 2005 года (рис. 2.15 – 2.17). Данные получены от Медицинского информационного аналитического центра департамента здравоохранения администрации Владимирской области. Также были взяты синхронные данные физического экспериментального полигона по напряженности электрического поля, температуре воздуха, атмосферному давлению, относительной влажности, радиационному фону за период со 2 июля по 27 сентября 2003 года и с 21 мая по 30 октября 2005 года.

Коэффициент корреляции вертикальной составляющей напряженности электрического поля и смертности людей за период со 2 июля по 1 августа 2003 года по Владимирской области составил 0,52 ($p \leq 0,01$).; за период со 2 июля по 11 июля 2003 года – 0,62 ($p \leq 0,1$); с 1 сентября по 27 сентября 2003 года – 0,31 ($p \leq 0,1$); с 1 июля по 31 августа 2005 года – 0,33 ($p \leq 0,01$). На отдельных участках

временных рядов (рис. 2.15) можно наблюдать высокую корреляцию для вертикальной составляющей напряженности электрического поля и смертности населения по Владимирской области. Анализ взаимосвязи уровня смертности в 2003 году за июль – август с изменением температуры воздуха (см. рис. 2.15) указывает на достаточно сильную зависимость этих факторов (коэффициент корреляции составил 0,49). Коэффициент корреляции температуры воздуха и смертности людей за период со 2 июля по 19 августа 2003 года по Владимирской области составил 0,49 ($p \leq 0,001$); с 23 июля по 19 августа 2003 года – 0,61 ($p \leq 0,001$).

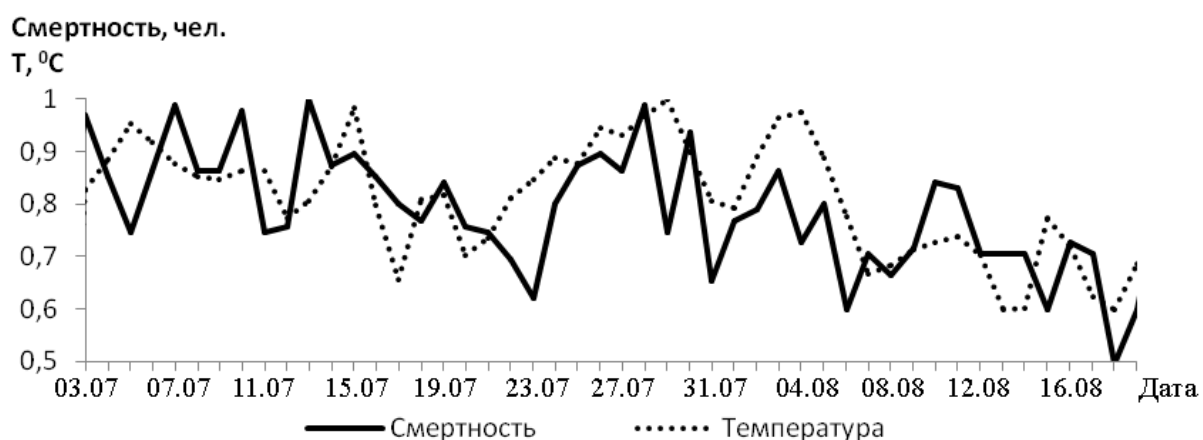


Рис. 2.15. Смертность людей и температура воздуха за период со 2 июля по 19 августа 2003 г. по Владимирской области

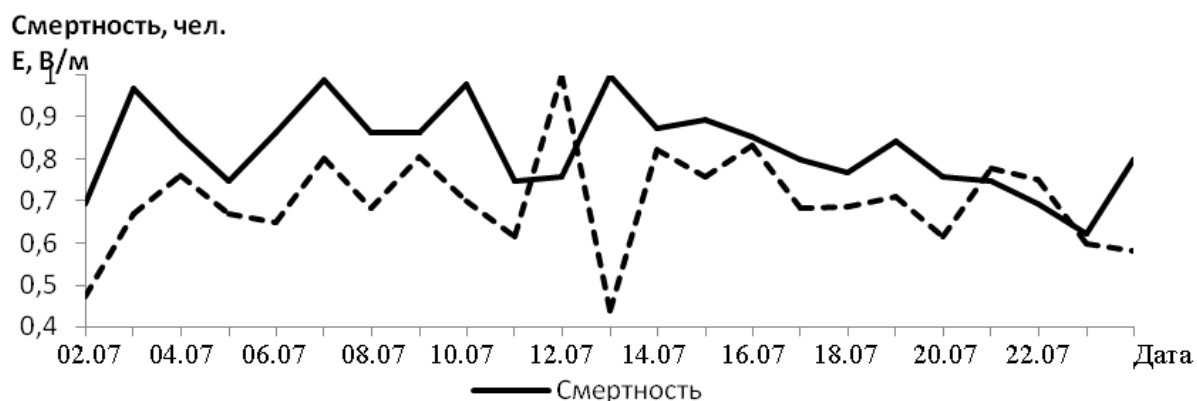


Рис. 2.16. Смертность людей и напряженность электрического поля (флюксметр № 2) за период со 2 по 24 июля 2003 г. по Владимирской области

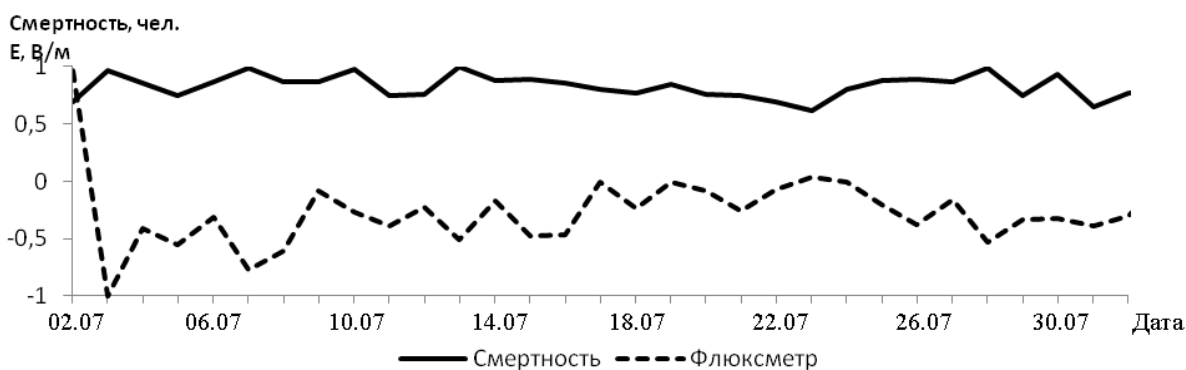


Рис. 2.17. Смертность людей и напряженность электрического поля (флюксметр № 1) за период со 2 июля по 1 августа 2003 г. по Владимирской области

Появление слабой корреляционной связи в отдельных случаях, возможно, означает многофакторность взаимосвязей, влияющих на анализируемые процессы.

Уменьшение коэффициента корреляции между вертикальной составляющей напряженности электрического поля и смертностью сопровождается усилением, возможно, какого-то другого фактора на уровень смертности или вертикальную составляющую напряженности электрического поля (например, магнитные бури, опасные техногенные процессы). Данные исследования будут продолжены.

3. Взаимосвязь дорожно-транспортных происшествий и пострадавших по Владимирской области с гео- и гелиофизическими характеристиками

Проводился анализ взаимодействия гелио- и геофизических факторов (числа Вольфа, электрического поля Земли, магнитного поля Земли) с дорожно-транспортными происшествиями по Владимирской области по данным медико-санитарной части МВД России по Владимирской области, Управления государственной инспекции безопасности дорожного движения УМВД России по Владимирской области и ГБУЗ ВО «Городская клиническая больница скорой медицинской помощи» г. Владимира. На отдельных участках временных рядов выявлена значимая корреляция между вертикальной составляющей напряженности электрического поля, магнитным полем Земли, числами Вольфа и количеством ДТП по Владимирской области (рис. 2.18 – 2.25). Выявлена значимая корреляция между количеством погибших и раненых в результате ДТП по Владимирской области и числом Вольфа.

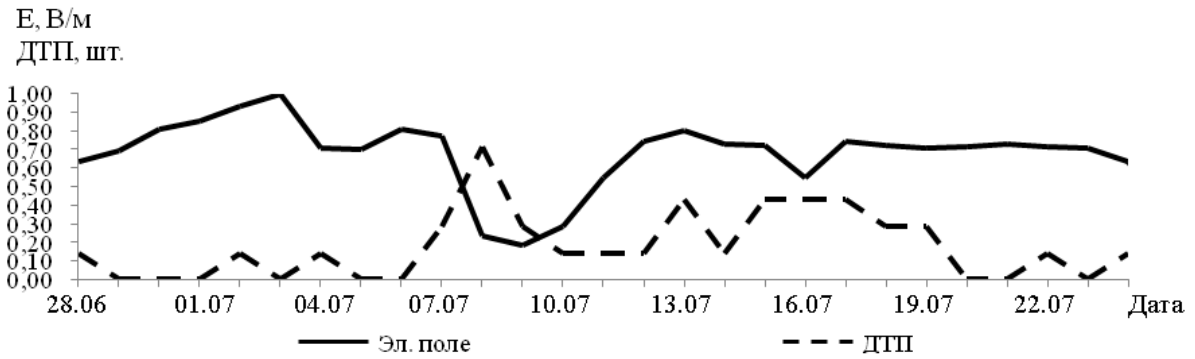


Рис. 2.18. Количество ДТП и напряженность электрического поля по Владимирской области за период с 26 июня по 24 июля 2001 г.

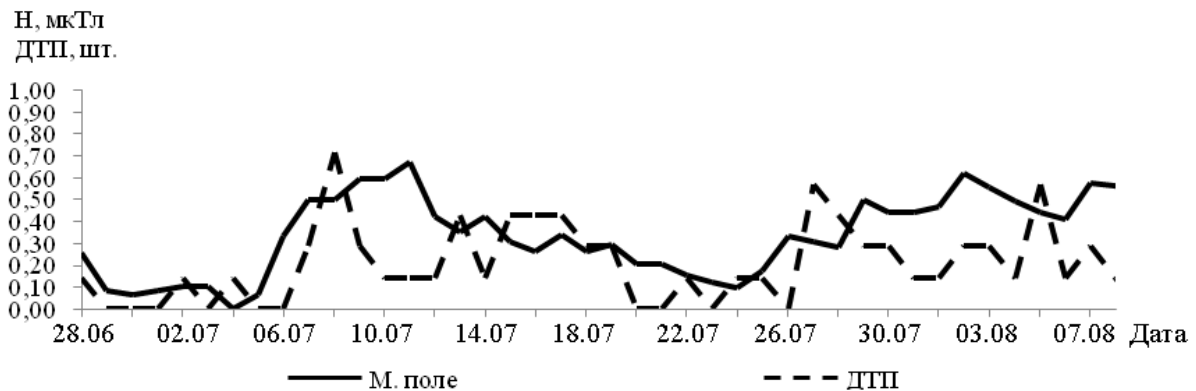


Рис. 2.19. Количество ДТП и магнитное поле по Владимирской области за период с 28 июня по 8 августа 2001 г.

Временные ряды со значимыми коэффициентами корреляции геомагнитного поля, чисел Вольфа для количества ДТП, погибших, раненых в результате ДТП (табл. 2.1), их сумма по Владимирской области за 2001 год показаны на рис. 2.20 – 2.22.

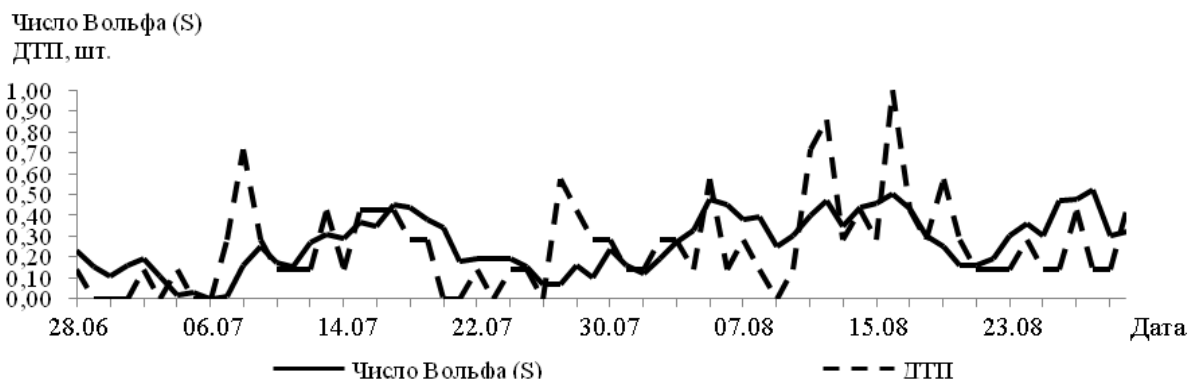


Рис. 2.20. Количество ДТП по Владимирской области и числа Вольфа в южном полушарии Солнца за период с 28 июня по 29 августа 2001 г.

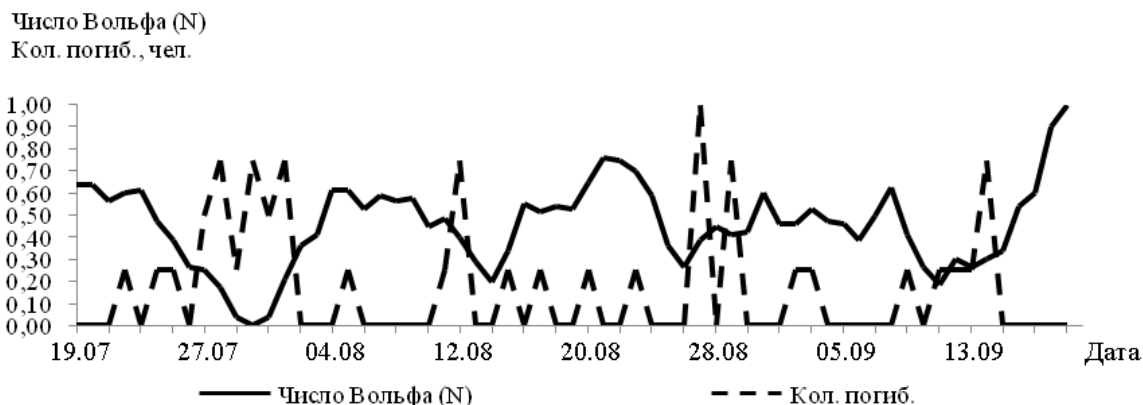


Рис. 2.21. Количество погибших в результате ДТП по Владимирской области и числа Вольфа в северном полушарии Солнца за период с 19 июля по 19 сентября 2001 г.

На отдельных участках временных рядов выявлена достаточно высокая корреляция между вертикальной составляющей напряженности электрического поля, магнитным полем Земли, числами Вольфа и количеством ДТП, количеством пострадавших по Владимирской области в 2001 году. На временных рядах напряженности электрического поля за 8 июля 2001 года и количества ДТП за это же время наблюдается обратная зависимость между напряженностью электрического поля и количеством ДТП (см. рис. 2.22). Коэффициент корреляции вертикальной составляющей магнитного поля и количества погибших в результате ДТП за период с 10 июля по 21 августа 2002 года по Владимирской области составил 0,45 при вероятности ошибки $\leq 0,01$.

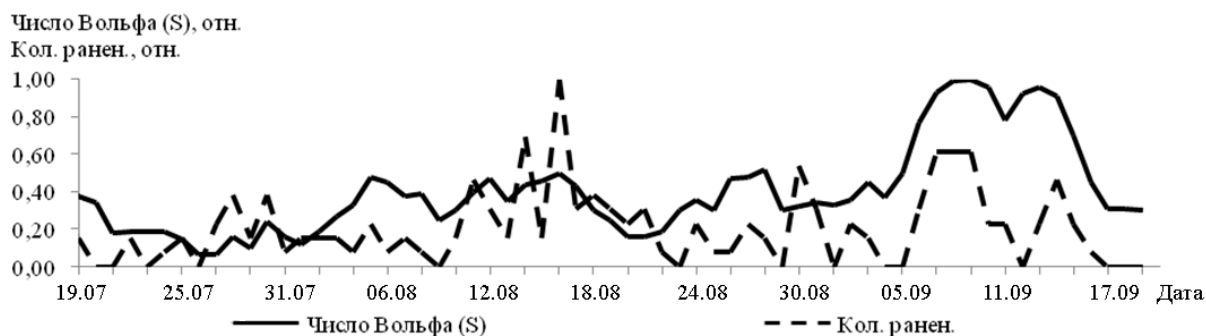


Рис. 2.22. Количество раненых в результате ДТП по Владимирской области и числа Вольфа в южном полушарии Солнца за период с 19 июля по 19 сентября 2001 г.

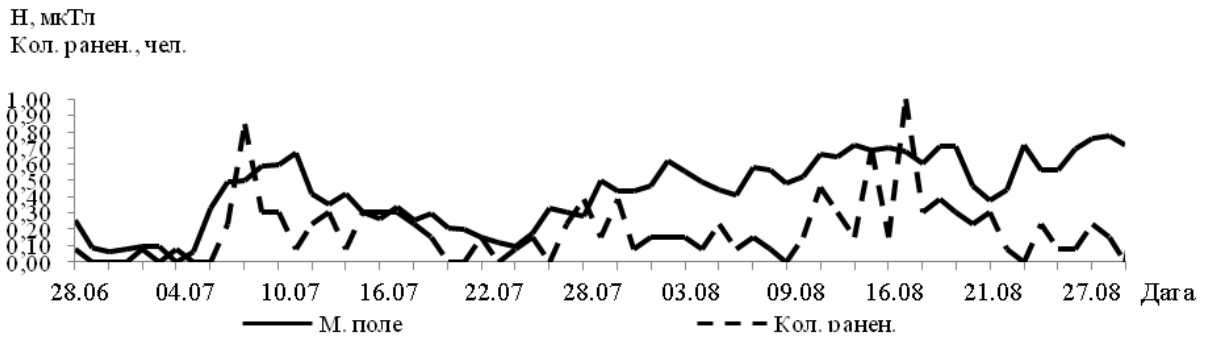


Рис. 2.23. Количество раненых в результате ДТП по Владимирской области и магнитное поле за период с 28 июня по 29 августа 2001 г.

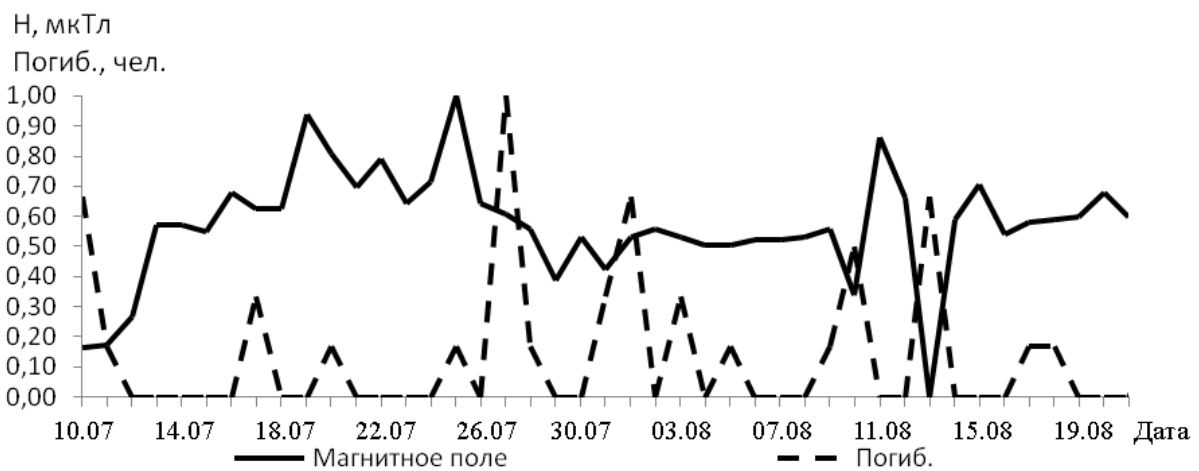


Рис. 2.24. Количество погибших в результате ДТП и напряженность электрического поля по Владимирской области за период с 10 июля по 21 августа 2002 г.

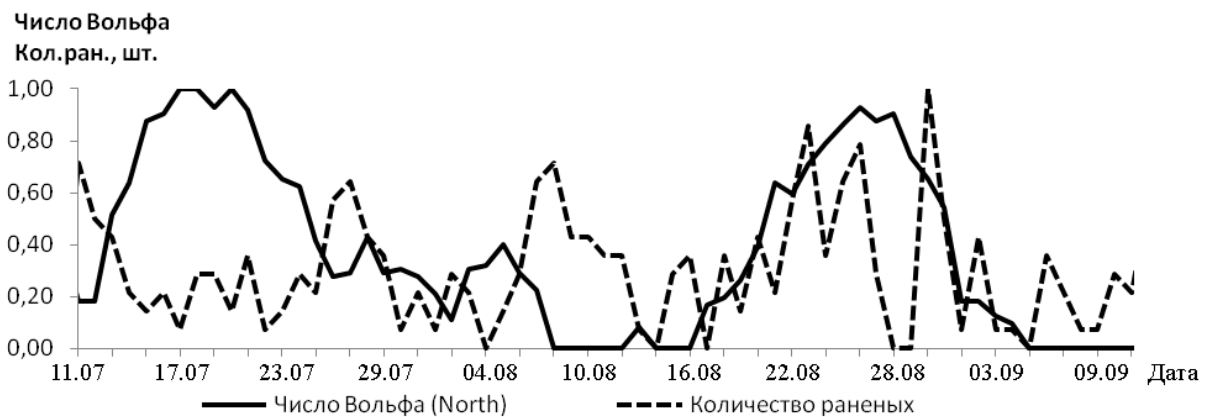


Рис. 2.25. Количество раненых в результате ДТП по Владимирской области и числа Вольфа в северном полушарии за период с 11 июля по 11 сентября 2002 г.

Таблица 2.1

Коэффициенты корреляции с вероятностью ошибки p для количества ДТП, погибших и раненых в результате ДТП, их сумма по Владимирской области и числа Вольфа за 2003 год

Анализируемые процессы	Дата	Коэффициент корреляции	p
Раненые в результате ДТП и число Вольфа N	11.07 – 11.08	-0,46	$\leq 0,01$
Раненые в результате ДТП и число Вольфа N	11.08 – 11.09	0,46	$\leq 0,01$
Раненые в результате ДТП и число Вольфа S	11.08 – 11.09	-0,41	$\leq 0,02$

В 2001 – 2006 годах на отдельных участках временных рядов выявлена значимая корреляция между вертикальной составляющей напряженности электрического поля, магнитным полем Земли, числами Вольфа и количеством ДТП, количеством пострадавших по Владимирской области (табл. 2.2). Коэффициент корреляции вертикальной составляющей магнитного поля и количества погибших в результате ДТП за период с 10 июля по 21 августа 2002 года по Владимирской области составил 0,45 при вероятности ошибки $\leq 0,01$ [2, 3].

Таблица 2.2

Коэффициенты корреляции с вероятностью ошибки p для количества ДТП, погибших, раненых в результате ДТП, их сумма по Владимирской области и чисел Вольфа за 2001 – 2006 годы

Период	Анализируемые процессы	Дата	Коэффициент корреляции	p
2001 г.	ДТП и электрическое поле Земли	28.06.2001 – 24.07.2001	-0,45	$\leq 0,02$
	ДТП и геомагнитное поле	28.06.2001 – 08.08.2001	0,40	$\leq 0,01$
	ДТП и число Вольфа S	28.06.2001 – 29.08.2001	0,45	$\leq 0,001$
	Погибшие в результате ДТП и число Вольфа N	19.07.2001 – 19.09.2001	-0,46	$\leq 0,001$
	Раненые в результате ДТП и число Вольфа S	19.07.2001 – 19.09.2001	0,39	$\leq 0,01$

Продолжение табл. 2.2

Период	Анализируемые процессы	Дата	Коэффициент корреляции	p
2002 г.	Погибшие в результате ДТП и геомагнитное поле	10.07.2002 – 21.08.2002	-0,41	$\leq 0,01$
2003 г.	Раненые в результате ДТП и число Вольфа N	11.07.2003 – 11.08.2003	-0,46	$\leq 0,01$
	Раненые в результате ДТП и число Вольфа N	11.08.2003 – 11.09.2003	0,46	$\leq 0,01$
	Раненые в результате ДТП и число Вольфа S	11.08.2003 – 11.09.2003	-0,41	$\leq 0,02$
2004 г.	ДТП и число Вольфа	13.02.2004 – 25.03.2004	-0,46	$\leq 0,01$
	ДТП и число Вольфа N	30.01.2004 – 11.03.2004	-0,41	$\leq 0,01$
	Погибшие в результате ДТП и электрическое поле Земли	31.10.2004 – 31.12.2004	-0,30	$\leq 0,02$
	Погибшие в результате ДТП и электрическое поле Земли	15.08.2004 – 25.09.2004	-0,37	$\leq 0,02$
	Погибшие в результате ДТП и электрическое поле Земли	31.08.2004 – 01.10.2004	-0,44	$\leq 0,02$
	Погибшие в результате ДТП и число Вольфа	22.11.2004 – 23.12.2004	-0,48	$\leq 0,01$
	Погибшие в результате ДТП и число Вольфа N	24.11.2004 – 25.12.2004	-0,51	$\leq 0,01$
	Раненые в результате ДТП и число Вольфа	29.01.2004 – 30.03.2004	-0,33	$\leq 0,01$
	Раненые в результате ДТП и число Вольфа S	25.02.2004 – 26.04.2004	-0,35	$\leq 0,01$
	Раненые в результате ДТП и электрическое поле Земли	05.10.2004 – 15.11.2004	-0,36	$\leq 0,02$
	Раненые в результате ДТП и число Вольфа	29.01.2004 – 10.03.2004	-0,43	$\leq 0,01$
	Раненые в результате ДТП и число Вольфа S	30.10.2004 – 10.12.2004	0,40	$\leq 0,01$
	Раненые в результате ДТП и число Вольфа	02.02.2004 – 04.03.2004	-0,47	$\leq 0,01$
	Раненые в результате ДТП и число Вольфа N	12.04.2004 – 13.05.2004	-0,45	$\leq 0,01$
	Пострадавшие в результате ДТП и число Вольфа	29.01.2004 – 30.03.2004	-0,34	$\leq 0,01$
	Пострадавшие в результате ДТП и число Вольфа S	06.10.2004 – 06.12.2004	0,31	$\leq 0,01$
	Пострадавшие в результате ДТП и число Вольфа S	29.01.2004 – 30.03.2004	-0,32	$\leq 0,01$

Продолжение табл. 2.2

Период	Анализируемые процессы	Дата	Коэффициент корреляции	p
2004 г.	Пострадавшие в результате ДТП и электрическое поле Земли	30.10.2004 – 10.12.2004	-0,37	$\leq 0,02$
	Пострадавшие в результате ДТП и число Вольфа	29.01.2004 – 10.03.2004	-0,45	$\leq 0,01$
	Пострадавшие в результате ДТП и число Вольфа	02.02.2004 – 04.03.2004	-0,51	$\leq 0,01$
	Пострадавшие в результате ДТП и число Вольфа N	12.04.2004 – 13.05.2004	0,47	$\leq 0,01$
	Пострадавшие в результате ДТП и число Вольфа S	29.01.2004 – 29.02.2004	-0,50	$\leq 0,01$
	Пострадавшие в результате ДТП и число Вольфа S	30.10.2004 – 30.11.2004	0,41	$\leq 0,01$
2005 г.	ДТП и электрическое поле Земли	4.01.2005 – 6.03.2005	-0,284	$\leq 0,05$
	ДТП и электрическое поле Земли	3.08.2005 – 3.10.2005	-0,330	$\leq 0,01$
	ДТП и магнитное поле Земли	2.08.2005 – 2.10.2005	-0,345	$\leq 0,01$
	ДТП и число Вольфа	19.09.2005 – 19.11.2005	-0,301	$\leq 0,02$
	ДТП и число Вольфа S	8.01.2005 – 10.03.2005	0,310	$\leq 0,02$
	ДТП и число Вольфа S	28.01.2005 – 30.03.2005	0,314	$\leq 0,02$
	ДТП и электрическое поле Земли	10.01.2005 – 20.02.2005	-0,397	$\leq 0,01$
	ДТП и электрическое поле Земли	23.08.2005 – 30.10.2005	-0,472	$\leq 0,01$
	ДТП и магнитное поле Земли	05.04.2005 – 16.05.2005	-0,463	$\leq 0,01$
	ДТП и число Вольфа	05.10.2005 – 15.11.2005	-0,392	$\leq 0,02$
	ДТП и число Вольфа S	28.01.2005 – 10.03.2005	0,454	$\leq 0,01$
	ДТП и электрическое поле Земли	28.01.2005 – 28.02.2005	-0,574	$\leq 0,001$
	ДТП и электрическое поле Земли	02.09.2005 – 03.10.2005	-0,535	$\leq 0,01$
	ДТП и магнитное поле Земли	04.04.2005 – 05.05.2005	-0,436	$\leq 0,02$
	ДТП и число Вольфа N	15.02.2005 – 18.03.2005	-0,431	$\leq 0,02$

Продолжение табл. 2.2

Период	Анализируемые процессы	Дата	Коэффициент корреляции	p
2005 г.	ДТП и число Вольфа S	25.01.2005 – 25.02.2005	0,479	$\leq 0,01$
	Погибшие в результате ДТП и электрическое поле Земли	09.07.2005 – 08.09.2005	-0,390	$\leq 0,01$
	Погибшие в результате ДТП и электрическое поле Земли	25.08.2005 – 25.10.2005	-0,397	$\leq 0,01$
	Погибшие в результате ДТП и магнитное поле Земли	08.06.2005 – 08.08.2005	-0,320	$\leq 0,02$
	Погибшие в результате ДТП и число Вольфа S	02.03.2005 – 02.05.2005	0,322	$\leq 0,02$
	Погибшие в результате ДТП и электрическое поле Земли	22.03.2005 – 02.05.2005	0,493	$\leq 0,001$
	Погибшие в результате ДТП и электрическое поле Земли	29.07.2005 – 08.06.2005	-0,460	$\leq 0,01$
	Погибшие в результате ДТП и электрическое поле Земли	23.08.2005 – 03.10.2005	-0,492	$\leq 0,001$
	Погибшие в результате ДТП и магнитное поле Земли	15.05.2005 – 25.06.2005	0,348	$\leq 0,05$
	Погибшие в результате ДТП и магнитное поле Земли	11.07.2005 – 21.08.2005	-0,349	$\leq 0,05$
	Погибшие в результате ДТП и число Вольфа	20.05.2005 – 30.06.2005	-0,419	$\leq 0,01$
	Погибшие в результате ДТП и число Вольфа S	20.05.2005 – 30.06.2005	-0,463	$\leq 0,01$
	Погибшие в результате ДТП и электрическое поле Земли	01.04.2005 – 02.05.2005	0,520	$\leq 0,01$
	Погибшие в результате ДТП и электрическое поле Земли	02.09.2005 – 03.10.2005	-0,514	$\leq 0,01$
	Погибшие в результате ДТП и магнитное поле Земли	01.08.2005 – 01.09.2005	-0,432	$\leq 0,02$
	Погибшие в результате ДТП и число Вольфа	01.04.2005 – 02.05.2005	0,485	$\leq 0,01$
	Погибшие в результате ДТП и число Вольфа N	27.02.2005 – 30.03.2005	-0,425	$\leq 0,02$
	Погибшие в результате ДТП и число Вольфа S	01.04.2005 – 02.05.2005	0,497	$\leq 0,01$
	Погибшие в результате ДТП и число Вольфа S	30.05.2005 – 30.06.2005	-0,474	$\leq 0,01$
	Раненые в результате ДТП и электрическое поле Земли	04.01.2005 – 06.03.2005	-0,283	$\leq 0,05$
Раненые в результате ДТП и электрическое поле Земли	29.10.2005 – 29.12.2005	-0,281	$\leq 0,05$	

Окончание табл. 2.2

Период	Анализируемые процессы	Дата	Коэффициент корреляции	p
2005 г.	Раненые в результате ДТП и магнитное поле Земли	02.08.2005 – 02.10.2005	-0,310	$\leq 0,02$
	Раненые в результате ДТП и электрическое поле Земли	10.01.2005 – 20.02.2005	-0,392	$\leq 0,02$
	Раненые в результате ДТП и магнитное поле Земли	05.04.2005 – 16.05.2005	-0,448	$\leq 0,02$
	Раненые в результате ДТП и электрическое поле Земли	28.01.2005 – 28.02.2005	-0,495	$\leq 0,01$
	Сумма погибших и раненых в результате ДТП и электрическое поле Земли	04.09.2005 – 04.11.2005	-0,305	$\leq 0,02$
	Сумма погибших и раненых в результате ДТП и магнитное поле Земли	02.08.2005 – 02.10.2005	-0,348	$\leq 0,01$
	Сумма погибших и раненых в результате ДТП и электрическое поле Земли	10.01.2005 – 20.02.2005	-0,374	$\leq 0,02$
	Сумма погибших и раненых в результате ДТП и магнитное поле Земли	05.04.2005 – 16.05.2005	-0,440	$\leq 0,01$
	Сумма погибших и раненых в результате ДТП и число Вольфа N	05.02.2005 – 18.03.2005	-0,366	$\leq 0,02$
	Сумма погибших и раненых в результате ДТП и электрическое поле Земли	05.01.2005 – 05.02.2005	-0,450	$\leq 0,01$
	Сумма погибших и раненых в результате ДТП и электрическое поле Земли	20.08.2005 – 20.09.2005	-0,438	$\leq 0,02$
	2006 г.	ДТП и число Вольфа	01.01.2006 – 03.03.2006	-0,43
ДТП и число Вольфа S		17.01.2006 – 19.03.2006	-0,43	$\leq 0,001$
ДТП и число Вольфа S		27.11.2006 – 28.12.2006	-0,61	$\leq 0,001$
Погибшие в результате ДТП и электрическое поле Земли		06.01.2006 – 16.02.2006	0,53	$\leq 0,001$
Погибшие в результате ДТП и число Вольфа N		15.03.2006 – 25.04.2006	0,50	$\leq 0,001$
Погибшие в результате ДТП и электрическое поле Земли		13.01.2006 – 13.02.2006	0,69	$\leq 0,001$
Погибшие в результате ДТП и число Вольфа N		21.03.2006 – 21.04.2006	0,70	$\leq 0,001$
Раненые в результате ДТП и число Вольфа S		03.11.2006 – 14.12.2006	0,59	$\leq 0,001$
Раненые в результате ДТП и число Вольфа S		03.11.2006 – 04.12.2006	0,63	$\leq 0,001$

Выявленные участки значимой корреляционной зависимости для временных рядов количества ДТП, погибших, раненых в результате ДТП по Владимирской области и напряженности электрического поля Земли, геомагнитного поля, чисел Вольфа за 2001 – 2006 годы подтверждают существование взаимосвязи между этими процессами.

Вместе с тем:

1. Имеет место возрастающее влияние постоянно действующих факторов и воздействия периодически действующих факторов внешней среды на показатель «Пострадавшие в столкновениях».

2. Сезонность показателя «Пострадавшие в столкновениях» отмечается с 10 апреля по 31 декабря.

3. В 2007 году в июне, июле, сентябре и октябре имело место влияние случайного фактора на месячную динамику показателя «Пострадавшие в столкновениях».

4. По формам проявления эпидемического процесса за период 2001 – 2007 годы круглогодичный показатель пострадавших в столкновениях составляет 69,6 %, сезонный – 28,7 %, вспышечный – 1,7 %.

Таким образом, полученные результаты могут быть использованы в планировании организации оказания медицинской помощи населению, пострадавшему в столкновениях автотранспорта, в расчете сил и средств структур ГИБДД и МЧС при проведении профилактических и спасательных мероприятий на автодорогах Владимирской области [1 – 12].

4. Взаимосвязь биоритмов человека с вариациями геомагнитного поля

Геомагнитное поле Земли складывается из двух частей различной природы: очень медленно меняющейся, почти постоянной, источники которой расположены собственно внутри Земли, и переменной, генерируемой электрическими токами, текущими в ионосфере и магнитосфере. Напряженность переменной части поля составляет не более 2 % от части внутреннего происхождения.

Главное магнитное поле Земли меняется со временем как по величине, так и по конфигурации. Изменения МП (вековые вариации) включают в себя колебания с разными характерными временами: от немногих десятков лет (известны, например, 20-летние вариации) до десятков тысяч лет. Вариации ГМП отмечаются с периодами порядка 60 лет и циклические изменения с характерными временами в не-

сколько сотен лет (преимущественно 600 лет). Описанные вековые вариации ГМП находят объяснение в рамках динамо-теории главного поля как результат изменений токовой системы земного ядра и, в частности, наличия в нем крупномасштабных волновых процессов – МАК-волн, т. е. волн, образующихся в результате непрерывного взаимодействия максвелловских, архимедовых и кориолисовых сил.

Экспериментальные исследования показывают, что циклы поведенческих реакций и физиологических ритмов биологических объектов коррелируют с периодически изменяющимися параметрами внешней среды, причем синхронизаторами могут быть различные гелиогеофизические и метеорологические факторы, к которым организмы чувствительны [3, 2].

В связи с наличием ~ 1 , ~ 7 , ~ 14 , ~ 27 -суточных колебаний в спектре многих природных явлений представляется возможной синхронизация внешними физическими факторами не только околонедельного, но и некоторых других физиологических ритмов.

В результате оценки связи внешних физических воздействий и частоты инфарктов миокарда при помощи функций обычной, частотной и множественной когерентности установлено, что в диапазоне колебаний с периодами 6 – 8 суток существует статистически значимая, не зависящая от других воздействующих факторов связь интенсивности инфарктов миокарда с H, D-составляющими ГМП.

Полученные результаты приводят к заключению, что существуют датчики времени биологических ритмов с околонедельным периодом колебаний, причем амплитудно-частотная характеристика тракта биологического объекта, воспринимающая информацию об изменении параметров внешних физических воздействий, содержит ряд дискретных составляющих в спектре, соответствующих циркадному (27-дневному) и некоторым другим ритмам физиологических процессов. Прогноз интенсивности 6 – 8-суточных колебаний геомагнитной активности может позволить своевременно организовать комплекс лечебно-профилактических мероприятий.

Библиографические ссылки

1. Грунская Л. В., Лещев И. А., Сныгина И. А. Адаптация организма человека к характеристикам окружающей среды и электромагнитным полям Земли // Труды международной конференции «Агаджаньяновские чтения». М. : Изд-во РУДН, 2016. С. 37 – 38.

2. Мониторинг электромагнитных полей инфранизкочастотного диапазона / Л. В. Грунская [и др.] // Физика и радиоэлектроника в медицине и экологии : тр. XII Междунар. науч.-техн. конф. Владимир : Изд-во ВлГУ, 2016. С. 209 – 213.

3. Биоритмы человека и электромагнитное поле Земли инфранизкочастотного диапазона / Л. В. Грунская [и др.] // Физика и радиоэлектроника в медицине и экологии : тр. XII Междунар. науч.-техн. конф. Владимир : Изд-во ВлГУ, 2016. С. 246 – 248.

4. Лещев И. А., Грунская Л. В., Широбоков А. В. Взаимосвязь дорожно-транспортных происшествий по Владимирской области с гео- и гелиофизическими характеристиками // Методы компьютерной диагностики в биологии и медицине-2012 : материалы Всерос. молодеж. конф. Саратов, 2012. С. 81 – 83.

5. Влияние электромагнитного поля пограничного слоя атмосферы на показатели здоровья человека и его биоритмы / Л. В. Грунская [и др.] // Вестник РУДН. Серия Медицина. 2012. № 7. С. 81 – 82.

6. Лещев И. А. Влияние геофизических характеристик пограничного слоя атмосферы и солнечной активности на дорожно-транспортные происшествия Владимирской области [Электронный ресурс] // Международная научная конференция студентов, аспирантов и молодых учёных «Ломоносов-2013» : сб. тез. докл. Секция «Физика». М., 2013. С. 52 – 53.

7. Грунская, Л. В., Лещев И. А. Исследование воздействия гео- и гелиофизических процессов на жизнедеятельность человека в пограничном слое атмосферы // Abstracts 13-th Odessa International Astronomical Gamov Conference. Odessa. 2013. P. 57 – 58.

8. Лещев И. А. Влияние геофизических характеристик пограничного слоя атмосферы и солнечной активности на показатели здоровья населения Владимирской области [Электронный ресурс] // Международная научная конференция студентов, аспирантов и молодых учёных «Ломоносов-2012» : сб. тез. докл. М. : МАКС Пресс, 2012. С. 32 – 34.

9. Лещев И. А., Грунская Л. В., Широбоков А. В. Исследование воздействия электрического и геомагнитного полей Земли и Солнца на показатели здоровья человека // Медицинская физика и инновации в медицине : тез. конф. Троицк, 2012. С. 428 – 430.

10. Лещев И. А., Л. В. Грунская, А. В. Широбоков. Влияние солнечной активности и земных факторов на показатели здоровья человека // Влияние космической погоды на человека в космосе и на Земле : тез. конф. М. : ИКИ РАН, 2012. С. 144.

11. Программно-аппаратный комплекс исследования электромагнитных полей пограничного слоя атмосферы / Л. В. Грунская [и др.] // Биомедицинская радиоэлектроника. 2012. № 6. С. 42 – 47.

12. Влияние геофизических факторов на здоровье человека / А. В. Широбоков [и др.] // Биомедицинская радиоэлектроника. 2012. № 6. С. 62 – 66.

Заключение к главе

Методы измерения электрических полей в атмосфере целесообразно разделить на три класса: в первом из них напряженность электрического поля оценивается по разности потенциалов между электродами, находящимися в исследуемом поле, во втором – по величине заряда, индуцируемого измеряемым полем на поверхности проводника, в третьем – по влиянию поля на массовое движение электронов или ионов естественной или искусственной природы. Флюксметр – прибор, предназначенный для измерения интенсивности медленно меняющихся во времени электрических полей, в частности, напряженности атмосферного электрического поля. В основе его работы лежит принцип действия электростатического генератора. Любая конструкция флюксметра должна преобразовывать измеряемое электрическое поле в быстро меняющееся переменное, которое воздействует на измерительный электрод, т. е. должен существовать механизм, посредством которого такое преобразование становится возможным.

С целью исследования электрического и геомагнитного полей инфранизкочастотного диапазона и воздействия их на организм человека создана система многоканального синхронного мониторинга электрического и геомагнитного полей на разнесенных в пространстве станциях: физический экспериментальный полигон ВлГУ; станция на озере Байкал Института солнечно-земной физики СО РАН; станция в поселке Паратунка (Камчатка), Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН; станция в г. Обнинск на базе научно-производственного

объединения «Тайфун». Формируются базы экспериментальных данных по разнесенным в пространстве станциям. Создание многопунктной системы синхронных регистраций электрического поля пограничного слоя атмосферы с разнесением в пространстве на десятки и сотни километров систем регистрации позволяет исследовать, в частности, приливные вариации электрического поля, оказывающие глобальное воздействие на весь Земной шар.

За последнее время магнитобиология достигла серьезных успехов в решении прикладных задач прежде всего благодаря широкому использованию постоянных МП в терапевтических целях. Однако в оценке эффективности широкого внедрения МП в клиническую практику настораживает тот факт, что МП играет роль универсального средства от множества патологий, и это достигается незначительными вариациями параметров: напряженности, экспозиции, локализации омагничивания [1]. Очевидно, использование магнитного поля в терапии должно основываться на детальном знании его влияния на интактный организм. Целый ряд экспериментально-клинических исследований характеризуют МП как фактор, активно нарушающий деятельность метаболических систем углеводного, липидного и белкового обменов [3]. Естественно, чтобы примирить в клинической практике два взаимоисключающих биологических действия МП – терапевтическое и патологическое – необходимо знание как молекулярных механизмов, так и закономерностей ответных реакций организмов на воздействие магнитного поля в норме и патологии. Поскольку биохимические реакции протекают с чередованием парамагнитно-диамагнитных состояний промежуточных и конечных продуктов метаболизма, МП может вызвать изменение скорости как прямых, так и обратных реакций, что определяет возможность взаимокompенсации изменений, вызванных МП в биохимических звеньях. Тогда биологический эффект магнитного поля интегрально можно интерпретировать как итог нескомпенсированных изменений в биохимических звеньях, трансформированных на клеточный и органнй уровни. Можно полагать, что МП влияет прежде всего на гомеостаз живых систем, изменяя скорость и направленность радикальных метаболических реакций как наиболее чувствительных параметров адаптационной системы организма, т. е. в основе

механизмов действия МП должны быть те же физико-химические закономерности, что и в основе процессов адаптации к ним. В настоящее время можно считать доказанной способность МП изменять кинетику радикальных химических реакций. Результаты, полученные при исследовании теоретических и экспериментальных химических и биохимических моделей, свидетельствуют о сложной зависимости изменения скорости радикальных химических реакций от напряженности магнитного поля. Терапевтическое действие МП может быть тем значительнее, чем полнее выявлены нарушенные патологией биохимические параметры организма (биоритмы, адаптационный порог, время ответной реакции), на которые МП должно оказать нормализующее действие.

Исследования взаимосвязи обращаемости детей с заболеваниями органов дыхания с геофизическими характеристиками осуществлялись с использованием баз данных Управления Роспотребнадзора по Владимирской области и баз данных результатов мониторинга электрического поля, температуры воздуха, атмосферного давления и относительной влажности физического экспериментального полигона ВлГУ [1, 2]. Для анализа были взяты данные по обращаемости детей с заболеваниями бронхиальной астмой, обструктивным бронхитом и ларинготрахеитом за период с июля 2004 года по декабрь 2006 года по Владимирской области, которые сопоставлялись с синхронными данными геофизических параметров. По результатам исследований были проанализированы корреляционные связи указанных факторов. Коэффициент корреляции вертикальной составляющей напряженности электрического поля и обращаемости детей с обструктивным бронхитом за период с сентября 2005 года по декабрь 2006 года по г. Владимиру составил 0,44 при вероятности ошибки $\leq 0,1$. Коэффициент корреляции температуры воздуха и обращаемости детей с обструктивным бронхитом за период с сентября 2005 года по декабрь 2006 года по г. Владимиру составил 0,47 при вероятности ошибки $\leq 0,001$.

По взаимосвязям электромагнитного поля и солнечной активности с ДТП были получены интересные и важные результаты: имеет место возрастающее влияние постоянно действующих факторов и воздействие периодически действующих факторов внешней среды на показатель «Пострадавшие в столкновениях»; сезонность данного показателя отмечается с 10 апреля по 31 декабря; по формам проявления

эпидемического процесса за период 2001 – 2007 годы круглогодичный показатель пострадавших в столкновениях составляет 69,6 %, сезонный – 28,7 %, вспышечный – 1,7 %. Полученные результаты могут быть использованы в планировании организации оказания медицинской помощи населению, пострадавшим в столкновениях автотранспорта, в расчете сил и средств структур ГИБДД и МЧС при проведении профилактических и спасательных мероприятий на автодорогах Владимирской области.

Контрольные вопросы

1. Какие методы измерения электрических полей вам известны?
2. Каковы предназначение и особенности устройства электростатических флюксметров?
3. Для каких целей на физическом полигоне ВлГУ разработана и действует система многоканального синхронного мониторинга электромагнитного поля Земли?
4. Какие методы применяются для измерения геомагнитного поля?
5. Какие методы измерения электромагнитных полей живых организмов вы можете перечислить?
6. Назовите методы измерения электрических параметров клеток.
7. Каковы результаты исследования взаимосвязи уровня бронхолегочных заболеваний по Владимирской области с характеристиками природной среды?
8. Каковы результаты исследования воздействия солнечной активности на дорожно-транспортные происшествия?

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Все живые организмы, начиная от простейших одноклеточных и кончая такими высокоорганизованными, как человек, обладают биологическими ритмами, которые проявляются в периодическом изменении жизнедеятельности и как самые точные часы отмеряют время.

Изучение биологических ритмов организма человека позволит научно обосновать применение лекарственных препаратов при лечении больных. Поиски исследователей направлены в основном на определение возможностей управления биоритмами с целью устранения нарушений сна. По-видимому, большинство болезней у человека происходит вследствие нарушения ритма функционирования ряда органов и систем его организма. Поэтому изучение сна человека с позиций его биологических ритмов имеет большое значение.

Основные ритмы в природе, наложившие свой отпечаток на все живое на Земле, возникли под влиянием вращения Земли по отношению к Солнцу, Луне и звездам. А. Л. Чижевский доказал, что солнечная активность обуславливает периодичность большинства биологических процессов на Земле. По степени зависимости от внешних условий биологические ритмы подразделяются на экзогенные и эндогенные. Физиологические процессы в живых организмах тесно связаны с факторами среды. Из них первостепенную роль играют свет, температура, атмосферное давление и содержание кислорода в воздухе.

Повторяемость процессов – один из признаков жизни. Благодаря биологическим ритмам живой организм гораздо легче адаптируется к условиям внешней среды, которые регулируют длительность циклов и их отдельных фаз. Биологические часы есть у растений, животных и человека. Установлено, что в организме человека имеется свыше 100 биологических ритмов, отражающих различные физиологические процессы. Это суточные ритмы сна и бодрствования, изменения температуры тела, работы сердечно-сосудистой системы, состава крови и т. д. Почти все функции организма связаны с расходом

энергии. В связи с этим физиологический ритм организма отражает уровень обмена веществ.

Биологические ритмы – это периодические изменения функциональной активности различных органов и подсистем организма. Гипоталамус имеет непосредственное отношение к управлению суточным ритмом. В нем находятся центры, управляющие температурой тела, работой желез внутренней секреции, а также углеводным, водно-солевым и жировым обменами. Периферические часы работают независимо от гипоталамуса, и в своей деятельности они не связаны ни с центральными, ни с гомеостатическими часами. В них роль главного метронома могут выполнять надпочечники.

Биохимическая природа биологических часов подтверждается большим экспериментальным материалом. Он свидетельствует о том, что работа биологических часов внутри клетки основана на чередовании напряжения и расслабления, т. е. на релаксационных колебаниях. Основа процесса отсчета времени в клетке – очень длинные молекулы ДНК, названные хрономами.

Все основные особенности связи медико-биологических явлений с солнечной активностью связаны с тем, что живые организмы чувствительны к амплитудно-спектральным изменениям ЭМП в широком диапазоне деятельности Солнца и примыкающем к нему диапазоне звуковых частот.

Схема механизма влияния солнечной активности на биологические явления такова: возмущение на Солнце (например, мощная хромосферная вспышка) – возмущение магнитосферы и плазмосферы Земли (магнитная буря с внезапным началом) – изменение спектра ЭМП на поверхности Земли в области инфранизких частот – сдвиги в физиологических показателях организма (реакция на изменение внешней среды). Экспериментальные данные определенно указывают на экологическую значимость естественного электромагнитного поля Земли в диапазоне инфранизких частот.

Несмотря на непрерывно происходящие изменения во внешней среде, в том числе и в электромагнитной обстановке, в организме поддерживается относительное динамическое постоянство внутренней

среды – гомеостазис, что является необходимым условием существования организма. В основе приспособительной деятельности организма лежит количественно-качественный принцип: на разную интенсивность раздражающего фактора организм отвечает различным качеством адаптационной реакции. В подкорковых отделах мозга, главным образом в гипоталамусе, формируется тип ответа, который определяет развитие той или иной адаптационной реакции в организме, что осуществляется через подчиненные системы организма нервным и гуморальным путем. Триады адаптационных реакций: тренировка – активация – стресс. Закрепившаяся в эволюционном процессе сложная периодическая количественно-качественная зависимость в развитии общих адаптационных реакций обеспечивает тонкую и чувствительную систему приспособления даже к небольшим количественным изменениям ЭМП в широком диапазоне значений, в том числе и к ГМП, в котором организм непрерывно функционирует.

Теоретически воздействие электромагнитного поля на ритм может быть трех видов:

1. Электромагнитные поля влияют на организм в целом, но не на сам генератор биологического ритма. Воздействие ЭМП может быть и информационным; при этом изменяются также и параметры биологического ритма, его частота и (или) амплитуда аналогично тому, как зависит частота пульсаций сердца от уровня постоянной температуры тела или от «сигнала тревоги». Частота биологического ритма не должна строго следовать за частотой ЭМП в определенном диапазоне. В некоторых случаях возможны даже синхронные изменения частот биологического ритма и ЭМП (как в примере с воздействием на частоту пульсаций сердца стабильного уровня температуры).

2. Электромагнитные поля влияют только на внешние проявления ритма, на так называемые индикаторные процессы, но не на сам генератор биологического ритма. При этом усиление ЭМП или экранирование от него должны приводить к изменению амплитуды наблюдаемого биологического ритма вплоть до его исчезновения, но не отражаться на частоте ритма.

3. Электромагнитные поля влияют на сам генератор и являются датчиком времени, в данном случае связь между биологическими ритмами и ЭМП определяется закономерностями сложения нелинейных колебаний.

Наблюдения над многодневными биоритмами привели к появлению так называемой теории физических, эмоциональных и интеллектуальных биоритмов.

Атмосфера Земли надежно экранирует биосферу от бóльшей части электромагнитного излучения: до поверхности Земли доходит лишь узкая полоса в области ближнего ультрафиолетового, видимого и ближнего инфракрасного излучений (не зависящих от изменений солнечной активности), а также часть радиоизлучения (зависящего от солнечной активности, но имеющего очень малую интенсивность).

Геомагнитное поле Земли не позволяет солнечному ветру приблизиться непосредственно к поверхности Земли. Но сама магнитосфера (с магнитосферным шлейфом и плазмосферой) под воздействием ветра оказывается источником электромагнитного излучения низкой и инфранизкой частоты. В области инфранизких частот ($f < 5$ Гц) ионосфера вновь становится прозрачной для ЭМП, которое может регистрироваться на земной поверхности.

Биосфера зародилась, развивалась и продолжает эволюционировать в условиях постоянно действующего фона ионизирующих излучений. Этот фон создается в основном за счет естественной радиоактивности почвы, Мирового океана и атмосферы; некоторый вклад вносят также космические лучи галактического (ГКЛ) и солнечного (СКЛ) происхождения.

В безоблачную погоду электрическое поле приблизительно вертикально и его напряженность уменьшается с высотой в среднем от 130 В/м у поверхности Земли до нескольких вольт на метр на высоте 10 км. Известны по крайней мере четыре периода унитарных вариаций ЭП: 11-летний, годовой, 27-суточный, суточный. Следует отметить, что наиболее мощные пики в спектрах электрических и магнитных составляющих совпадают по частоте: 0,014, 0,025, 0,032, 0,05 Гц.

Геомагнитное поле Земли складывается из двух частей различной природы: очень медленно меняющейся, почти постоянной, источники которой расположены собственно внутри Земли, и переменной, генерируемой электрическими токами, текущими в ионосфере и магнитосфере. Напряженность переменной части поля составляет не более 2 % от части внутреннего происхождения.

Для электромагнитобиологии, формирующейся как самостоятельное научное направление, наибольший интерес представляют аспекты действия ЭМИ, связанные не с мощностью воздействия и поглощенной энергией, а с сигнальными характеристиками, с той информацией, которая закодирована в соответствующих полях и излучениях и является значимой для биосистемы.

Поскольку электронные состояния сложных систем, в частности биологических, как правило, вырожденные, т. е. обладают разнообразными пространственными формами при одной и той же энергии, то даже очень слабые внешние ЭМП могут выделить одно из многих состояний и запустить в организме определенную цепь процессов синтеза или распада.

С целью исследования электрического и геомагнитного полей инфранизкочастотного диапазона и воздействия этих полей на организм человека создана система многоканального синхронного мониторинга электрического и геомагнитного полей на разнесенных в пространстве станциях: физический экспериментальный полигон ВЛГУ; станция на озере Байкал Института солнечно-земной физики СО РАН; станция в поселке Паратунка (Камчатка), Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН; станция в г. Обнинск на базе научно-производственного объединения «Тайфун». Тогда биологический эффект МП интегрально можно интерпретировать как итог нескомпенсированных изменений в биохимических звеньях, трансформированных на клеточный и органический уровни. Можно полагать, что магнитное поле влияет прежде всего на гомеостаз живых систем, изменяя скорость и направленность радикальных метаболических реакций как наиболее чувствительных параметров адаптационной системы организма, т. е. в

основе механизмов действия МП должны быть те же физико-химические закономерности, что и в основе процессов адаптации к ним.

В настоящее время можно считать доказанной способность магнитного поля изменять кинетику радикальных химических реакций. Результаты, полученные при исследовании теоретических и экспериментальных химических и биохимических моделей, свидетельствуют о сложной зависимости изменения скорости радикальных химических реакций от напряженности МП. Терапевтическое действие МП может быть тем значительнее, чем полнее выявлены нарушенные патологией биохимические параметры организма (биоритмы, адаптационный порог, время ответной реакции), на которые магнитное поле должно оказать нормализующее действие.

В 2001 – 2006 годах на отдельных участках временных рядов выявлена значимая корреляция между вертикальной составляющей напряженности электрического поля, магнитным полем Земли, числами Вольфа и количеством ДТП, количеством пострадавших по Владимирской области.

Электрическая структура атмосферы – газовой оболочки Земли – тесно связана с процессами, протекающими в пространстве от уровня земной поверхности до высот в десятки земных радиусов. Изменение электрических свойств атмосферы при переходе от нижних к более высоким ее слоям обусловлено двумя основными факторами: уменьшением с высотой плотности воздуха и размещением основного источника энергии – Солнца – вне земной атмосферы. Величина и направление электрического поля широко варьируют в пространстве и времени и зависят от погодных условий, орографии местности, времени года, суток и других факторов. В безоблачную погоду электрическое поле приблизительно вертикально и его напряженность уменьшается с высотой в среднем от 130 В/м у поверхности Земли до нескольких вольт на метр на высоте 10 км.

За последние десятилетия значительно возросла относительная роль антропогенных факторов в формировании электрических полей у земной поверхности. Радио- и телевизионные станции, линии электропередач, объемные заряды, возникающие в атмосфере в результате действия промышленности и транспорта, вследствие процессов горе-

ния, испарения, диспергирования веществ в воздухе, создают дополнительные изменения поля. Кроме того, искусственное введение веществ в атмосферу изменяет электрическую проводимость воздуха и влияет на напряженность естественного поля.

Исследование корреляционных связей пульсаций электрического и магнитного полей основывается на предположении, что волновые процессы, обусловленные электродинамическими явлениями в магнитосфере и ионосфере, являются источниками единого электромагнитного поля в тропосфере.

Палеомагнитные исследования позволили обнаружить исключительно интересное свойство геомагнитного поля – обращения полярности (инверсии) главного поля, которые многократно имели место в течение геологической истории Земли. Последняя изученная инверсия была в середине четвертичного периода (0,8 млн лет назад). Проанализированные представления о природе магнитных возмущений объясняют многие давно известные свойства возмущений, а именно:

- широтное распределение возмущенности с основным максимумом в зоне авроральной активности;

- возмущенный суточный ход: в средних широтах один максимум приходится на вечерние часы, в полярных широтах имеются два максимума – утренний и вечерний;

- сезонный (годовой) ход с максимумами в эпохи равноденствий, обусловленный тем, что Земля в течение года проектируется на различные гелиографические широты Солнца, а следовательно, на различные активные области;

- 11-летний циклический ход, следующий за 11-летними колебаниями солнечной активности с запаздыванием максимумов магнитной активности на 1 – 3 года;

- 27-дневную повторяемость магнитных возмущений, объясняющуюся 27-дневным синодическим периодом вращения Солнца;

- запаздывание магнитных возмущений на 2 – 4 дня относительно прохождения активных областей на Солнце через центральный меридиан.

Факт существования очень слабого электромагнитного излучения общепризнан и экспериментально обнаружен у всех исследованных клеток растений и животных. Анализ проведенных эксперимен-

тальных исследований указывает на информационную роль собственного излучения биологических объектов. Действие внешнего электромагнитного поля проявляется в следующих ситуациях:

1. Поскольку все химические процессы синтеза или распада сопровождаются перестройками электронных оболочек молекул, субъединиц мембран и так далее, то неизбежно в процессах синтеза или распада происходит излучение или поглощение квантов ЭМП. Эти процессы могут составить определенный канал передачи информации между мембранными субъединицами, мембранами, клеточными органами, клетками, между ДНК в белках.

2. Поскольку электронные состояния сложных систем, в частности биологических, как правило, вырожденные, т. е. обладают разнообразными пространственными формами при одной и той же энергии, то даже очень слабые внешние ЭМП могут выделить одно из многих состояний и запустить в организме определенную цепь процессов синтеза или распада.

3. Возможно нарушение комплементарности, определяемое воздействием излучения на водородные связи, что также существенно для протекания процессов синтеза или распада.

4. Излучение может производить отбор из ряда имеющихся возможностей существования определенных неравновесных состояний. Этот процесс рассматривается как аналог динамической голографии.

5. Наличие коллективизированных π -электронных состояний в биомолекулах приводит к когерентному взаимодействию с излучением всей электронной системы. Характер излучения может также играть существенную роль в переходе электронной подсистемы в коллективное состояние.

6. Как известно, под действием ЭМП на среду, содержащую свободные заряды и дипольные молекулы, происходят два основных процесса: релаксационные колебания дипольных молекул, вызывающие диэлектрические потери, и колебания свободных зарядов, приводящие к потерям проводимости. Наряду с тепловым эффектом микроволн, обусловленным потерями проводимости и диэлектрическими потерями, имеет место и резонансное действие ЭМП на белки и фермент-субстратные комплексы.

Методы измерения электрических полей в атмосфере целесообразно разделить на три класса: в первом из них напряженность ЭП оценивается по разности потенциалов между электродами, находящимися в исследуемом поле, во втором – по величине заряда, индуцируемого измеряемым полем на поверхности проводника, в третьем – по влиянию поля на массовое движение электронов или ионов естественной или искусственной природы. Флюксметр – прибор, предназначенный для измерения интенсивности медленно меняющихся во времени электрических полей, в частности, напряженности атмосферного электрического поля. В основе его работы лежит принцип действия электростатического генератора. Любая конструкция флюксметра должна преобразовывать измеряемое электрическое поле в быстроменяющееся переменное, которое воздействует на измерительный электрод, т. е. должен существовать механизм, посредством которого такое преобразование становится возможным.

За последнее время магнитобиология достигла серьезных успехов в решении прикладных задач прежде всего благодаря широкому использованию постоянных магнитных полей в терапевтических целях. Целый ряд экспериментально-клинических исследований характеризуют МП как фактор, активно нарушающий деятельность метаболических систем углеводного, липидного и белкового обменов. Биологический эффект МП интегрально можно интерпретировать как итог нескомпенсированных изменений в биохимических звеньях, трансформированных на клеточный и органный уровни. Можно полагать, что магнитное поле влияет прежде всего на гомеостаз живых систем, изменяя скорость и направленность радикальных метаболических реакций как наиболее чувствительных параметров адаптационной системы организма, т. е. в основе механизмов действия МП должны быть те же физико-химические закономерности, что и в основе процессов адаптации к ним.

Во Владимирском государственном университете на кафедре общей и прикладной физики проводятся исследования взаимосвязи обрацваемости детей с заболеваниями органов дыхания с геофизическими характеристиками. Используются базы данных Управления Роспотребнадзора по Владимирской области и базы данных результатов мониторинга электрического поля, температуры воздуха, атмосферного давления и относительной влажности на физическом экспериментальном

полигоне ВлГУ. Для анализа были взяты данные по обращаемости детей с заболеваниями бронхиальной астмой, обструктивным бронхитом и ларинготрахеитом за период с июля 2004 года по декабрь 2006 года по Владимирской области, которые сопоставлялись с синхронными данными геофизических параметров. По результатам исследований были проанализированы корреляционные связи указанных факторов. Коэффициент корреляции вертикальной составляющей напряженности электрического поля и обращаемости детей с обструктивным бронхитом за сентябрь 2005 года – декабрь 2006 года по г. Владимиру составил 0,44 при вероятности ошибки $\leq 0,1$. Коэффициент корреляции температуры воздуха и обращаемости детей с обструктивным бронхитом за сентябрь 2005 года – декабрь 2006 года по г. Владимиру составил 0,47 при вероятности ошибки $\leq 0,001$. Данные исследования продолжаются.

По взаимосвязям электромагнитного поля и солнечной активности с ДТП получены интересные и важные результаты: имеет место возрастающее влияние постоянно действующих факторов и воздействия периодически действующих факторов внешней среды на показатель «пострадавшие в столкновениях». Сезонность данного показателя отмечается с 10 апреля по 31 декабря. По формам проявления эпидемического процесса за период 2001 – 2007 годы круглогодичный показатель пострадавших в столкновениях составляет 69,6 %, сезонный – 28,7 %, вспышечный – 1,7 %. Полученные результаты могут быть использованы в планировании организации оказания медицинской помощи населению, пострадавшим в столкновениях автотранспорта, в расчете сил и средств структур ГИБДД и МЧС при проведении профилактических и спасательных мероприятий на автодорогах Владимирской области.

ПОСЛЕСЛОВИЕ

Вторая часть учебного пособия «Геофизика и биоритмы» является продолжением материала, изложенного в первой части, и содержит информацию по следующим направлениям: механизмы биологического действия электромагнитных полей геофизической природы; Солнце как источник электромагнитного излучения; электромагнитное поле атмосферы Земли инфранизкочастотного диапазона; геомагнитные поля и их вариации; общие аспекты исследования механизмов биологического действия электромагнитных полей; практическое использование электромагнитных полей в медицине и биологии; методы измерения электрического и геомагнитного полей; применение электромагнитных полей в диагностике и терапии; исследование взаимосвязи показателей здоровья человека с геофизическими полями и солнечной активностью с помощью системы мониторинга электромагнитных полей, проведенное на кафедре общей и прикладной физики Владимирского государственного университета.

Автор надеется, что материалы, изложенные в пособии, помогут студентам, магистрантам, аспирантам, специализирующимся в этом направлении, разобраться в особенностях влияния биоритмов на состояние живых организмов. Дальнейшее развитие биоритмологии, биофизики и методов исследования живых объектов приведет к углублению знаний в этих областях, станет базой для того, чтобы биоритмология заняла важное место в диагностических, терапевтических и аналитических медицинских технологиях.

По ряду вопросов, связанных с развитием биоритмологии, можно порекомендовать обратиться к литературе, которая приведена автором в рекомендательном библиографическом списке.

РЕКОМЕНДАТЕЛЬНЫЙ БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Биофизика для инженеров : учеб. пособие. В 2 т. Т. 1. / Е. Б. Бигдай [и др.]. – М. : Горячая линия – Телеком, 2008. – 496 с. – ISBN 978-5-9912-0048-6.
2. Блехман, И. И. Синхронизация в природе и технике / И. И. Блехман. – 2-е изд., доп. – М. : Ленанд, 2015. – 440 с. – ISBN 978-5-9710-1456-0.
3. Тигранян, Р. Э. Вопросы электромагнитобиологии / Р. Э. Тигранян. – М. : Физматлит, 2010. – 352 с. – ISBN 978-5-9221-1197-3.
4. Коганов, В. И. Колебания и волны в природе и технике : учеб. пособие для вузов / В. И. Коганов. – М. : Горячая линия – Телеком, 2008. – 336 с. – ISBN 978-5-9912-0008-0.
5. Владимирский, Б. М. Космическая погода и наша жизнь : монография / Б. М. Владимирский, Н. А. Темурьянц, В. С. Мартынюк. – Фрязино : Век-2, 2004. – 224 с. – ISBN 5-85099-146-8.
6. Медико-биологические эффекты геомагнитных возмущений / Н. А. Агаджанян [и др.]. – М. : ИЗМИРАН, 2001. – 136 с. – ISBN 5-89513-004-6.
7. Грунская Л. В. Адаптация организма человека к характеристикам окружающей среды и электромагнитным полям земли / Л. В. Грунская, И. А. Лещев, И. А. Сныгина // Труды международной конференции «Агаджаняновские чтения». – М. : Изд-во РУДН, 2016. С. 37 – 38. – ISBN 978-5-209-06957-7.
8. Мониторинг электромагнитных полей инфранизкочастотного диапазона / Л. В. Грунская [и др.] // Физика и радиоэлектроника в медицине и экологии : тр. XII Междунар. науч.-техн. конф. – Владимир : Изд-во ВлГУ, 2016. – С. 209 – 213. – ISBN 978-5-905527-13-5.
9. Биоритмы человека и электромагнитное поле Земли инфранизкочастотного диапазона / Л. В. Грунская [и др.] // Физика и радиоэлектроника в медицине и экологии : сб. докл. XII Междунар. науч.-техн. конф. – Владимир : Изд-во ВлГУ, 2016. – С. 246 – 248. – ISBN 978-5-905527-13-5.

10. Лещев, И. А. Влияние солнечной активности и земных факторов на показатели здоровья человека / И. А. Лещев, Л. В. Грунская, А. В. Широбоков // Влияние космической погоды на человека в космосе и на Земле : тез. конф. – М. : ИКИРАН, 2012. – С. 144.

11. Программно-аппаратный комплекс исследования электромагнитных полей пограничного слоя атмосферы / Л. В. Грунская [и др.] // Биомедицинская радиоэлектроника. – 2012. – № 6. – С. 42 – 47.

12. Влияние геофизических факторов на здоровье человека / А. В. Широбоков [и др.] // Биомедицинская радиоэлектроника. – 2012. – № 6. – С. 62 – 66.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	3
Глава 1. МЕХАНИЗМЫ БИОЛОГИЧЕСКОГО ДЕЙСТВИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ ГЕОФИЗИЧЕСКОЙ ПРИРОДЫ	5
1.1. Электромагнитное поле атмосферы Земли инфранизкочастотного диапазона. Геомагнитные поля и их вариации	5
1.1.1. Электрические поля атмосферы Земли и их природа	5
1.1.2. Электромагнитное поле атмосферы Земли инфранизкочастотного диапазона	20
1.1.3. Спектральные характеристики электрического поля пограничного слоя атмосферы	22
1.1.4. Геомагнитные поля и их вариации	26
1.2. Общие аспекты исследования механизмов биологического действия электромагнитных полей	43
1.2.1. Кибернетический метод анализа биосистем	44
1.2.2. Синергетический метод анализа биосистем	45
1.2.3. Квантовый метод анализа биосистем	47
1.2.4. Общая оценка роли ЭМП в жизнедеятельности организмов	51
1.3. Механизмы биологического действия электромагнитных полей низкой частоты	54
1.3.1. Влияние МП на скорость окислительно- восстановительных реакций, протекающих в митохондриях	54
1.3.2. Электронный и ядерный магнитные резонансы в живой клетке	57
1.3.3. Взаимодействие магнитного и электрического полей с биологическими системами	60

1.4. Физические механизмы биологического действия микроволн	64
1.4.1. Релаксационные колебания дипольных молекул и колебания свободных зарядов.....	64
1.4.2. Резонансное действие ЭМП на белки и фермент-субстратные комплексы.....	66
Заключение к главе	73
Контрольные вопросы	76

Глава 2. ПРАКТИЧЕСКОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ В МЕДИЦИНЕ И БИОЛОГИИ	78
2.1. Методы измерения электрических полей в атмосфере	78
2.1.1. Метод оценки разности потенциалов между электродами.....	78
2.1.2. Индукционный метод	81
2.1.3. Влияние поля на массовое движение электронов или ионов естественной или искусственной природы	85
2.1.4. Электростатический флюксметр	91
2.1.5. Система разнесенного в пространстве мониторинга электрического и геомагнитного полей пограничного слоя атмосферы на полигоне ВлГУ	96
2.2. Методы измерения геомагнитного поля и его вариаций.....	107
2.2.1. Магнитостатические магнитометры	107
2.2.2. Индукционные магнитометры	109
2.2.3. Квантовые магнитометры.....	111
2.2.4. Магнитометры с оптической ориентацией.....	114
2.2.5. Сверхпроводящие квантовые магнитометры.....	116
2.3. Магнитобиология и магнитотерапия	123

2.4. Применение электромагнитных полей в диагностике и терапии	130
2.5. Методы измерения электромагнитных полей живых организмов.....	143
2.5.1. Методы измерения электрических полей организмов.....	143
2.5.2. Методы измерения магнитных полей биообъектов	150
2.6. Методы измерения электрических параметров клеток и их использование в биологии и медицине.....	154
2.7. Исследование взаимосвязи показателей здоровья человека с геофизическими полями и солнечной активностью	171
Заключение к главе	187
Контрольные вопросы	190
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	191
ПОСЛЕСЛОВИЕ	201
РЕКОМЕНДАТЕЛЬНЫЙ БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	202

Учебное издание

ГРУНСКАЯ Любовь Валентиновна

ГЕОФИЗИКА И БИОРИТМЫ

Учебное пособие

Часть 2

Редактор А. П. Володина

Технический редактор С. Ш. Абдуллаева

Корректор Н. В. Пустовойтова

Компьютерная верстка Л. В. Макаровой

Выпускающий редактор А. А. Амирсейидова

Подписано в печать 18.06.19.

Формат 60×84/16. Усл. печ. л. 12,09 Тираж 50 экз.

Заказ

Издательство

Владимирского государственного университета
имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых.
600000, Владимир, ул. Горького, 87.