

УДК 681.51:577.3

DOI: [10.26102/2310-6018/2025.49.2.020](https://doi.org/10.26102/2310-6018/2025.49.2.020)

Информативные признаки электромагнитного обнаружения и распознавания биологических объектов

А.А. Алешков, Г.А. Цветков✉, А.Н. Коковин

*Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
Пермь, Российская Федерация*

Резюме. Актуальность исследования обусловлена необходимостью повышения надежности и эффективности систем физической защиты охраняемых объектов в условиях растущих угроз безопасности, что возможно путем применения более чувствительных и избирательных методов идентификации нарушителей, к которым относится разрабатываемый метод – электромагнитное обнаружение и распознавание биологических объектов (БО). Основная цель работы заключается в исследовании бифуркационного процесса взаимодействия внешнего электромагнитного поля радиоволнового диапазона с электромагнитной оболочкой живого организма для обоснования, оценки и расчёта информативных признаков электромагнитного обнаружения и распознавания БО с последующим формированием словаря типовых признаков. Исследование основано на ранее разработанной математической модели БО, которая уточняется и дополняется за счет анализа научной литературы, посвященной изучению биорадиоинформативной технологии и биоэлектромагнетизма. В ходе работы определены условия и описаны режимы функционирования биологической среды, генерирующей электромагнитные излучения, в зависимости от сочетания энергетических и частотных параметров внешнего поля с характеристиками этой среды. Предложена и обоснована номенклатура наиболее информативных признаков электромагнитного распознавания – параметры бифуркации, характеризующие массу, размеры и электродинамические свойства биообъекта. Выведены аналитические выражения для расчета признаков классификации БО, подтвержденные результатами вычислительного эксперимента. Разработан словарь признаков нарушителей, обеспечивающий возможность обоснованного принятия решений о наличии объекта в контролируемом пространстве, его принадлежности к определенному классу и параметрах движения. Представленные результаты могут быть использованы при разработке средств идентификации нарушителей для систем охраны и мониторинга территорий.

Ключевые слова: информативные признаки, информационное взаимодействие, биологический объект, электромагнитные поля, напряженность, биоэлектромагнетизм, идентификация нарушителей, параметры бифуркации, словарь признаков.

Для цитирования: Алешков А.А., Цветков Г.А., Коковин А.Н. Информативные признаки электромагнитного обнаружения и распознавания биологических объектов. *Моделирование, оптимизация и информационные технологии*. 2025;13(2). URL: <https://moitvivr.ru/journal/pdf?id=1888> DOI: 10.26102/2310-6018/2025.49.2.020

Informative features for electromagnetic detection and recognition of biological objects

A.A. Aleshkov, G.A. Tsvetkov✉, A.N. Kokovin

Perm National Research Polytechnic University, Perm, the Russian Federation

Abstract. The relevance of the study is due to the need to improve the reliability and efficiency of physical protection systems of protected objects in the face of growing security threats, which is possible through the use of more sensitive and selective methods of identification of intruders, which includes the developed method – electromagnetic detection and recognition of biological objects (BO). The

purpose of the work is to study the bifurcation process of interaction of external electromagnetic field of radio wave range with the electromagnetic shell of a living organism to substantiate, evaluate and calculate informative features of electromagnetic detection and recognition of BO with the subsequent formation of a dictionary of typical features. The study is based on the previously developed mathematical model of a BO, which is refined and supplemented by analyzing the scientific literature devoted to the study of bioradioinformative technology and bioelectromagnetism. In the course of the work, the conditions and modes of functioning of a biological medium generating electromagnetic radiation are determined and described, depending on the combination of energy and frequency parameters of the external field with the characteristics of this medium. The nomenclature of the most informative signs of electromagnetic recognition – bifurcation parameters characterizing mass, dimensions and electrodynamic properties of a bioobject – is proposed and substantiated. Analytical expressions for calculating the features of classification of BO are derived, confirmed by the results of computational experiment. A dictionary of intruder attributes is developed, providing the possibility of informed decision-making about the presence of an object in the controlled space, its belonging to a certain class and motion parameters. The presented results can be used in the development of means of intruder identification for security and territory monitoring systems.

Keywords: informative features, information interaction, biological object, electromagnetic fields, strength, bioelectromagnetism, intruder identification, bifurcation parameters, feature dictionary.

For citation: Aleshkov A.A., Tsvetkov G.A., Kokovin A.N. Informative features for electromagnetic detection and recognition of biological objects. *Modeling, Optimization and Information Technology*. 2025;13(2). (In Russ.). URL: <https://moitvivr.ru/ru/journal/pdf?id=1888> DOI: 10.26102/2310-6018/2025.49.2.020

Введение

В настоящее время одним из важных направлений развития систем физической защиты охраняемых объектов и территорий является совершенствование технических и программных средств информационного обеспечения и поддержки принятия решений [1, 2]. В связи с этим, особую актуальность приобретают вопросы повышения надежности и эффективности методов обнаружения и распознавания целей, определяющих качество получаемой информации и адекватность принимаемых управленческих решений.

Несмотря на достигнутый прогресс в данной области, уникальность реализаций случайных возмущений и помех, искажающих полезную информацию в процессе измерений параметров окружающей среды, ограниченный интервал наблюдения, особенности условий эксплуатации и, наконец, несовершенство моделей, принципиально не позволяют в полной мере использовать потенциал известных методов (сейсмических, оптических, радиолокационных и других) для своевременного получения достоверной информации о нарушителях периметра охраняемой территории и достижения требуемого результата системой защиты в целом [3, 4]. Ввиду чего целесообразна разработка новых методов и средств обнаружения и распознавания, основанных на более информативных признаках идентификации нарушителей, которые позволят добиться необходимого уровня чувствительности и избирательности обнаружения при одновременном уменьшении количества ошибок распознавания полезного сигнала на фоне внешних помех.

В качестве такого признака может использоваться один из неотъемлемых аспектов жизнедеятельности биологических объектов (БО) – собственное электромагнитное излучение (ЭМИ), величина и характер которого являются производными от множества факторов, характеризующих структуру и параметры нарушителей, и могут рассматриваться в качестве обобщенного критерия для идентификации (в данном случае электромагнитной) [5, 6]. Поскольку не все элементы этого критерия и влияющие

на него параметры характеризуются наличием релевантной задачи обнаружения и распознавания информации, целесообразно формирование конечного набора значимых и присущих только конкретному классу объектов (явлений) наиболее значимых электромагнитных признаков, по которым возможна их максимально достоверная идентификация с минимальными вычислительными затратами. Несмотря на существующие предложения авторов по синтезу таких признаков [7, 8], этот вопрос остается недостаточно изученным и представляет интерес для дальнейших исследований.

В данной работе предлагается проанализировать один из ключевых элементов метода электромагнитного обнаружения и распознавания нарушителей – принципы достижения и условия существования эффекта зависимости величины и характера ЭМИ БО от характеристик внешнего информативного электромагнитного поля (ВИ ЭМП) и самого объекта, с целью обосновать, оценить и рассчитать параметры, которые могут выступать в качестве информативных признаков распознавания биообъекта или известного класса с определенными массогабаритными параметрами, а также формирования подходов к созданию словаря типовых признаков для использования в алгоритмах функционирования технических средств.

Материалы и методы

В основе рассматриваемого эффекта лежит характерная особенность биологического действия низкоинтенсивных ЭМП, находящихся за нижним порогом чувствительности БО – их биотропность. Несмотря на незначительную интенсивность внешних ЭМП радиоволнового диапазона, воздействие этих полей при определенных условиях приводит к реакции на всех исследованных уровнях структурно-функциональной организации живых организмов, сопровождающейся образованием отклика в виде генерации физических полей, определяющих информативность внешних ЭМП, что приводит к увеличению интенсивности собственных ЭМИ [9, 10]. Этот процесс является бифуркационным и наблюдается до некоторого порогового значения внешней энергии, после которого отклик биологической системы практически не зависит от интенсивности ВИ ЭМП.

Представленный эффект обусловлен результатом резонансно-полевого действия внешних ЭМП, когда имеет место синхронизация функционирования клеточных осцилляторов [11]. Она возможна в случае их связи или взаимодействия, при условии достаточности энергии синхронизации и равенства или рационального отношения частот синхронизируемой и синхронизирующей систем. Пороговое значение энергии в этом случае зависит от конкретных молекулярных механизмов взаимодействия, модуляционно-временных параметров внешнего ЭМП, уровня шумов в биологической системе и разности частот колебаний систем [12].

Используя разработанную математическую модель [7] для анализа параметров БО с точки зрения протекающих в нём электромагнитных колебательных процессов, можно с некоторыми ограничениями определить детерминированные системы уравнений или алгоритмы, далее задать начальные условия и условия взаимодействия с внешними факторами, а затем с необходимой степенью достоверности идентифицировать режимы бифуркационного процесса и параметры его динамики.

Для этого представим зависимость величины напряженности собственных ЭМИ биообъектов (E) от напряженности внешнего поля ($E_{вн}$) простым выражением $E = f(E_{вн})$. График этой функции будет состоять из трех выраженных участков, каждый из которых соответствует определенному режиму информационного взаимодействия электромагнитной оболочки БО с внешним ЭМП радиодиапазона (Рисунок 1).

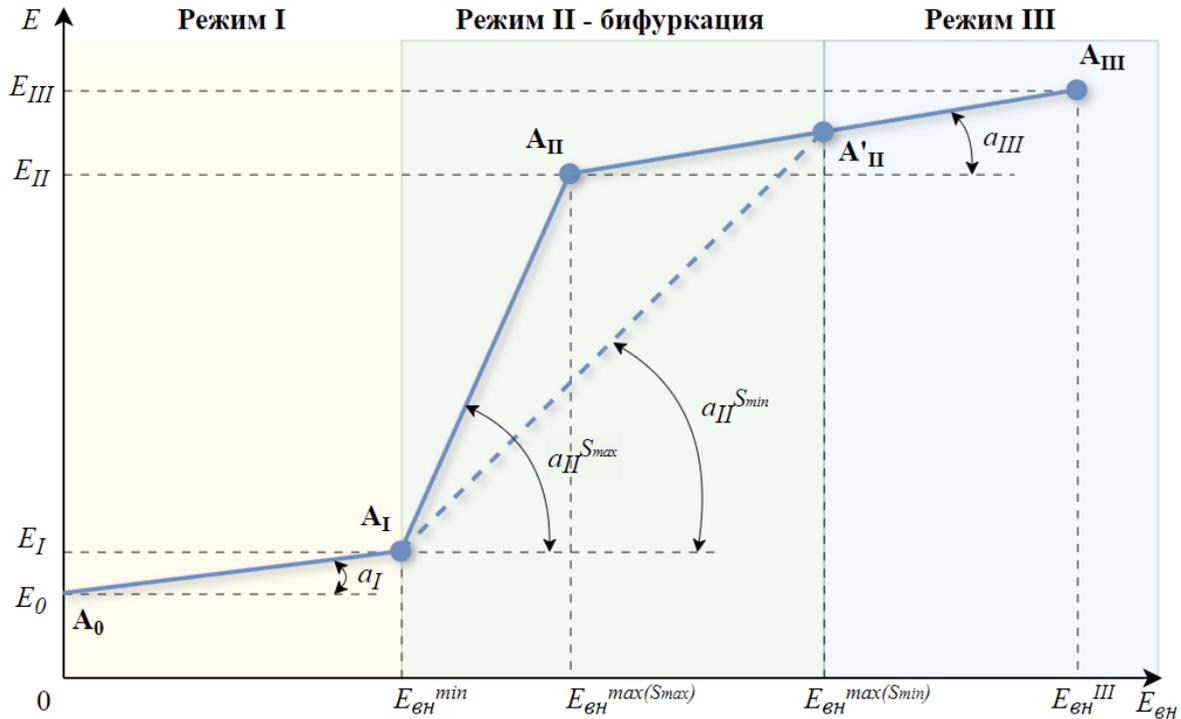


Рисунок 1 – Режимы информационного взаимодействия биообъекта с внешним ЭМП
Figure 1 – Modes of information interaction of a bioobject with external EMF

Режим I ($E_{вн} < E_{вн}^{min}$). На участке $A_0 - A_I$ с ростом напряженности ВИ ЭМП величина собственных излучений изменяется незначительно и носит сугубо линейный характер. Ткани организма ведут себя как пассивная материальная среда в силу недостаточности напряженности внешнего поля для достижения пороговых значений локального ЭМП внутри объема объекта. Незначительный рост напряженности объясняется наличием отраженной волны, емкостными и индуктивными эффектами.

На этом участке функция $E = f(E_{вн})$ имеет вид:

$$E_I = E_0 + E_{вн}^{min} \cdot tg\alpha_I. \quad (1)$$

Режим II – бифуркация ($E_{вн}^{min} \leq E_{вн} \leq E_{вн}^{max}$). На участке $A_I - A_{II}$ при относительно небольшом росте напряженности внешнего поля, величина собственных ЭМИ резко возрастает и достигает своеобразного порога «насыщения» в точке A_{II} . Это объясняется увеличением глубины проникания внешнего электромагнитного поля в ткани объекта при увеличении его напряженности, достижением пороговых значений локальным ЭМП и синхронизацией деятельности клеточных осцилляторов в результате резонансно-полевого действия внешних ЭМП. При этом осцилляторы функционируют по закону «все или ничего» в зависимости от модуляционных параметров внешнего поля. В точке A_{II} напряженность локального электромагнитного поля превышает пороговые значения во всем объеме, занимаемом объектом.

Следовательно, чтобы добиться максимума величины собственного ЭМП в режиме бифуркации, необходимо создать внешнее поле такой напряженности, когда в любой точке объема, занимаемого объектом, локальное поле ($E_{л}$) превышало бы пороговое значение, соответствующее точке A_I :

$$E_{л}(d) = E_{вн} \cdot |W_E(d; \omega_n)| \cdot \gamma \geq E_{вн}^{min}, \quad (2)$$

где $|W_E(d; \omega_n)|$ – модуль комплексной передаточной функции биологической системы, отражающий изменение напряженности внешнего ЭМП с несущей частотой ω_n при

проникании и прохождении через биологическую среду толщиной (глубиной) d ; Υ – коэффициент, учитывающий влияние собственного ЭМП на синхронизацию работы последующих слоев клеточных осцилляторов.

При действии внешнего поля радиоволнового диапазона, когда размеры БО соизмеримы с длиной волны или меньше ее, комплексная передаточная функция определяется преимущественно электромагнитными свойствами тканей организма на заданной частоте: толщиной, относительной диэлектрической проницаемостью и проводимостью [11, 13].

Очевидно, что прирост напряженности будет максимальным при максимальной площади поверхности объекта, обращенной в сторону фронта падающей электромагнитной волны и наоборот. То есть участок $A_I - A_{II}$ пропорционален площади облучаемой поверхности или площади сечения биообъекта (S):

$$E_{II}^{Smax} = E_I + \left(E_{BH}^{max(Smax)} - E_{BH}^{min} \right) \cdot tg\alpha_{II}^{Smax}, \quad (3)$$

$$E_{II}^{Smin} = E_I + \left(E_{BH}^{max(Smin)} - E_{BH}^{min} \right) \cdot tg\alpha_{II}^{Smin}. \quad (4)$$

Тогда максимальная величина напряженности ВИ ЭМП, обеспечивающая бифуркационный режим функционирования объекта, с учетом граничного условия (2):

$$E_{BH}^{max(Smax)} = E_{BH}^{min} / (|W_E(d; \omega_H)| \cdot \Upsilon), \quad (5)$$

$$E_{BH}^{max(Smin)} = E_{BH}^{min} \cdot [S_{max}/S_{min} \cdot (1/|W_E(d; \omega_H)| \cdot \Upsilon) - 1] + 1]. \quad (6)$$

Режим III ($E_{BH} > E_{BH}^{max}$). В дальнейшем, на участке $A_{II} - A_{III}$, при повышении напряженности внешнего поля, прирост величины напряженности собственных излучений незначителен и объясняется также явлениями отражения, излучением мультиполей, емкостными и индуктивными эффектами.

Функция $E = f(E_{BH})$ в этом режиме с учетом положения объекта:

$$E_{III}^{Smax} = E_{II}^{Smax} + (E_{BH}^{III} - E_{BH}^{max(Smax)}) \cdot tg\alpha_{III}, \quad (7)$$

$$E_{III}^{Smin} = E_{II}^{Smin} + (E_{BH}^{III} - E_{BH}^{max(Smin)}) \cdot tg\alpha_{III}. \quad (8)$$

Представленные режимы отражают чувствительность живых организмов к информационному воздействию ВИ ЭМП, определяемому сочетанием энергетических и частотных параметров внешнего поля с характеристиками биологической среды. Нужное сочетание обеспечивает характерную ответную реакцию конкретного объекта в виде хаотического отклика относительно большой интенсивности – собственного широкополосного хаотического сигнала. То есть параметры бифуркации в данном случае являются информативными признаками биообъекта и могут применяться в процедурах обнаружения и распознавания человека-нарушителя: определять, с одной стороны, сам факт присутствия объекта в определенной зоне, с другой – его примерные массогабаритные характеристики и изменение ориентации в пространстве.

Для достижения и существования режима бифуркации частота несущей и модуляция внешнего поля должны способствовать беспрепятственному или достигаемому с наименьшими энергетическими затратами прохождению поля в БО, а также приводить к реализации резонансно-полевых эффектов. У человека и животных эта область частот лежит в пределах 10–100 МГц [11, 12], а амплитудная модуляция в диапазоне 0,5–1,5 кГц [9]. Также можно предположить, что для достижения максимального эффекта вектор поляризации должен совпадать с наибольшим линейным размером объекта относительно фронта волны.

На основе обозначенных условий и зависимостей математическая модель БО [7] дополнена нижеприведенными аналитическими выражениями для нахождения численных значений информативных признаков нарушителей.

1. Средняя величина амплитуды излучаемого биообъектом сигнала в бифуркационном режиме в зависимости от параметров ВИ ЭМП и характеристик БО:

$$E_{I-II}^{(n)} = F \cdot \frac{\omega_{n\Gamma}^2 \cdot E_{BH}}{c^2 \cdot (R_0 + R)^2} \cdot \frac{УП_{Д}^* \cdot M_{Д} \cdot a \cdot \rho_{f,T}}{G \cdot P_{BH}^*} \cdot d \cdot \left[1 - \frac{d^2}{12 \cdot a^2} \right] \cdot \sqrt{1 + 3 \cos^2 \theta}, \quad (9)$$

где F – коэффициент пропорциональности; $\omega_{n\Gamma} = 2\pi f_{n\Gamma}$ – частота гармоники принимаемого сигнала электромагнитных излучений БО в режиме бифуркации ($n = 1, 2, \dots$), Гц; $c = 3 \cdot 10^8$ м/с – скорость распространения электромагнитной энергии в свободном пространстве; R – дальность приема сигнала от БО, м; R_0 – размер измеряющего устройства, м; $M_{Д}$ – масса БО, кг; $a = b$ – малые полуоси модели БО ($2a$ – толщина в направлении вектора потока ВИ ЭМП, $2b$ – ширина в направлении перпендикулярном направлению вектора потока), м; $\rho_{f,T}$ – излучательная способность БО, определяемая по закону Планка для всех гармоник излучаемых частот, Дж·Гц²; P_{BH}^* – действующая плотность потока мощности источника излучения, падающая на поверхность БО, Вт/м²; d – глубина проникновения ВИ ЭМП в ткани БО, м [13]; θ – угол, характеризующий направление рассеяния ЭМИ БО.

2. Параметр информационного взаимодействия ВИ ЭМП с биообъектом (G , Вт·Гц²/с), определяющий степень согласования массогабаритных параметров биообъекта с возможностями поглощения (приема) энергии ВИ ЭМП и образования собственных электромагнитных излучений БО в режиме бифуркации:

$$G = 2,05 \cdot 10^{-15} \cdot h \cdot \omega_n^2 \cdot (1 + 8,77 \cdot f_n \cdot D \cdot 10^{-9})^{-\exp(-h_q/L_k)}, \quad (10)$$

где $h = 6,626176(36) \cdot 10^{-34}$ Дж/Гц – постоянная Планка; $\omega_n = 2\pi f_n$ – несущая частота ВИ ЭМП, Гц; $D/2$ – большая полуось модели (D – высота БО), совпадающая с вектором поляризации волны ЭМП, м; h_q – действующая высота БО как приемно-передающей антенны, м [14]; L_k – протяженность контура поверхности с неравномерным распределением токов в тканях БО, как несимметричного вибратора в виде половины длины эллипса максимальной площади сечения эллипсоида по оси D , м [14].

3. Удельное стандартное поглощение энергии ВИ ЭМП БО ($УП_{Д}^*$, Вт/кг), определяется в зависимости от соотношения линейных размеров объекта с длиной волны внешнего ЭМП (λ_n):

$$\begin{cases} УП_{Д}^* = 5,2 D^2 / M_{Д} (8,77 \cdot f_n \cdot D \cdot 10^{-9})^{2,75}, & \text{при } D/\lambda_n > 0,2 \\ УП_{Д}^* = (1,8212331)^z D^2 / M_{Д} (8,77 \cdot f_n \cdot D \cdot 10^{-9})^z, & \text{при } 0,1 \leq D/\lambda_n \leq 0,2, \\ УП_{Д}^* = 3,31689 D^2 / M_{Д} (8,77 \cdot f_n \cdot D \cdot 10^{-9})^z, & \text{при } D/\lambda_n < 0,1 \end{cases} \quad (11)$$

где $z = 2 + 0,75 \cdot (10 D/\lambda_n - 1)$.

4. Амплитуда электрической составляющей напряженности ВИ ЭМП (E_{BH} , В/м) в точке взаимодействия с БО, обеспечивающая возникновение режима бифуркации у биологической среды при Е-поляризации:

$$E_{BH} = \sqrt{120\pi \cdot P_{BH}^* \cdot УП^E / УП_{Д}^*}, \quad (12)$$

где $УП^E$, Вт/кг – удельное поглощение биологической средой энергии ВИ ЭМП в режиме бифуркации, величина которого находится в пределах $УП_{min}^E \leq УП^E \leq УП_{max}^E$.

Результаты исследования и обсуждение

В рамках вычислительного эксперимента предлагается проанализировать возможности реализации процедур обнаружения и распознавания биообъектов, находящихся в режиме бифуркации, по информативным признакам этого явления на основе вышеприведенных выводов. Поскольку конечной целью распознавания является классификация человека, то из всего многообразия биологических объектов условно выделено 3 больших класса в зависимости от их массогабаритных характеристик относительно возможных массы и габаритов человека:

- Класс 1 – биообъекты меньше человека (в данном эксперименте данные взяты для средних и мелких собак);
- Класс 2 – человек;
- Класс 3 – биообъекты больше человека (в данном эксперименте данные взяты для средних и крупных медведей).

Исходные данные для расчета информативных признаков обнаружения биообъектов различного класса представлены в Таблице 1. Несущая частота ВИ ЭМП принята в диапазоне 10–50 МГц, модуляция – амплитудная с частотой 1 кГц.

Таблица 1 – Граничные массогабаритные параметры биообъектов различных классов

Table 1 – Boundary mass-dimensional parameters of bioobjects of different classes

№ класса	Вес (масса) БО заданного класса, кг		Размер БО в направлении ВИ ЭМП, м		Размер БО в направлении поляризации, м		Протяженность контура поверхности БО, м		Удельное поглощение БО энергии ВИ ЭМП, Вт/кг	
	M_D^{min}	M_D^{max}	a^{min}	a^{max}	D^{min}	D^{max}	L_k^{min}	L_k^{max}	$УП_{min}^E$	$УП_{max}^E$
1	10	50	0,05	0,1	0,5	0,8	0,6323	0,9627	$1,0266 \cdot 10^{-12}$	$5,6206 \cdot 10^{-12}$
2	50	100	0,15	0,4	1,5	2,0	1,5937	1,9751		
3	200	1000	0,5	1,0	1,5	2,5	2,1271	3,5452		

На Рисунках 2, 3 представлены результаты расчета граничных значений информативных признаков для каждого класса биообъектов.

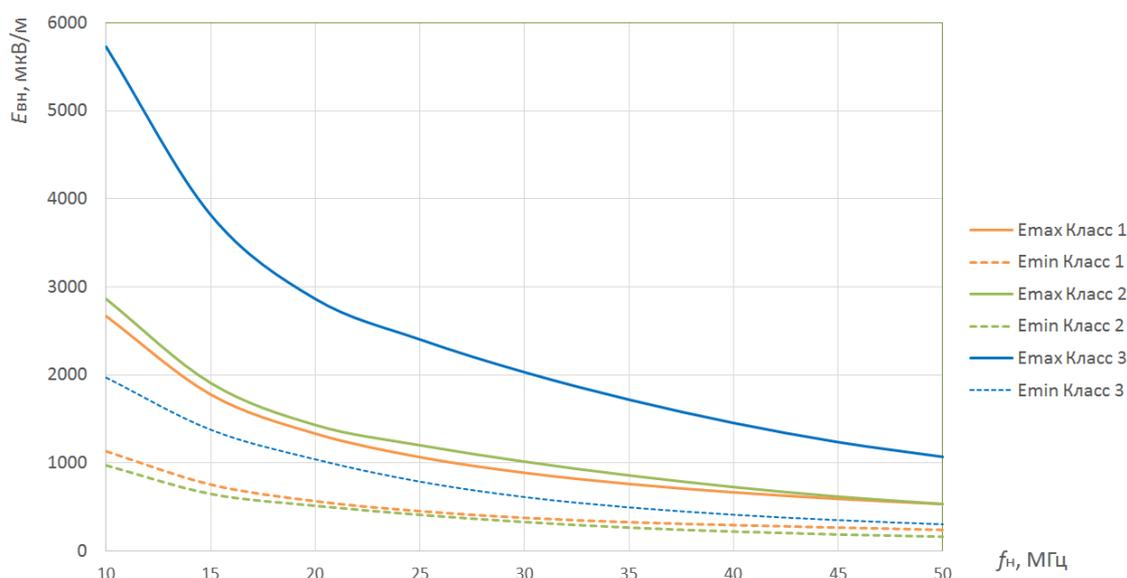


Рисунок 2 – Граничные значения напряженности ВИ ЭМП, обеспечивающие режим бифуркации у биообъектов различных классов

Figure 2 – Boundary values of EI EMR intensity providing bifurcation mode in BO of different classes

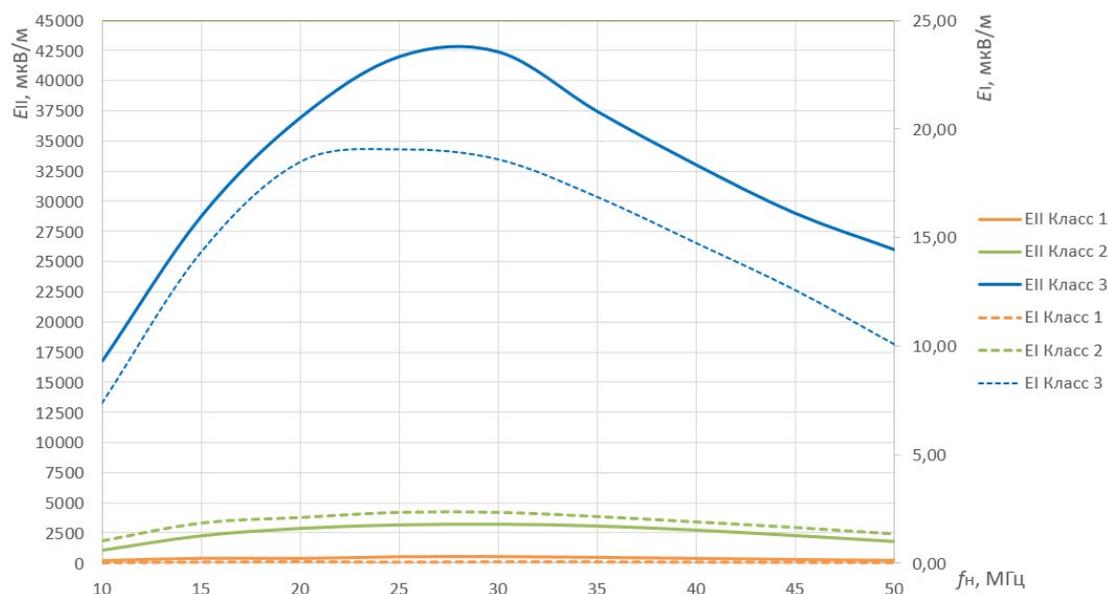


Рисунок 3 – Пороговые значения напряженности излучаемого различными биообъектами электромагнитного сигнала в режиме бифуркации
Figure 3 – Threshold values of the intensity of the electromagnetic signal emitted by different biobjects in the bifurcation mode

Согласно Рисункам 2, 3 каждому классу БО соответствует характерный диапазон значений рассматриваемых информативных признаков на выбранной несущей частоте ВИ ЭМП, которые говорят в первую очередь о том, что сигналы получены от живого организма, находящегося в специфичном для него состоянии – режиме бифуркации. При этом, поскольку эти диапазоны пересекаются (особенно у соседних классов), то использование каждого признака в отдельности недостаточно для однозначной классификации класса объекта, то есть необходимо учитывать группу признаков.

Также на Рисунке 3 можно заменить наличие области максимальной напряженности принимаемого сигнала от всех классов объектов на частотном интервале в 20–40 МГц, отражающей значительное усиление информационного влияния внешнего поля на БО. Это наиболее оптимальное для целей идентификации частотное окно, обеспечивающее наибольшую величину собственных ЭМИ биообъекта и, следовательно, более стабильный сигнал для приема техническими средствами.

В целом можно сделать вывод, что существует устойчивая зависимость величины параметров бифуркации от класса объекта, свидетельствующая о возможности электромагнитной идентификации людей с помощью выделенных информативных признаков и полученных соотношений. Однако важным условием является использование интегрального показателя, объединяющего несколько идентификационных признаков, и ряд частот ВИ ЭМП в диапазоне от 20 до 40 МГц.

В качестве основных априорных информативных признаков обнаружения биообъектов класса «Человек» предлагается использовать следующие величины:

E_{II}^{max} – максимальная напряженность электрической составляющей принимаемого сигнала от биообъекта в режиме бифуркации на заданных частотах гармоник излучаемых сигналов и несущих частотах ВИ ЭМП при максимальных массогабаритных параметрах биообъектов заданного класса;

E_I^{min} – минимальный предел усредненной напряженности принимаемого сигнала от биообъектов за период изменения структуры хаоса на заданных частотах гармоник излучаемых сигналов и несущих частотах ВИ ЭМП;

f_n – несущие частоты источников ВИ ЭМП, обеспечивающих при взаимодействии с биообъектом, находящимся в любом положении в пространстве по отношению к вектору потока ВИ ЭМП, режим Е-поляризации;

E_{Dmin}^{max} , E_{Dmax}^{min} – соответственно максимальная и минимальная амплитуда электрической составляющей напряженности ВИ ЭМП на выбранных несущих частотах ВИ ЭМП в точке взаимодействия с биообъектом, массогабаритные параметры которого соответственно минимального и максимального значения.

В Таблице 2 представлен результат расчета значений предложенных информативных признаков биообъектов класса «Человек» при использовании диапазона 25–35 МГц несущих частот ВИ ЭМП.

Таблица 2 – Результаты расчетов информативных признаков биообъектов класса 2 («Человек»)
Table 2 – Results of calculations of informative features of biojects of class 2 ("Human")

№	Параметры	Несущая частота ВИ ЭМП f_n , МГц			
		25	30	35	
1	Частота гармоник, излучаемая биообъектом, МГц	$f_{1Г}$	16,6	20	23,3
		$f_{2Г}$	33,3	40,0	46,6
		$f_{3Г}$	50,0	60,0	70,0
2	Излучательная способность биообъекта $\rho_{f,T}$ (Дж·Гц ²)·10 ⁻³⁰	На $f_{1Г}$	1,097845781	1,5936212	2,162902533
		На $f_{2Г}$	4,425840255	6,3744848	8,651610133
		На $f_{3Г}$	9,9601325	14,3425908	19,5218597
3	Параметр информативного взаимодействия G (Вт·Гц ² /с)·10 ⁻³²	При D^{max}	2,730938247	3,838686832	5,141083130
		При D^{min}	2,837418053	3,983226120	5,301165821
4	Удельное стандартное поглощение, Вт/кг	УП $_{Dmax}^*$	0,022810600	0,035603510	0,054399462
		УП $_{Dmin}^*$	0,014671555	0,020549978	0,028674030
5	Глубина проникновения ВИ в ткани БО, м	d	0,090746585	0,049969647	0,027863747
6	Напряженность ВИ ЭМП $E_{вн}$ (В/м)·10 ⁻⁶	E_{Dmax}^{max}	964	771	624
		E_{Dmax}^{min}	412	330	267
		E_{Dmin}^{max}	1202	1015	860
		E_{Dmin}^{min}	514	434	367
7	Напряженность E_{I-II} в точке приема сигнала от биообъекта, (В·м/м ²)·10 ⁻⁶	E_{II}^{max}	$\frac{3178,04}{(R_0 + R)^2}$	$\frac{3234,15}{(R_0 + R)^2}$	$\frac{3087,15}{(R_0 + R)^2}$
		E_{II}^{min}	$\frac{2,33}{(R_0 + R)^2}$	$\frac{2,32}{(R_0 + R)^2}$	$\frac{2,13}{(R_0 + R)^2}$

Анализ приведенных в Таблице 2 данных показывает, что при расчете вышеприведенных информативных признаков биообъектов на всех используемых гармониках ($n = 1, 2, 3$) при применении трех несущих частот ВИ ЭМП (25 МГц, 30 МГц и 35 МГц) с круговой поляризацией волны можно получить значения этих величин для каждой из гармоник, идентифицирующих заданный класс (в данном случае человека).

По результатам второй серии вычислительных экспериментов проведена калибровка теоретической модели. Это позволило, используя энциклопедические данные по массогабаритным характеристикам для различных типов биообъектов [15], получить численные значения идентификационных параметров для рабочего словаря признаков, часть из которых представлена в Таблице 3.

Таблица 3 – Численные значения словаря признаков биообъектов различного класса ($f_n = 25$ МГц)
Table 3 – Numerical values of the dictionary of features of bioobjects of different classes ($f_n = 25$ МГц)

№ биообъекта	M, кг	D, м	a, м	S _{max} , м ²	S _{min} , м ²	E ₀ , мкВ/м	α, град	α _п ^{S_{max}} , град	α _п ^{S_{min}} , град	α _п , град	E _{вн} , мкВ/м		W _E (d; ω _n)	Y
											E _{вн} ^{max(S_{max})}	E _{вн} ^{max(S_{min})}		
1	2,1	0,3	0,04479	4,3	0,555	11,08	0,2254	712	0,02247		958	28,741		
		0,17	0,00227											
2	3,0	0,44	0,06179	6,1	0,793	15,12	0,3219	721	0,02247		1171	28,382		
		0,18	0,02269											
3	5,0	0,5	0,08557	10,1	1,321	20,52	0,5366	774	0,0199		1450	29,871		
		0,19	0,02717											
4	14,0	1	0,19689	28,4	3,697	40,74	1,502	843	0,01693		2724	32,241		
		0,21	0,03332											
5	36,0	1	0,32371	73,1	9,434	54,77	3,858	1058	0,00525		2473	82,895		
		0,35	0,09621											
6	38,0	1	0,32566	77,1	9,948	54,93	4,081	1088	0,0035		2086	120,78		
		0,4	0,12566											
7	45,0	1	0,36897	91,3	11,733	58,22	4,818	1116	0,0034		2349	122,71		
		0,41	0,12818											
8	56,0	1,57	0,48012	113,6	14,49	64,55	5,938	1087	0,00668		4207	63,313		
		0,32	0,08042											
9	65,0	1,68	0,54639	131,9	16,69	67,29	6,941	1100	0,00569		4113	73,546		
		0,39	0,09079											
10	126,0	1,2	0,69209	248,0	29,38	71,72	12,87	1409	0,00045		2421	150,18		
		0,653	0,33490											
11	500,0	2,2	1,65970	1015,0	66,57	82,16	43,12	2081	0,00012		5555	1889,3		
		0,82	0,52810											
12	723,0	2,5	2,30608	1468,0	73,32	84,34	53,56	2147	0,00003		5316	8841,9		
		1,01	0,80118											
13	3672,0	5,0	6,97370	7454,0	86,62	88,12	81,73	3294	5·10 ⁻⁷		11792	27929,0		
		1,49	1,74366											

Параметры рабочего словаря формируют образ конкретного биообъекта или обобщенного класса, состоящего из фиксированного конечного набора характерных информативных признаков электромагнитного обнаружения и распознавания. Эти параметры отражают специфический режим взаимодействия внешнего ЭМП и биологической среды с конкретными массогабаритными характеристиками и определенным положением в пространстве в данный момент времени, что позволяет на основе зависимостей (1)–(8) одновременно с селекцией определять направление и параметры движения объектов (при необходимости).

Сравнение величин словаря признаков биологических объектов, полученных по результатам моделирования, со значениями, полученными в физическом эксперименте, показывает, что расхождение численных значений не превышает порядка 10 %. Вполне очевидно, что экспериментальные зависимости собственных электромагнитных излучителей от напряженности и модуляционно-временных параметров внешнего поля, с одной стороны, и массогабаритных характеристик – с другой, в полной мере подтверждают предсказанную теоретически закономерность.

Заключение

1. Исследована динамика бифуркационного процесса изменения собственных ЭМИ биологического объекта при информационном воздействии внешнего структурированного низкоинтенсивного ЭМП радиоволнового диапазона, определены условия достижения и физические принципы существования этого явления, зависящего в первую очередь от сочетания энергетических и частотных параметров внешнего поля с электродинамическими и массогабаритными характеристиками биологической среды.

2. Предложена и обоснована оптимальная номенклатура информативных признаков электромагнитного обнаружения и распознавания БО заданного класса, в качестве которых выступают параметры бифуркационного взаимодействия нарушителя с ВИ ЭМП, позволяющие оценить массогабаритные характеристики объекта и отнести его к определенному классу на основе анализа ответной реакции организма на внешнее поле в виде широкополосного хаотического сигнала.

3. Выведены аналитические выражения для расчета значений наиболее информативных признаков классификации биообъектов, за счет которых была дополнена математическая модель метода электромагнитного обнаружения и распознавания нарушителей.

4. Результаты проведенного вычислительного эксперимента подтверждают существование устойчивой зависимости параметров бифуркации от массы и размеров объекта, то есть возможность электромагнитной идентификации людей или других классов биообъектов с помощью выделенных информативных признаков и полученных соотношений при условии одновременно использования нескольких показателей на определенном частотном диапазоне ВИ ЭМП.

5. По результатам исследования разработан словарь признаков классификации нарушителей. Его отличительной особенностью является возможность на ограниченном интервале наблюдения, по результатам анализа динамики изменения измеряемых параметров среды, обоснованно принимать решение не только о наличии в контролируемом пространстве нарушителей, но и их принадлежности заданному классу, направлении и параметрах движения.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ / REFERENCES

1. Костин В.Н. Задачи концептуального проектирования физической защиты критически важных объектов. *Проблемы информационной безопасности. Компьютерные системы*. 2020;(1):58–67.
Kostin V.N. Tasks of Conceptual Design of Physical Protection of Critically Important Objects. *Problems of Information Security. Computer Systems*. 2020;(1):58–67. (In Russ.).
2. Lessan J.D., Pond G. A Genetic Algorithm-Based Solution for Multi-Type Maximal Covering Location Problem (MMCLP): Application to Defense and Deterrence. *Journal of Defense Analytics and Logistics*. 2024;8(2):160–178. <https://doi.org/10.1108/JDAL-04-2024-0007>
3. Черных А.К., Шиленин Д.А., Сысуев С.Ю. Методика оценки эффективности комплекса инженерно-технических средств охраны объектов на коммуникациях. *Вопросы оборонной техники. Серия 16: Технические средства противодействия терроризму*. 2022;(5–6):44–50.
Chernykh A.K., Shilenin D.A., Sysuev S.Yu. Methodology for Evaluating the Effectiveness of the Complex of Engineering and Technical Means of Protection Objects on Communications. *Military Engineering. Counter-Terrorism Technical Devices. Issue 16*. 2022;(5–6):44–50. (In Russ.).

4. Haywood A.B., Lunday B.J., Robbins M.J., Pachter M.N. The Weighted Intruder Path Covering Problem. *European Journal of Operational Research*. 2022;297(1):347–358. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2021.05.038>
5. Чубий А.Д., Жуков В.О. *Определение возможности дистанционной персональной идентификации человека по его собственным хаотическим электромагнитным излучениям*. Пермь: Изд-во «СНИБ «Эльбрус»; 2011.
6. Марчук А.В., Немов Я.Н. К проблеме идентификации человека-нарушителя в системе информационного обеспечения физической защиты объектов ФСИН России. *Вестник Пермского института ФСИН России*. 2014;(4):22–25.
Marchuk A.V., Nemov Ya.N. The Problem of Person-Offender Identification in the System of Information Support of Physical Protection of the Objects of the Federal Penal Service of Russia. *Vestnik Permskogo instituta FSIN Rossii*. 2014;(4):22–25. (In Russ.).
7. Алешков А.А., Цветков Г.А. Метод обнаружения и распознавания биологических объектов по собственным электромагнитным излучениям. *Вестник ПНИПУ. Электротехника, информационные технологии, системы управления*. 2023;(47):50–70.
Aleshkov A.A., Tsvetkov G.A. Method of Detection and Recognition Biological Objects by Its Own Electromagnetic Emissions. *PNRPU Bulletin. Electrical Engineering, Information Technology, Control Systems*. 2023;(47):50–70. (In Russ.).
8. Алешков А.А., Цветков Г.А. Технология хаос-ритмов в исследованиях собственного электромагнитного поля биологических объектов. *Моделирование, оптимизация и информационные технологии*. 2024;12(2). <https://doi.org/10.26102/2310-6018/2024.45.2.032>
Aleshkov A.A., Tsvetkov G.A. Chaos-Rhythm Technology in Research of Intrinsic Electromagnetic Field of Biological Objects. *Modeling, Optimization and Information Technology*. 2024;12(2). (In Russ.). <https://doi.org/10.26102/2310-6018/2024.45.2.032>
9. Дмитриев Д.С., Аистова Л.Г., Грязнов В.Г., Ицков В.В., Рыжов А.И., Турканов И.Ф. О взаимодействии модулированных электромагнитных полей с живыми биологическими организмами. *Физические основы приборостроения*. 2024;13(3):56–75.
Dmitriev D.S., Aistova L.G., Gryaznov V.G., Itskov V.V., Ryzhov A.I., Turkanov I.F. On the Interaction of Modulated Electromagnetic Fields with Living Biological Organisms. *Physical Bases of Instrumentation*. 2024;13(3):56–75. (In Russ.).
10. Цветкова Е.А., Гольдаде В.А. Взаимодействие электромагнитных полей с биополем человека. *Проблемы физики, математики и техники*. 2012;(1):51–58.
Tsvetkova E.A., Goldade V.A. Interaction Between Electromagnetic Fields and Human Biofield. *Problems of Physics, Mathematics and Technics*. 2012;(1):51–58. (In Russ.).
11. Грызлова О.Ю., Субботина Т.И., Хадарцев А.А., Яшин А.А., Яшин С.А. *Биорезонансные эффекты при воздействии электромагнитных полей: физические модели и эксперимент*. Москва: Издательство «Триада»; 2007. 159 с.
12. Еськов Е.К. *Биологические эффекты электромагнитных полей*. Москва: ИНФРА-М; 2024. 284 с.
13. Кизилова Н.Н. Электромагнитные свойства биоматериалов и воздействие электромагнитных полей на биологические системы. В сборнике: *И.Е. Тарапов. Ученый. Учитель. Человек: сборник статей*. Харьков: Издательство «Новое слово»; 2011. С. 173–222.
14. Кинг Р., Смит Г. *Антенны в материальных средах*. Москва: Издательство «Мир»; 1984. 812 с.
King R., Smith G. *Antennas in Matter. Fundamentals, Theory, and Applications*. Moscow: Izdatel'stvo "Mir"; 1984. 812 p. (In Russ.).

15. Газенко О.Г., Кальвин М. *Основы космической биологии и медицины. Том III: Космическая медицина и биотехнология*. Москва: Изд-во «Наука»; 1975. 557 с.
Gazenko O.G., Calvin M. *Foundations of Space Biology and Medicine. Volume III: Space Medicine and Biotechnology*. Moscow: Izd-vo "Nauka"; 1975. 557 p. (In Russ.).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Алешков Андрей Андреевич, аспирант, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Российская Федерация.
e-mail: xgx.andrew.ru@mail.ru

Andrei A. Aleshkov, Postgraduate, Perm National Research Polytechnic University, Perm, the Russian Federation.

Цветков Геннадий Александрович, доктор технических наук, профессор кафедры «Безопасность жизнедеятельности» Пермского национального исследовательского политехнического университета, Пермь, Российская Федерация.
e-mail: zvetkov71043@mail.ru

Gennady A. Tsvetkov, Doctor of Engineering Sciences, Professor at the Department of Life Safety, Perm National Research Polytechnic University, Perm, the Russian Federation.

Коковин Андрей Николаевич, аспирант, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Российская Федерация.
e-mail: andriy.kokovin@yandex.ru

Andrei N. Kokovin, Postgraduate, Perm National Research Polytechnic University, Perm, the Russian Federation.

Статья поступила в редакцию 09.04.2025; одобрена после рецензирования 28.04.2025; принята к публикации 05.05.2025.

The article was submitted 09.04.2025; approved after reviewing 28.04.2025; accepted for publication 05.05.2025.